



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Γκανά Αλέξανδρου

Επιβλέπων : κ. ΙΩΑΝΝΗΣ, Α. ΡΟΥΜΕΛΙΩΤΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
Γκανά Αλέξανδρου

Επιβλέπων : κ. ΙΩΑΝΝΗΣ, Α. ΡΟΥΜΕΛΙΩΤΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Οκτωβρίου 2018.

.....
Ιωάννης Ρουμελιώτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Τσαλαμέγκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ηλίας Γλύτσης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γκανάς Αλέξανδρος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.

Copyright © ΓΚΑΝΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ,2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Περίληψη

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η διερεύνηση της βιβλιογραφίας που αφορά σε δύο σύγχρονα και καιρία ζητήματα της έρευνας στον τομέα των μεταϊλικών και συγκεκριμένα των φωτονικών κρυστάλλων και των πλασμονίων, καθώς και η παρουσίαση της προόδου που συντελείται στους εν λόγω τομείς.

Η έρευνα εστιάστηκε κυρίως σε άρθρα που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία τρία χρόνια (2016-2017-2018) σε επιστημονικά περιοδικά του εξωτερικού, και διπλωματικές εργασίες που συντάχθηκαν στην Ελλάδα. Οι εργασίες αυτές εστίαζαν κυρίως στη βασική έρευνα που αφορά τους εν λόγω ερευνητικούς τομείς και στις πιθανές εφαρμογές που μπορεί να προκύψουν ή ήδη αναπτύσσονται. Ταυτόχρονα εξετάστηκαν και κάποια άρθρα αναφοράς και επισκόπησης πρόσφατα δημοσιευμένα, ώστε να καλυφθεί και η πρωτογενής και η δευτερογενής βιβλιογραφία πάνω στο θέμα.

Συγκεκριμένα, αφού γίνεται μια αναφορά στον τομέα των μεταϊλικών, παρουσιάζονται οι φωτονικοί κρύσταλλοι και η έρευνα πάνω σε αυτούς στα πεδία της κβαντικής έρευνας, της φωτονικής, των μη-γραμμικοτήτων, των lasers, της τεχνολογίας αισθητήρων, των δομών Bragg, της οπτικής παγίδευσης και της οπτομηχανικής και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα. Αντίστοιχα, στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πλασμόνια και η έρευνα που συντελείται στους τομείς της κβαντικής πλασμονικής, της τεχνολογίας αισθητήρων και απεικόνισης, στη συνύπαρξη με το γραφένιο, της φωτονικής του εγγύς υπερύθρου και τέλος συνάγονται τα συμπεράσματα.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι η έρευνα βρίσκεται ακόμα σε βασικό στάδιο, αν και διαρκώς προκύπτουν προτάσεις για δομές και συσκευές που συναποτελούνται από φωτονικούς κρυστάλλους ή πλασμόνια, προτείνοντας βελτιώσεις ή καινοτόμες λύσεις στους τομείς της φωτονικής και των τηλεπικοινωνιών και συνεισφέρουν, γενικότερα, στην προσπάθεια σταδιακής αντικατάστασης των ηλεκτρονικών λειτουργιών από φωτονικές.

Λέξεις Κλειδιά

Μεταϊλικά, Φωτονικοί κρύσταλλοι, πλασμόνια, φωτονική, πλασμονική, τηλεπικοινωνίες, οπτική, υποκυματική περιοχή

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Abstract

The aim of this diploma thesis is the study and investigation of the literature on two contemporary and crucial issues of research in the field of metamaterials, namely photonic crystals and plasmons, as well as the presentation of the progress made in these fields.

The research was focused mainly on articles published in the last three years (2016-2017-2018) in scientific journals abroad, and on diploma theses written in Greek. This work was mainly focused on basic research related to these research areas and on possible applications that may occur or may have already developed. At the same time, some recently published review articles were taken into account, in order to cover both primary and secondary literature on the topic

Particularly, following a reference in the field of metamaterials, photonic crystals and their research are presented in the fields of quantum research, photonics, nonlinearities, lasers, Bragg structures, sensor technology, optical trapping and optomechanics and some conclusions are presented. Correspondingly, plasmons are presented, as well as research in the areas of quantum plasmonics, sensing and imaging technology, graphene structures, photonics, near infrared and finally some conclusions are drawn.

The research is still at a basic stage, although proposals for structures and devices consisting of photonic crystals or plasmons are made, suggesting improvements or innovative solutions in the fields of photonics and telecommunications, which generally contribute to the effort to gradually replace electronic functions with photonics

KeyWords

Metamaterials, Photonic crystals, plasmons, photonics, plasmonics, telecommunications, optics, sub-wavelength region

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Ευχαριστίες

Έχοντας ολοκληρώσει την παρούσα εργασία θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου για τις πολύτιμες συμβουλές του, ώστε να φέρω εις πέρας το έργο μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	σελ. 7
Abstract	σελ. 9
Ευχαριστίες	σελ. 11
Εισαγωγή	σελ. 15
Κεφάλαιο 1: Μεταυλικά	σελ. 17
1.1 Εισαγωγή στα μεταυλικά	σελ. 17
1.2 Πρακτικές εφαρμογές των μεταυλικών	σελ. 19
1.2.1 “Εξωτικά” Υλικά	σελ. 19
1.2.2 Πιθανές εφαρμογές	σελ. 20
1.2.2.1 Απεικόνιση πέραν του ορίου περίθλασης/Υποκυματική απεικόνιση	σελ. 20
1.2.2.2 Εφαρμογές σε κυκλώματα	σελ. 21
1.2.2.3 Εφαρμογές κεραιών	σελ. 22
1.2.2.4 Μανδύας αορατότητας (Cloaking)	σελ. 22
1.2.2.4.1 Τι είναι το cloaking και η αορατότητα	σελ. 22
1.2.2.4.2 Συμπεράσματα	σελ. 24
1.2.2.5 Βιοαισθητήρες	σελ. 25
1.2.2.6 Ανίχνευση σωματιδίων	σελ. 26
Κεφάλαιο 2 Φωτονικοί κρύσταλλοι	σελ. 27
2.1 Εισαγωγή στους φωτονικούς κρυστάλλους	σελ. 27
2.1.1 Έρευνα στα κβαντικά φαινόμενα και εφαρμογές	σελ. 32
2.1.2 Μη γραμμικότητες	σελ. 35
2.1.3 Φωτονική και τηλεπικοινωνίες	σελ. 37
2.1.4 Τεχνολογία αισθητήρων (Sensing)	σελ.45
2.1.5 Δομές Bragg	σελ. 52
2.1.6 Lasers	σελ. 56

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

2.1.7 Παγίδευση φωτός (Light trapping).....	σελ. 63
2.1.8 Οπτομηχανική (Optomechanics).....	σελ. 71
2.1.9 Συμπεράσματα για τους φωτονικούς κρυστάλλους.....	σελ. 73
Κεφάλαιο 3 Πλασμόνια.....	σελ. 77
3.1 Τα επιφανειακά πλασμόνια	σελ. 77
3.1.1 Πλασμονική και εφαρμογές	σελ. 79
3.1.2 Κβαντική πλασμονική (Quantum plasmonics).....	σελ. 84
3.1.3 Τεχνολογία αισθητήρων/Απεικόνιση (Sensing/Imaging)σελ.	92
3.1.3.1 Παράδειγμα χρήσης συντονισμού επιφανειακών πλασμονίων.....	σελ. 98
3.1.4 Γραφένιο (Graphene).....	σελ. 101
3.1.5 Φωτονική (Photonics).....	σελ. 107
3.1.5.1 Ο κυματοδηγός DLSPP	σελ. 117
3.1.6 Εγγύς υπέρυθρο (Near-Infrared).....	σελ. 120
3.1.7 Συμπεράσματα για τα πλασμόνια.....	σελ. 123
Βιβλιογραφία.....	σελ. 125

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια είναι πολλοί οι ερευνητές που έχουν οραματιστεί τη σταδιακή αντικατάσταση των ηλεκτρονικών λειτουργιών από φωτονικές. Φωτονικά κυκλώματα, οπτικές ίνες, κβαντικοί υπολογιστές, αποτελούν έννοιες που διαρκώς βρίσκονται στο προσκήνιο, σε μια προσπάθεια να δοθεί στην τεχνολογία μια καινούρια ώθηση με τον ίδιο τρόπο, την ίδια ταχύτητα και τη ραγδαία εξέλιξη που έλαβε χώρα κατά την άνθηση της ηλεκτρονικής και στη συνέχεια της πληροφορικής.

Ομολογουμένως, μέχρι στιγμής, στην κατεύθυνση αυτή η μεγαλύτερη καινοτομία υπήρξε η επικράτηση των οπτικών ινών έναντι των συμβατικών χάλκινων καλωδίων στο κομμάτι της μεταφοράς δεδομένων, καθώς σε οποιοδήποτε άλλο κομμάτι του τεχνολογικού μας κόσμου η καθιέρωση φωτονικών συσκευών γίνεται με πολύ αργό ρυθμό και δίχως μεγάλη συγκρότηση.

Παρά ταύτα ο οραματισμός διατηρείται και η έρευνα συνεχίζεται με αμείωτους ρυθμούς, καθώς η διαρκής ανακάλυψη δομών, φαινομένων και ιδιοτήτων στον φυσικό κόσμο και συγκεκριμένα σε τομείς όπως η οπτική και τα μεταϋλικά, δίνουν διαρκώς νέα εναύσματα για καινούριες ιδέες και εφαρμογές.

Στο πλαίσιο αυτό κινείται και η έρευνα πάνω στους φωτονικούς κρυστάλλους και τα πλασμόνια. Παρά το γεγονός ότι η ύπαρξη τους είναι γνωστή εδώ και αρκετές δεκαετίες και αρχικά το ενδιαφέρον πάνω σε αυτά ήταν συνυφασμένο με τον τομέα των μεταϋλικών, σιγά σιγά αρχίζουν να αποκτούν δική τους υπόσταση και εξέλιξη, εμπλουτίζοντας τη διεθνή βιβλιογραφία με πλειάδα καινούριων άρθρων, στα οποία παρουσιάζονται θεωρητικοί υπολογισμοί, προσομοιώσεις, καινούριες δομές, εφαρμογές και σωρεία ενδιαφερόντων αποτελεσμάτων, δημιουργώντας έναν κυκλώνα πληροφοριών.

Σε αυτό το πλαίσιο η παρούσα διπλωματική εργασία κινείται πάνω στον άξονα της μελέτης και της παρουσίασης της έρευνας που γίνεται πάνω σε αυτά τα φαινόμενα, σε μια προσπάθεια να δοθεί μια συγκροτημένη εικόνα και κυρίως η κατεύθυνση που φαίνεται να παίρνει. Επειδή όμως πρόκειται για την αιχμή της τεχνολογικής έρευνας είναι πολύ δύσκολο να εξάγουμε σίγουρα συμπεράσματα, παρά μόνον να κάνουμε κάποιες βασικές υποθέσεις και να παραθέσουμε κάποια στοιχεία.

Ταυτόχρονα για το λόγο αυτό είναι πιθανόν σε σημεία της εργασίας να έχουν χρησιμοποιηθεί μη δόκιμοι επιστημονικά όροι, κάτι που είναι λογικό, καθώς πρόκειται για πεδίο της επιστήμης που τώρα συγκροτείται και δεν έχει διαμορφωθεί πλήρως εννοιολογικά και επιστημολογικά.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Μεταϋλικά

1.1 Εισαγωγή στα μεταυλικά

Η πρώτη φορά που υπήρξε αναφορά στα μεταϋλικά ήταν τη δεκαετία του 1960 από τον Veselago[1]. Ο όρος μεταϋλικά υποδηλώνει -καθώς εμπεριέχει το πρόθεμα μετα- ότι πρόκειται για υλικά τα οποία υπερβαίνουν τις ιδιότητες των συμβατικών υλικών που βρίσκονται στη φύση. Η ιδέα προέκυψε όταν ο Veselago εξέτασε τη δυνατότητα ύπαρξης υλικών τα οποία να διαθέτουν ταυτόχρονα αρνητική ηλεκτρική επιτρεπτότητα ϵ και αρνητική μαγνητική διαπερατότητα μ , μια υπόθεση η οποία δεν παραβιάζει τις εξισώσεις του Maxwell. Μια τέτοια υπόθεση θα είχε σαν αποτέλεσμα η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} , η ένταση του μαγνητικού πεδίου \vec{H} και το κυματοδιάνυσμα \vec{k} να σχηματίζουν μια αριστερόστροφη τριπλέτα, σε εμφανή αντίθεση με τα συμβατικά υλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται από δεξιόστροφη τριπλέτα. Αυτό προκύπτει από το παρακάτω ζευγάρι εξισώσεων Maxwell:

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu_0 \mu \vec{H} \quad (1)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \quad (2)$$

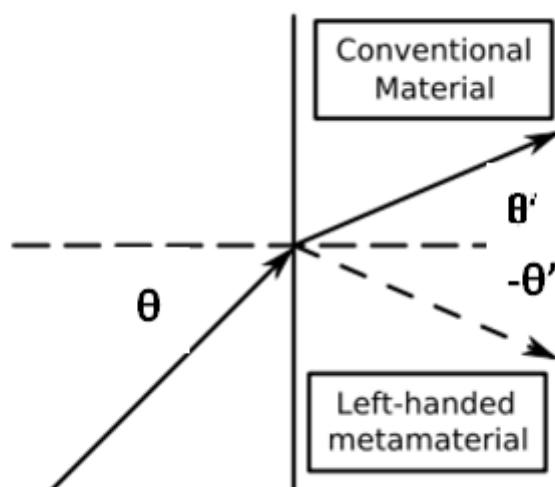
Εξαιτίας αυτής της διαφοράς προκύπτει και η πρώτη διάκριση μεταξύ μεταϋλικών και υλικών, όπου τα μεν πρώτα χαρακτηρίζονται ως αριστερόστροφα (left-handed media-LHM) και τα δε δεύτερα ως δεξιόστροφα (right-handed media-RHM). Το διάνυσμα Poynting στα μεταϋλικά διατηρεί τη δεξιόστροφη τριπλέτα με τα μεγέθη \vec{E} , \vec{H} και κατά συνέπεια το κυματοδιάνυσμα \vec{k} και το διάνυσμα Poynting \vec{S} είναι αντιπαράλληλα, καθώς

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3)$$

Επιπλέον ο Veselago προχώρησε ένα βήμα παραπέρα και υποστήριξε ότι τα συγκεκριμένα υλικά θα έπρεπε να χαρακτηρίζονται από αρνητικό δείκτη διάθλασης n , ο οποίος προκύπτει αν λάβουμε υπόψη την αρνητική ρίζα στον ορισμό του δείκτη διάθλασης

$$n = \mp \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (4)$$

Η συγκεκριμένη ιδιότητα θα προσέλκυε μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον αργότερα, καθώς οδηγεί σε αντιστροφή του νόμου του Snell και κατά συνέπεια στην αρνητική διάθλαση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος όταν περάσει από ένα μεταϋλικό.



Σχήμα 1.1: Διάθλαση ακτίνας φωτός σε συμβατικό υλικό και σε αριστερόστροφο υλικό.

Ο ίδιος ο Veselago σημείωσε στην εργασία του ότι τέτοια υλικά δεν έχουν βρεθεί στη φύση και προσέθετε ότι προφανώς υπάρχει λόγος για αυτό το γεγονός. Αυτός είναι και ο λόγος που τα μεταύλικά, τα οποία έχουν δημιουργηθεί από τη δεκαετία του 90 και μετά, όταν αναβίωσε το ενδιαφέρον για τη δουλειά του Veselago, είναι τεχνητά και επιπλέον προκύπτουν μέσα από συγκεκριμένες προτεινόμενες διατάξεις και όχι από την ίδια τη δομή τους. Μάλιστα, για να προκύψουν μεταύλικά, γίνεται χρήση συγκεκριμένων ανομοιογενειών των διατάξεων, οι οποίες επηρεάζουν τη συμπεριφορά του μεταυλικού και έτσι προκύπτουν οι επιθυμητές ιδιότητες. Αναλυτικότερα και μετά από πιο επισταμένη μελέτη των μεταυλικών, η οποία πραγματοποιήθηκε από το 1996 και μετά όταν ο Pendry πρότεινε τη δημιουργία τεχνητών μεταυλικών[2,3], οι επιθυμητές ιδιότητες των μεταυλικών συνίστανται στα εξής:

1. Έχουν αρνητικό δείκτη διάθλασης.
2. Η φάση του κύματος προπορεύεται καθώς αυτό απομακρύνεται από την πηγή.
3. Το πλάτος του κύματος αυξάνεται καθώς απομακρύνεται από την πηγή.
4. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} , η ένταση του μαγνητικού πεδίου \vec{H} και το κυματοδιάνυσμα \vec{k} σχηματίζουν μια αριστερόστροφη τριπλέτα.

Τα σημεία 1 και 4 προτάθηκαν από τον ίδιο τον Veselago, ενώ τα σημεία 2 και 3 προέκυψαν από τη μεταγενέστερη δουλειά του Pendry[2,3]. Οι παραπάνω ιδιότητες οδηγούν στη δημιουργία φαινομένων τα οποία προξενούν μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον. Μερικά

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

από αυτά, όπως υποδείχθηκαν πρώτα από τον Veselago αλλά και αργότερα από άλλους, είναι: τροποποίηση του νόμου του Snell που αφορά στη διάθλαση, αντιστροφή του φαινομένου του Doppler, αντιστροφή της ακτινοβολίας Vavilov-Cerenkov, αντιστροφή της απόκλισης και σύγκλισης σε κοίλους και κυρτούς φακούς κ.α. Ενώ αυτά τα φαινόμενα έχουν θεμελιωθεί θεωρητικά, κάποια δεν είναι εύκολο να επιβεβαιωθούν και εργαστηριακά. Ωστόσο το μεγαλύτερο ζήτημα στον τομέα των μεταλλικών παραμένει ο τρόπος κατασκευής τους. Η δυσκολία οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η μονάδα ύλης p του μεταλλικού θα πρέπει να είναι αισθητά μικρότερη από το μήκος κύματος λ_g ($p \ll \lambda_g$) των πεδίων, έτσι ώστε το μεταλλικό να συμπεριφέρεται σαν ομοιογενές υλικό σε μακροσκοπική κλίμακα. Αρκετοί τρόποι κατασκευής έχουν προταθεί. Η πρόσφατη έρευνα έχει προχωρήσει αρκετά και πλέον δεν περιορίζεται μόνο στην έρευνα και υλοποίηση δομών με αρνητικό δείκτη διάθλασης (NRI). Αντίθετα, πεδίο μεγάλου επιστημονικού ενδιαφέροντος αποτελούν οι αποκρίσεις όλων των ειδών μεταλλικών, όπως αυτά με μία αρνητική παράμετρο, με αρνητικό δείκτη διάθλασης μικρότερο του -1, βαθμιαίου δείκτη (Gradient-index -GRIN), η περίθλαση και η μη γραμμικότητα και πολλές ακόμα ενδιαφέρουσες προτάσεις.[4]

1.2 Πρακτικές εφαρμογές των μεταλλικών

1.2.1 “Εξωτικά” Υλικά

Πίσω στο 1967, ο Veselago [1] αναφέρθηκε, στην κλασική πλέον εργασία του, στις εξωτικές ιδιότητες των μεταλλικών LH (ή NRI), οι οποίες αναφέρθηκαν και πιο πάνω. Μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων η αντιστροφή του φαινομένου Doppler φαίνεται εξαιρετικά δύσκολο να παραχθεί πειραματικά. Ένα φαινόμενο που μοιάζει πολύ με την αντιστροφή της ακτινοβολίας Vavilov-Cerenkov έχει εφαρμοστεί στις κεραίες διαρροής κύματος. Η αντιστροφή του νόμου Snell και η σχετική παραδοσιακή αντιστροφή οπτικού φακού και εστίασης πλάκας, μετά τις αρχικές διαφωνίες, έχουν επικυρωθεί θεωρητικά και πειραματικά από αρκετούς ερευνητές. Ωστόσο, λίγες πρακτικές εφαρμογές προέκυψαν, κυρίως λόγω της δυσκολίας της μαζικής κατασκευής αποδοτικών NRI μεταλλικών. Το 2000, ο Pendry είχε αναφερθεί στο φαινόμενο της «υπερ-εστίασης»[5], αξιοποιώντας μια επιφάνεια πλασματικού συντονισμού (επιφανειακά κύματα) στις διεπαφές της LH πλάκας Veselago, για να ενισχύσει τα οδεύοντα κύματα και έτσι να ξεπεραστεί το όριο περίθλασης. Αυτή η συναρπαστική ιδέα έχει συγκεντρώσει τεράστια προσοχή, καθώς αρχικά είχε θεωρηθεί από πολλούς ότι αποτελεί μια επαναστατική ανακάλυψη για την υποκυματική απεικόνιση. Ωστόσο, προέκυψαν σοβαροί περιορισμοί για το πείραμα αυτό, με κύριο περιορισμό την καταστρατήγηση της συνθήκης

$$\epsilon / \epsilon_0 = \mu / \mu_0 = -1, (5)$$

και το γεγονός ότι η υπερ-ανάλυση με LH-πλάκα, αν και μπορεί να είναι δισδιάστατη, δεν μπορεί να υπερ-εστιάσει την ενέργεια σε τρισδιάστατο χώρο. Μια ανάλυση του φακού του Pendry παρέχεται στην [6], που τον παρομοιάζει με

συσσκευή σπράγγων- αντιστοίχισης, γνωστή στους μηχανικούς μικροκυμάτων. Παρά τα πρωταρχικά ελπιδοφόρα αποτελέσματα με τη χρήση απλουστευμένων (όχι NRI) δομών, ο υπερφακός (superlens) δεν φαίνεται να είναι έτοιμος ακόμα για πρακτικούς σκοπούς στην οπτική. Ωστόσο, πολλές συναφείς συναρπαστικές ερευνητικές κατευθύνσεις, όπως οι hyperlenses έχουν προταθεί και καταβάλλονται προσπάθειες για την υλοποίηση τους, και τον εμπλουτισμό του δυναμικού πεδίου της υποκυματικής απεικόνισης. Από την αρχική πρόταση του Linden[7], πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την υλοποίηση των οπτικών αρνητικών παραμέτρων ($\epsilon < 0$ ή $\mu < 0$ ή και τα δύο) των μεταϋλικών. Οι δομές αυτές είναι γενικά ηλεκτρομαγνητικά λεπτά οπτικά στρώματα με προσθήκες μεταϋλικών, που είναι ουσιαστικά παρεμφερείς με επιφάνειες επιλογής συχνότητας μικροκυμάτων, παρά πραγματικά υλικά, με εξαίρεση ορισμένα πρόσφατα παραδείγματα για κάποιες πολυστρωματικές δομές. Μια άλλη πρόσφατη εφαρμογή μεταϋλικών, η οποία είναι πάρα πολύ ελκυστική για τους επιστήμονες, είναι το cloaking, που βασίζεται είτε στην ακύρωση της σκέδασης είτε στον μετασχηματισμό συντεταγμένων. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται μεταϋλικά βαθμιαίου δείκτη (GRIN), για να δημιουργήσουν καλούπι για τη ροή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ενώ τέτοιες δομές GRIN μπορούν κατ' αρχήν να υλοποιηθούν με τεχνητά διηλεκτρικά θετικών παραμέτρων, ή από πιο πρόσφατα τρισδιάστατα μεταϋλικά, η πρακτική τους εφαρμογή είναι εξαιρετικά δύσκολη σε μικροκύματα και σχεδόν αδιανόητη στην οπτική, όπου πολλοί περιορισμοί, όπως τα προβλήματα κατασκευής, οι απαγορευτικές απώλειες, ο περιορισμός του εύρους ζώνης και η περίθλαση θα έχουν ως αποτέλεσμα περισσότερο παραμορφωμένες εικόνες, παρά πραγματική αφάνεια.

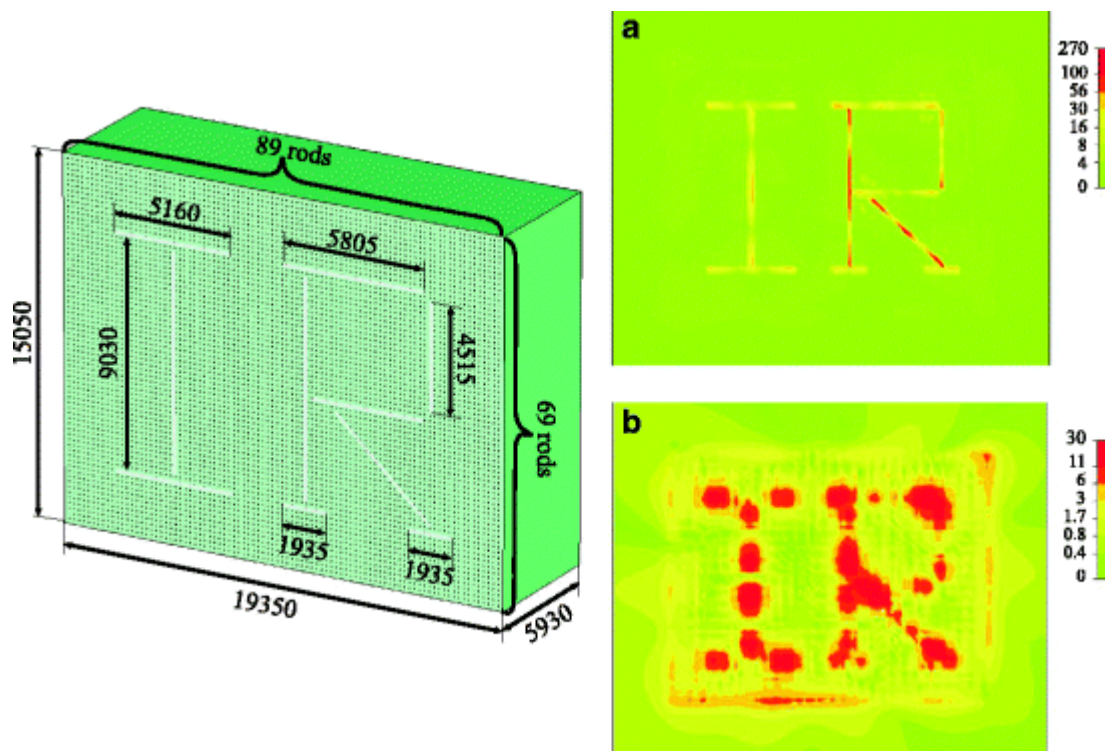
1.2.2 Πιθανές εφαρμογές

1.2.2.1 Απεικόνιση πέραν του ορίου περίθλασης/Υποκυματική απεικόνιση

Είναι γνωστό ότι οι συμβατικές συσκευές απεικόνισης, βασισμένες σε φακούς, δεν μπορούν να παρέχουν ανάλυση καλύτερη από $\lambda / 2$, όπου λ είναι το μήκος κύματος ακτινοβολίας. Αυτός ο περιορισμός είναι το λεγόμενο όριο περίθλασης. Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές, που βασίζονται στη χρήση μεταϋλικών για την απεικόνιση πέραν του ορίου περίθλασης σε διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Οι προτεινόμενες τεχνικές περιλαμβάνουν τον τέλειο φακό, τους υπερφακούς (superlenses) του αργύρου, τους hyperlenses και τους φακούς των μέσων σύρματος (wire medium lenses).

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Για παράδειγμα, οι Silveirinha et al. [8] έδειξαν ότι ένας φακός από νανοράβδους αργύρου θα μπορούσε να επιτύχει ανάλυση πέραν του ορίου περίθλασης, της τάξης του $\lambda / 10$, στα 33 THz. Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του [8].



Σχήμα 1.2: Ανάλυση πέραν του ορίου περίθλασης της τάξης του $\lambda / 10$ στα 33 THz. (Αριστερά): Η ρύθμιση της προσομοίωσης απεικόνισης, όπου οι αριθμοί είναι σε nm. (Δεξιά) Κατανομές του $|E_z|$ σε 33 THz στο επίπεδο πηγής (Top) και στο επίπεδο εικόνας (Bottom) (Πηγή: Επανεκτύπωση με άδεια από τους Silveirinha et al.[8] Copyright (2007) by the American Physical Society)

Ένα άλλο ενδιαφέρον παράδειγμα προτάθηκε από τους Fang et al. [9]. Ένα αντικείμενο "NANO" με γραμμικό εύρος 40 nm απεικονίστηκε από superlens. Το αντικείμενο απεικονίστηκε σαφώς ακόμα και όταν το εισερχόμενο κύμα είχε μήκος κύματος 365 nm, πράγμα που σημαίνει ότι έχει ληφθεί ανάλυση εικόνας $\lambda / 9$.

1.2.2.2 Εφαρμογές σε κυκλώματα

Λόγω των μικρών διαστάσεων των SRR (Split Ring Resonators- δακτυλίων συντονισμού διαχωρισμού) και των συμπληρωματικών δακτυλίων συντονισμού διαχωρισμού (CSRRs, ένα διπλό SRR εναλλάσσοντας το μέταλλο και τον αέρα) σε σχέση με το μήκος κύματος του σήματος στη συχνότητα συντονισμού τους, οι γραμμές μετάδοσης με βάση SRR και CSRR είναι χρήσιμες για τη μικρογράφηση της συσκευής. Γίνονται εφαρμογές σε παθητικά στοιχεία μικροκυμάτων όπως σε μετατροπείς σύνθετης αντίστασης, διαιρέτες ισχύος, συζεύκτες και φίλτρα. Τα SRRs είναι επίσης χρήσιμα σωματίδια σε πολλές άλλες εφαρμογές, όπως μαγνητικά επαγωγικά και ηλεκτροεπαγωγικά κύματα και σε επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα επιφάνειες.

1.2.2.3 Εφαρμογές κεραιών

Πρόσφατα, οι ερευνητές πρότειναν ορισμένες μεθόδους για να αποκτήσουν μικροσκοπικές κεραιές κατασκευασμένες από ιδανικά ομογενοποιημένα μεταϋλικά. Ο πρώτος σχεδιασμός κεραιάς μήκους κύματος πέραν του ορίου περίθλασης με μεταϋλικά, για την περίπτωση των διπολικών και μονοπολικών θερμαντικών σωμάτων, προτάθηκε από την ομάδα του Ziolkowski [10]. Ο βασικός σχεδιασμός αποτελείται από ένα ηλεκτρικά βραχύ ηλεκτρικό δίπολο (ή μονόπολο) που περιβάλλεται από ένα σφαιρικό κέλυφος διπλά αρνητικό (DNG) ή εpsilon αρνητικό (ENG), με ηλεκτρικά μικρή ακτίνα. Ο συμπαγής συντονισμός προκύπτει στη διεπιφάνεια μεταξύ του περιβλήματος DNG (ή ENG) και του ελεύθερου χώρου. Παρόμοιες ιδέες έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση κεραιών patch[11,12] και κεραιών διαρροής[13].

1.2.2.4 Μανδύας αορατότητας (Cloaking)

1.2.2.4.1 Τι είναι το cloaking και η αορατότητα

Τι είναι ένας ηλεκτρομαγνητικός μανδύας; Πρόκειται για μια επινόηση που κάνει ένα αντικείμενο «αόρατο» για τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες, σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων. Φυσικά, οι πιο συναρπαστικές εφαρμογές του είναι αυτές οι οποίες το επιτυγχάνουν στο ορατό τμήμα του φάσματος. Ένα αντικείμενο είναι αόρατο όταν δεν αντανακλά κύματα πίσω στην πηγή και, επιπλέον, δεν διασπείρει κύματα προς άλλες κατευθύνσεις, και δεν δημιουργεί καμία σκιά (το τελευταίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει διασπορά με κατεύθυνση προς τα εμπρός). Από αυτές τις συνθήκες προκύπτει ότι το αντικείμενο δεν θα πρέπει να απορροφά οποιαδήποτε ενέργεια. Με άλλα λόγια, το αντικείμενο δεν πρέπει να διαταράξει τα υφιστάμενα πεδία έξω από αυτό. Κατά τη θεωρία της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (συμπεριλαμβανομένου του φωτισμού), η δημιουργία

"μανδύα" για ένα αντικείμενο σημαίνει τη μείωση της συνολικής διατομής σκέδασης του (SCS), στο μηδέν, αφού η συνολική διατομή σκέδασης ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής σκεδαζόμενης ισχύος προς την πυκνότητα ισχύος. Το cloaking δεν πρέπει να συγχέεται με την τεχνολογία stealth. Οι τεχνολογίες Stealth ελαχιστοποιούν την ισχύ που ανακλάται πίσω στο ραντάρ ανίχνευσης (διατομή backscattering ή "διατομή ραντάρ"). Αυτό μπορεί να γίνει είτε με την κάλυψη ενός αντικειμένου με ένα στρώμα απορρόφησης, ή με τη διαμόρφωση του αντικειμένου, έτσι ώστε το πεδίο σκέδασης στην κατεύθυνση του φωτισμού να είναι ελάχιστο. Προφανώς, ακόμη και ένα ιδανικό αεροσκάφος stealth είναι ορατό, αν παρατηρείται από τα πλάγια ή από πίσω. Μπορεί να αποδειχθεί ότι τα απορροφητικά καλύμματα και η διαμόρφωση του αντικειμένου δεν μπορούν να μειώσουν τη συνολική διατομή σκέδασης πάνω από 50%. Η έννοια της αορατότητας έχει στενή σχέση με το cloaking στην πρόσφατη βιβλιογραφία. Μερικές δομές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως μανδύες, αν το αντικείμενο που πρέπει να γίνει αόρατο τοποθετείται σε έναν κοίλο θάλαμο με τέλεια αγωγή τοιχώματα, αφού μέσα σε αυτό το περιβλήμα δεν υπάρχουν πεδία.

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν αρκετές μείζονες προσεγγίσεις που καθιστούν τα αντικείμενα αόρατα. Για παράδειγμα, οι Alu και Engheta [14] πρότειναν να χρησιμοποιήσουν πλασμονικές επικαλύψεις για να ακυρώσουν τη διπολική σκέδαση. Αλλά αυτή η τεχνική περιορίζεται στην υποκυματική κλίμακα του αντικειμένου και η επικάλυψη εξαρτάται από τις παραμέτρους γεωμετρίας και υλικού του αντικειμένου. Οι Milton και Nicoronici [15] ανακάλυψαν ότι με τη χρήση ενός μεταλλικού επιχρίσματος θα μπορούσαν να καλύπτονται πολώσιμα δίπολα γραμμής. Αλλά η επικάλυψη επηρεάζεται από τα αντικείμενα που βρίσκονται μέσα. Ο Leonhardt [16] και ανεξάρτητα οι Pendry, Schurig και Smith [17] ανακάλυψαν ένα μηχανισμό μετασχηματισμού συντεταγμένων για ηλεκτρομαγνητική κάλυψη. Ο μηχανισμός τους ήταν αρκετά παρόμοιος με αυτόν που οι Greenleaf et al. [18,19] εισηγήθηκαν για αγωγιμότητα. Η βασική τους ιδέα είναι να καθοδηγήσουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα γύρω από την περιβάλλουσα περιοχή και πολλές εργασίες αργότερα υιοθέτησαν αυτήν την τεχνική.

Τον Μάιο του 2006, οι πρώτες πλήρεις αριθμητικές προσομοιώσεις πλήρους κύματος σε κυλινδρικό μανδύα πραγματοποιήθηκαν από τους Cummer et al. [20]. Λίγους μήνες αργότερα, το πρώτο πείραμα ενός τέτοιου μανδύα σε συχνότητες μικροκυμάτων έγινε με επιτυχία από τον Schurig et al. [21], όπου μετρήθηκε ο μανδύας που περιβάλλει έναν κύλινδρο Cu με ακτίνα 25 mm.

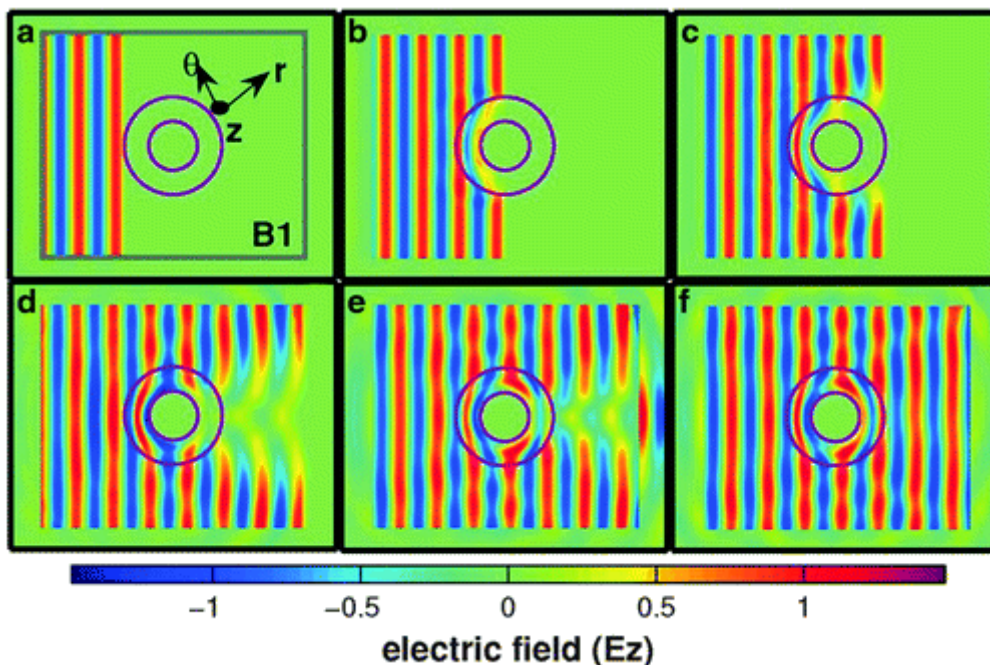
Μετά το 2006, πολυάριθμες μελέτες έχουν αφιερωθεί στην κάλυψη με μανδύα, εμπνευσμένες κυρίως από τις εργασίες [20,21]. Για παράδειγμα, το 2008, οι Liang et al. [22] πραγματοποίησαν προσομοίωση εξαρτώμενη από το χρόνο, για τον κυλινδρικό μανδύα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένης διαφοράς χρόνου. Η προσομοίωση τους (πρβλ. Σχήμα 1.3) δείχνει σαφώς τη δυναμική διαδικασία του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στη δομή του cloaking. Το σχήμα 1.3 προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους ρυθμούς με πολωμένο E, με στοιχεία

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

διαπερατότητας και επιτρεπτότητας ϵ_z , μ_r και μ_θ ικανοποιώντας τη Λορεντζιανή συνάρτηση διασποράς

$$f_j(\omega) = \omega^2_p / (\omega^2_{aj} - \omega^2 - j\omega\gamma) \quad (6)$$

όπου $j = z, r, \theta$. Η εγκατάσταση του συστήματος cloaking φαίνεται στο σχήμα 1.3 με R_1 και $R_2 = 2R_1$ ως εσωτερική και εξωτερική κυλινδρική ακτίνα της δομής του μανδύα. Ένα τέλειο κέλυφος ηλεκτρικού αγωγού τοποθετείται στην εσωτερική επιφάνεια της δομής. Ένα επίπεδο κύμα με συχνότητα ω_0 κινείται από την αριστερή πλευρά προς τη δομή του cloaking, η οποία περιβάλλεται από τον ελεύθερο χώρο. Όπως μπορούμε να δούμε, το φαινόμενο cloaking δημιουργείται βήμα προς βήμα. Τέλος, το πεδίο φτάνει στη σταθερή κατάσταση που φαίνεται στο σχήμα 1.3f, το οποίο δείχνει σαφώς ότι το μοτίβο επιπέδου κύματος ανασυστήνεται αφού το κύμα περνάει μέσα από τη δομή του cloaking.



Σχήμα 1.3: Προσομοίωση εξαρτώμενη από το χρόνο για τον κυλινδρικό μανδύα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένης διαφοράς χρόνου. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικούς χρόνους: (a) $t = 2.28T$; (b) $t = 3.60T$. (c) $t = 4.92T$. (d) $t = 7.20T$. (e) $t = 9.00T$. (στ) Σταθερή κατάσταση. T είναι η περίοδος του προσπίπτοντος κύματος (Αναδημοσίευση με άδεια από τους Liang et al.[22], 1978. Copyright (2008), Αμερικανικό Ινστιτούτο Φυσικής)

1.2.2.4.2 Συμπεράσματα

Το cloaking και η αορατότητα έχουν, τα τελευταία χρόνια, γίνει πραγματικότητα και όχι φαντασία, μετά την ανακάλυψη και την υλοποίηση των διαφόρων τύπων μεταλλικών και πλασμονικών υλικών. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές για

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

να επιτευχθεί cloaking από ηλεκτρομαγνητικά ή ακουστικά κύματα, και όλες αυτές οι τεχνικές έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, σε σύγκριση με τις άλλες. Επί του παρόντος, η σχετική έρευνα για το cloaking αποσκοπεί στο να επεκτείνει το εφικτό εύρος ζώνης, όπου η αφάνεια αυθαίρετων ή συγκεκριμένων αντικειμένων μπορεί να επιτευχθεί, καθώς και να επεκτείνει την κατασκευή τέτοιων συσκευών στο οπτικό φάσμα συχνοτήτων. Υπάρχουν ορισμένοι θεμελιώδεις περιορισμοί στην απόκρυψη, ειδικά με παθητικές συσκευές, ωστόσο πρόσφατα έχουν υλοποιηθεί συσκευές που παρουσιάζουν πραγματική απόκρυψη, παρ' όλο που δεν είναι τέλειες.

Η αορατότητα είναι από καιρό όνειρο των ανθρώπων. Οι συσκευές Cloaking είναι προηγμένες τεχνολογίες stealth που βρίσκονται ακόμα σε εξέλιξη και που μπορούν να κάνουν τα αντικείμενα εν μέρει ή εντελώς αόρατα, σε μερικά τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

1.2.2.5 Βιοαισθητήρες

Ένα άλλο πιθανό πεδίο εφαρμογής των μεταϋλικών είναι οι βιοαισθητήρες. Οι συμβατικοί βιοαισθητήρες (όπως αυτοί που βασίζονται στην ηλεκτρομηχανική μεταγωγή, τον φθορισμό, τα νανοϋλικά και τον επιφανειακό συντονισμό των πλασμονίων) συχνά περιλαμβάνουν προετοιμασία δειγμάτων έντασης εργασίας και πολύ εξελιγμένο εξοπλισμό.

Τα τελευταία χρόνια οι ερευνητές πρότειναν να χρησιμοποιήσουν τα μεταϋλικά ως υποψήφια για ανίχνευση πολύ ευαίσθητων χημικών, βιοχημικών και βιολογικών αναλυτών. Για παράδειγμα, οι Lee et al. [23] μελέτησαν τη δυνατότητα χρήσης διαχωριστικών δακτυλίων συντονισμού (SRRs) για βιοαισθητήρες. Η βασική αρχή στηρίζεται στο γεγονός ότι το SRR μπορεί να θεωρηθεί ως ένα απλό κύκλωμα LC με συχνότητα απόκρισης

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC} \quad (7)$$

το οποίο δείχνει ότι η συχνότητα συντονισμού ποικίλει ως προς τις μεταβολές στην επαγωγή L και / ή την χωρητικότητα C. Επομένως η συχνότητα συντονισμού του SRR πρέπει να μετατοπίζεται πριν και μετά την εισαγωγή των βιοϋλικών

Πρόσφατα τα μεταϋλικά επιφάνειας προτάθηκαν να χρησιμεύσουν ως αισθητήρες λεπτού υμενίου από τον O'Hara et al. [24]. Διαπίστωσαν ότι μια συντονισμένη απόκριση συχνότητας μπορεί να επιτευχθεί μέσω σχεδίων μεταϋλικών. Αν και ο σχεδιασμός των μεταλλικών υλικών τους μπορεί να ανιχνεύσει μόνο λεπτές μεμβράνες με πάχος μικρότερο από 100 nm, η εργασία τους παρουσιάζει πολλά υποσχόμενη προοπτική για την τεχνολογία ανίχνευσης THz.

1.2.2.6 Ανίχνευση σωματιδίων

Είναι γνωστό ότι όταν φορτισμένα σωματίδια κινούνται σε ένα μέσο με ταχύτητα μεγαλύτερη από c/n (η ταχύτητα φάσης του φωτός στο μέσο), εκπέμπεται η ακτινοβολία Cherenkov (CR). Θυμηθείτε ότι c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και το n είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου. Ένα παράδειγμα της CR είναι η μπλε λάμψη που υπάρχει σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα. Συσκευές ευαίσθητες στην ακτινοβολία Cherenkov, που ονομάζονται ανιχνευτές Cherenkov, έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την ανίχνευση ταχέως κινούμενων φορτισμένων σωματιδίων και τη μέτρηση της έντασης των αντιδράσεων κλπ.

Δεδομένου ότι τα πρόσφατα κατασκευασμένα μεταλλικά έχουν αρνητικό δείκτη διάθλασης, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα το λεγόμενο αντίστροφο CR, το φαινόμενο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση των ανιχνευτών Cherenkov. Ο λόγος είναι ότι σε ένα συμβατικό διηλεκτρικό μέσο, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με τα σωματίδια, πράγμα που παρεμποδίζει την ανίχνευση αυτών των φωτονίων. Ωστόσο, στα μεταλλικά, τα φωτόνια και τα φορτισμένα σωματίδια κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις, έτσι ώστε να μειώνεται η φυσική τους παρεμβολή. Αν και έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος κατά την τελευταία δεκαετία στη θεωρητική, αριθμητική και πειραματική μελέτη της αντιστροφής CR, πρέπει να επιλυθούν πολλά σημαντικά ζητήματα προτού τεθεί σε εφαρμογή η αντίστροφη ακτινοβολία Cherenkov. Δεδομένου ότι η ένταση του CR αυξάνεται με τη συχνότητα, το οπτικό ή το υπεριώδες φάσμα είναι πιο χρήσιμο για την ανίχνευση. Ωστόσο, οι τεχνικές κατασκευής για τη δημιουργία μεταλλικών χαμηλής απώλειας σε οπτικές ή υπεριώδεις συχνότητες είναι πολύ λιγότερο ώριμες.[25]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 :Φωτονικοί κρύσταλλοι

2.1

Εισαγωγή στους φωτονικούς κρυστάλλους

Όπως έχουμε δει το βασικό πεδίο ενδιαφέροντος αναφορικά με τα μεταϋλικά είναι οι ιδιαίτερες οπτικές τους ιδιότητες, ο τρόπος δηλαδή με τον οποίο αλληλεπιδρούν με το φως. Τη βασική αυτή ιδιότητα εμφανίζουν με τρόπο διαφορετικό οι λεγόμενοι φωτονικοί κρύσταλλοι

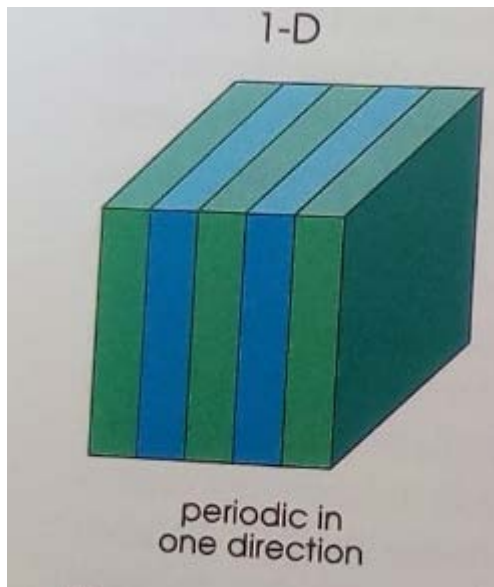
Ως κρύσταλλος χαρακτηρίζεται μια περιοδική διάταξη από άτομα ή μόρια και ως εκ τούτου ένα κρυσταλλικό πλέγμα προκύπτει από μια μικρή βασική δομή από άτομα ή μόρια που επαναλαμβάνεται στο χώρο. Επομένως οι κρύσταλλοι εμφανίζουν μια περιοδικότητα, η οποία επιδρά στον τρόπο που ένα ηλεκτρόνιο διαδίδεται μέσα στο πλέγμα αυτό και τελικά η γεωμετρία του κρυστάλλου καθορίζει πολλές από τις επαγωγικές του ιδιότητες.[26,27]

Συγκεκριμένα το πλέγμα μπορεί να δημιουργεί χάσματα μέσα στη δομή της ενεργειακής ζώνης του κρυστάλλου, με τρόπο τέτοιο που τα ηλεκτρόνια να μην μπορούν να κινηθούν με συγκεκριμένες ενέργειες σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Εάν το δυναμικό πλέγμα είναι αρκετά δυνατό το χάσμα μπορεί να επεκταθεί σε όλες τις δυνατές κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πλήρους χάσματος ζώνης. Για παράδειγμα ένας ημιαγωγός έχει ένα πλήρες χάσμα ζωνών ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας.[26]

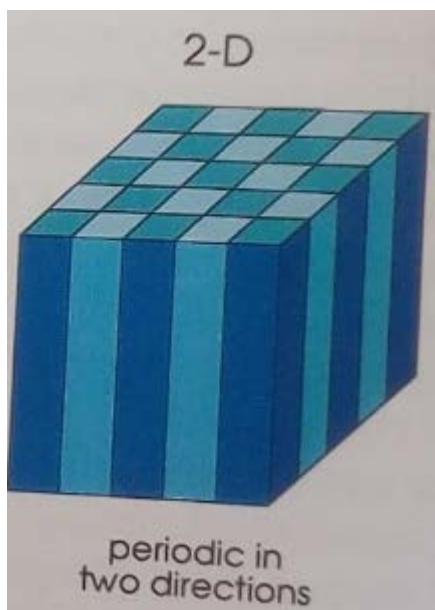
Οι φωτονικοί κρύσταλλοι συζητήθηκαν για πρώτη φορά από τον Yablonovitch το 1987, όταν πρότεινε την πλέον διάσημη αναλογία ανάμεσα σε φωτόνια και ηλεκτρόνια και συγκεκριμένα: ένα πλέγμα από ηλεκτρομαγνητικούς σκεδαστές (scatterers) μπορεί να επιδράσει στις ιδιότητες του φωτός με τον ίδιο τρόπο που επιδρούν στα κρυσταλλικά στερεά τα ηλεκτρόνια.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Οι φωτονικοί κρύσταλλοι είναι κανονικές συστοιχίες από υλικά με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Το σχήμα 2.1 δείχνει την πιο απλή περίπτωση στην οποία δύο υλικά στοιβάζονται διαδοχικά και εναλλάξ το ένα με το άλλο. Η χωρική περίοδος της στοιβάς ονομάζεται ελαστική σταθερά. Τα σχήματα 2.2 και 2.3 δείχνουν δισδιάστατους και τρισδιάστατους φωτονικούς κρυστάλλους, αντίστοιχα.

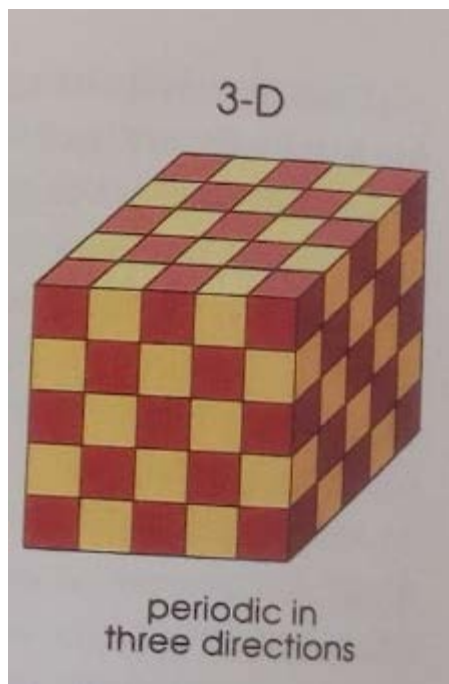


Σχήμα 2.1: Μονοδιάστατος φωτονικός κρύσταλλος περιοδικός σε μία διεύθυνση.



Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Σχήμα 2.2: Δισδιάστατος φωτονικός κρύσταλλος περιοδικός σε δύο διευθύνσεις.



Σχήμα 2.3: Τρισδιάστατος φωτονικός κρύσταλλος περιοδικός σε τρεις διευθύνσεις.

Συγκεκριμένα, όταν οι ελαστικές σταθερές είναι της τάξης των μηκών κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του φωτός και η διαθλαστική ισχύς του κάθε σκεδαστή οπτικών κυμάτων είναι μεγάλη, η διάδοση των οπτικών κυμάτων μέσα στο πλέγμα επηρεάζεται έντονα από τη δομή του φωτονικού πλέγματος. Επομένως μία λύση στο πρόβλημα του ελέγχου και οδήγησης του φωτός είναι ένα φωτονικός κρύσταλλος, ένα περιοδικό διηλεκτρικό μέσο με χαμηλές απώλειες. Μάλιστα μπορούμε να σχεδιάσουμε και να κατασκευάσουμε φωτονικούς κρυστάλλους με φωτονικά χάσματα ζωνών, αποτρέποντας το φως να διαδοθεί σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις με καθορισμένες ενέργειες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μια από τις βασικές διαφορές των φωτονικών κρυστάλλων από τους άλλους κρυστάλλους, η οποία δημιουργεί και ιδιαίτερα προβλήματα στην κατασκευή τους, είναι ότι η τάξη μεγέθους των ελαστικών σταθερών μικραίνει από την τάξη του angstrom στην τάξη των μηκών κύματος των σχετικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Οι προοπτικές των φωτονικών κρυστάλλων διαφαίνονται εάν εξετάσουμε την επίδραση της μελέτης των διηλεκτρικών σε εφαρμογές όπως ο διηλεκτρικός

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

καθρέφτης και οι μεταλλικοί κυματοδηγοί. Οι μεταλλικές κοιλότητες (metallic cavities) και οι μεταλλικοί κυματοδηγοί χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο της διάδοσης κυμάτων στις μικροκυματικές συχνότητες. Συγκεκριμένα μια μεταλλική κοιλότητα δεν επιτρέπει τη διάδοση κυμάτων εκτός μια συγκεκριμένης συχνότητας συντονισμού, ενώ ένας μεταλλικός κυματοδηγός επιτρέπει τη διάδοση μόνο σε έναν συγκεκριμένο άξονα. Πρόκειται για δύο χρήσιμες ιδιότητες που θα θέλαμε να μπορούμε να εφαρμόσουμε σε συχνότητες πέραν του μικροκυματικού φάσματος.[28]

Οι φωτονικοί κρύσταλλοι όχι μόνο μπορούν να μιμηθούν αυτές τις ιδιότητες των κοιλοτήτων και των κυματοδηγών αλλά είναι επίσης κλιμακώσιμοι και εφαρμόσιμοι σε ένα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων.

Επιπλέον, με το πέρασμα του χρόνου διαφαίνεται όλο και περισσότερο η χρησιμότητα των φωτονικών κρυστάλλων στην κατασκευή πραγματικών οπτικών συσκευών και στην περαιτέρω ανάπτυξη φωτονικών κυκλωμάτων. Από αυτή την άποψη ο περιορισμός του φωτός σε ένα «φωτονικό κελί» μπορεί να ιδωθεί ως το πρώτο βήμα για τη σχεδίαση οπτικών συσκευών της τάξης του μήκους κύματος, με εντυπωσιακές ιδιότητες όσον αφορά την αποθήκευση, το φιλτράρισμα, την οδήγηση και την εκπομπή φωτός. Ταυτόχρονα συνεπικουρεί στην τάση της εποχής για διαρκή σμίκρυνση των συσκευών και των συστημάτων, η οποία καθίσταται αναγκαία από την ανάγκη διαχείρισης ενός ολοένα αυξανόμενου αριθμού δεδομένων.[29]

Φυσικά στο προσκήνιο παραμένει και η μελέτη των βασικών θεμάτων που άπτονται του ερευνητικού ενδιαφέροντος όσον αφορά τα μεταϋλικά, όπως είναι η αρνητική διάθλαση, η απεικόνιση κάτω του μήκους κύματος (subwavelength imaging), η ενίσχυση κοντινού πεδίου και οι υπερφακοί.

Οι φωτονικοί κρύσταλλοι κατατάσσονται κυρίως σε τρεις κατηγορίες και συγκεκριμένα στους μονοδιάστατους, δισδιάστατους και τρισδιάστατους κρυστάλλους, ανάλογα με τις διαστάσεις στις οποίες εκτείνονται οι στοίβες. Αυτά τα τρία είδη δομών είναι αρκετά εμβληματικά και χρησιμοποιούνται για την μελέτη και τις εφαρμογές των φωτονικών κρυστάλλων.

Για την βασική κατανόηση των φωτονικών ζωνών και των φωτονικών χασμάτων ζωνών εξετάζονται ιδιαίτερως οι μονοδιάστατοι κρύσταλλοι, οι οποίοι είναι σχετικά εύκολοι στην κατασκευή και χρησιμοποιούνται συχνά ως μοντέλα αναφοράς. Οι μονοδιάστατοι φωτονικοί κρύσταλλοι παραδοσιακά ονομάζονται διηλεκτρικά πολυστρώματα (multilayers) και οι οπτικές τους ιδιότητες είναι αρκετά γνωστές. Εάν μάλιστα πάρουμε την περίπτωση μονοδιάστατου φωτονικού κρυστάλλου, που αποτελείται από περιοδικές στοίβες από λεπτά διηλεκτρικά στρώματα με οπτικό πάχος $\lambda/4$, καταλήγουμε σε μια διάταξη που ονομάζεται καθρέφτης Bragg.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Πρόκειται για μη τεχνητές διατάξεις με εφαρμογές σε πολλές οπτικές συσκευές. η μελέτη των οποίων κορυφώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Παρ'όλα αυτά η επάρκεια των καθρεφτών Bragg εξαρτάται πολύ από τη γωνία διάθλασης. Όταν η γωνία διάθλασης σταδιακά αυξάνει η διαθλαστικότητα μικραίνει και ο καθρέφτης τείνει να γίνει διάφανος (transparent) στο τέλος. Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι αδύνατο να επιτευχθεί ένα ομοκατευθυντικό φωτονικό χάσμα ζώνης.

Ωστόσο τα μονοδιάστατα συστήματα εμφανίζουν τρία σημαντικά φαινόμενα: φωτονικά χάσματα ζωνών, εντοπισμένους ρυθμούς και καταστάσεις επιφάνειας. Τα χάσματα ζωνών και οι περιοριστικές καταστάσεις βέβαια αφορούν μόνο μία κατεύθυνση. Παρ'όλα αυτά αυτό το απλό και παραδοσιακό σύστημα σκιαγραφεί τα περισσότερα από τα φυσικά χαρακτηριστικά των δύο άλλων και πιο περίπλοκων δομών, των δισδιάστατων και των τρισδιάστατων.

Οι δισδιάστατοι φωτονικοί κρύσταλλοι κατασκευάζονται πιο δύσκολα από τους μονοδιάστατους, αλλά παρ'όλα αυτά εμφανίζουν μέτρια πολυπλοκότητα. Είναι περιοδικοί σε δύο διαστάσεις και ομογενείς στην τρίτη. Αυτά τα συστήματα εμφανίζουν φωτονικά χάσματα ζωνών στο επίπεδο της περιοδικότητας. Ως εκ τούτου το ενδιαφέρον τους αφορά στις πιθανές εφαρμογές στα επίπεδα ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα και στα φωτονικά κυκλώματα. Υπάρχουν δύο είδη τέτοιων δομών

Το πρώτο αποτελείται από αποσυνδεδεμένους διηλεκτρικούς κυλίνδρους, ενώ το άλλο σχηματίζεται από πόρους αέρα που έχουν δημιουργηθεί μέσα σε διηλεκτρικό. Εάν μπορούσαμε να πετύχουμε τον συνεπίπεδο περιορισμό του φωτός σε μια τέτοια λεπτή πλάκα από φωτονικούς κρυστάλλους, η διάδοση του φωτός θα μπορούσε να ελεγχθεί απόλυτα σε αυτές τις δύο κατευθύνσεις. Παρ'όλα αυτά εμφανίζονται αρκετές δυσκολίες στο πώς να αποτρέψουμε το φως να διαφύγει από το επίπεδο αυτό, δηλαδή το επίπεδο των διηλεκτρικών πλακών.

Οι τρισδιάστατοι φωτονικοί κρύσταλλοι είναι περιοδικοί και στις τρεις κατευθύνσεις. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να εμφανίζει ένα πλήρες φωτονικό χάσμα ζώνης, έτσι ώστε να μην επιτρέπεται η διάδοση του φωτός σε καμία από τις τρεις κατευθύνσεις. Για αυτό αυτά τα συστήματα εμφανίζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και είναι πιο δύσκολο να μελετηθούν και να κατασκευαστούν. Δύο πολύ βασικές δομές τέτοιων συστημάτων είναι: α) το λεγόμενο Yablonovite, το οποίο ονομάστηκε έτσι από τον Yablonovitch, που το 1991 μαζί με τους συνεργάτες του διεξήγαγε ένα πρωτότυπο πείραμα σε κλίμακα εκατοστών, το οποίο εμφάνιζε πλήρες χάσμα ζωνών γύρω από τα 12 GHz. β) Η δεύτερη δομή τρισδιάστατου φωτονικού κρυστάλλου που είναι γνωστή είτε ως woodpile (σωρός από ξύλα) είτε ως layer by layer (στρώμα πλάι σε στρώμα) αποτελείται από μια πολυστρωματική

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

στοίβα, όπου κάθε στρώμα σχηματίζεται από έναν μονοδιάστατο πίνακα από διηλεκτρικές ράβδους.[28,29]

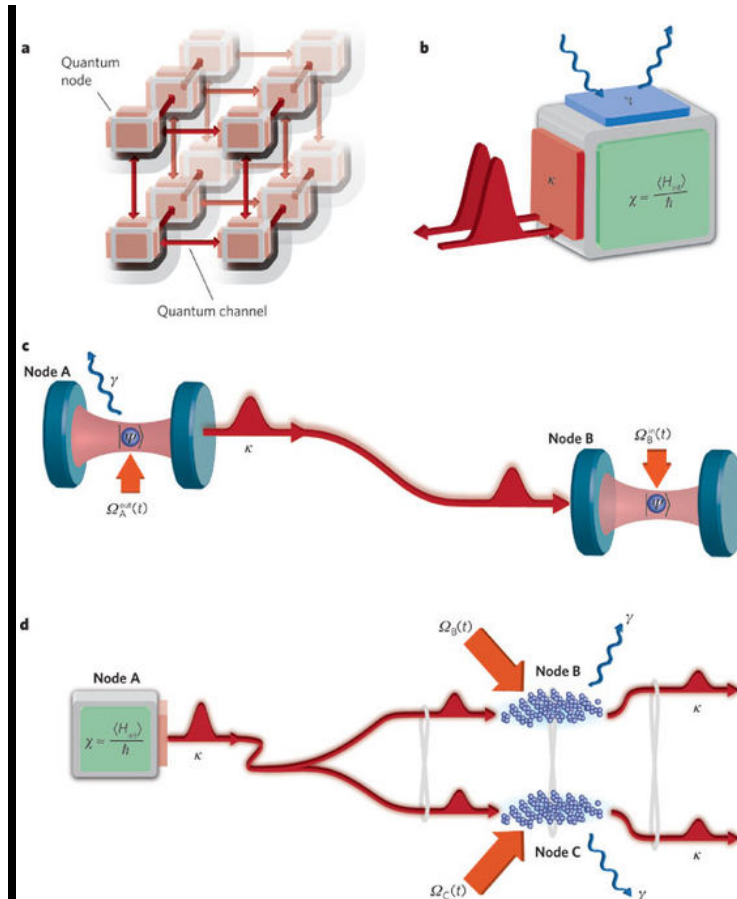
2.1.1

Έρευνα στα κβαντικά φαινόμενα και εφαρμογές.

Ένα από τα πολύ ενδιαφέροντα πεδία, στα οποία επικεντρώνεται η σύγχρονη έρευνα πάνω στους φωτονικούς κρυστάλλους, είναι αυτό της κβαντικής πληροφορικής και, συγκεκριμένα, πολύ μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν δομές συναποτελούμενες και από φωτονικούς κρυστάλλους, οι οποίες διαδραματίζουν καίριο ρόλο στον σχεδιασμό και δυνητικά στην υλοποίηση κβαντικών δικτύων και τελικά σε αυτό που οραματίζονται αρκετοί επιστήμονες ως κβαντικό διαδίκτυο.

Η κβαντική πληροφορική θέτει τις βάσεις της στην έννοια του qubit, σε αντιστοιχία με το bit που καθορίζει την έως τώρα πληροφορική, το οποίο αποτελεί μια μονάδα κβαντικής πληροφορίας. Το qubit είναι ένα κβαντικό σύστημα δύο καταστάσεων, όπως ας πούμε η πόλωση ενός μόνον φωτονίου και συγκεκριμένα η κάθετη και η οριζόντια πόλωση. Σε ένα κλασικό σύστημα ένα bit θα πρέπει να βρίσκεται σε μία κατάσταση ή στην άλλη, Ωστόσο η κβαντική μηχανική επιτρέπει στο qubit να βρίσκεται σε μια υπέρθεση και των δύο καταστάσεων ταυτοχρόνως, μια ιδιότητα θεμελιώδους σημασίας για την κβαντική πληροφορική

Σύμφωνα με τον Kimble[30] ,σε ένα κβαντικό δίκτυο η κβαντική πληροφορία παράγεται, επεξεργάζεται και αποθηκεύεται τυπικά σε κβαντικούς κόμβους. Αυτοί οι κόμβοι συνδέονται με κβαντικά κανάλια, τα οποία μεταφέρουν κβαντικές καταστάσεις από σημείο σε σημείο με υψηλή αξιοπιστία. Ως επέκταση αυτής της ιδέας μπορούμε να οραματιστούμε το κβαντικό διαδίκτυο, το οποίο με μόνο μέτριες δυνατότητες επεξεργασίας θα μπορούσε να πραγματοποιήσει εργασίες οι οποίες είναι αδύνατες στο πεδίο της κλασικής φυσικής, περιλαμβάνοντας και την διανομή κβαντικού λογισμικού.(Σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4: Κβαντικό διαδίκτυο. α) δίκτυο από κβαντικούς κόμβους συνδεδεμένους με κβαντικά κανάλια. β) κβαντικός κόμβος γ) διασύνδεση δύο κβαντικών κόμβων δ) Κβαντικά συζευγμένοι κόμβοι Β και C.

Τα βασικά κβαντομηχανικά φαινόμενα, που χρησιμοποιούνται στην κβαντική πληροφορική, είναι η υπέρθεση που αναφέραμε και πριν σε σχέση με τα qubits αλλά και η κβαντική σύζευξη (entanglement).

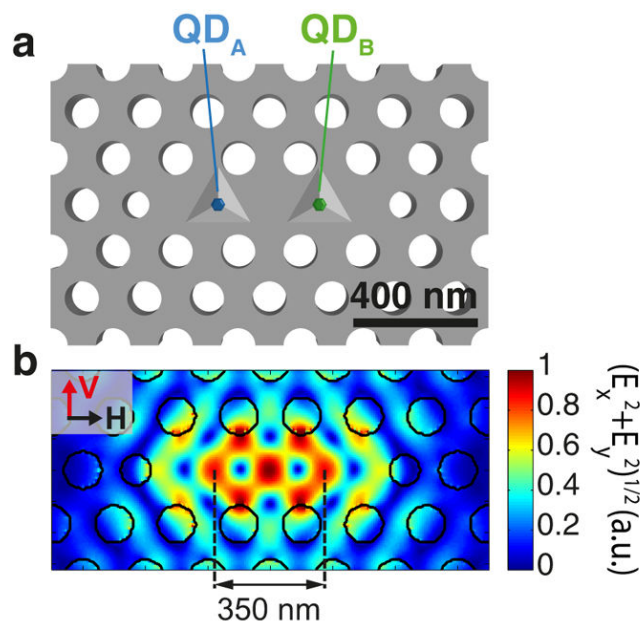
Η κβαντική σύζευξη είναι ένα φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο ζευγάρια ή ομάδες από σωματίδια παράγονται ή αλληλεπιδρούν με τρόπους τέτοιους ώστε η κβαντική κατάσταση του ενός σωματιδίου να μην μπορεί να περιγραφεί ανεξάρτητα από την κατάσταση του άλλου/άλλων, ακόμα και όταν τα σωματίδια χωρίζονται από μεγάλη απόσταση.

Πάνω σε αυτό τον οραματισμό γίνονται κάποιες προτάσεις στα πλαίσια της έρευνας για τους φωτονικούς κρυστάλλους. Για παράδειγμα ένα ζήτημα που μελετάται είναι η μετατροπή από μικροκύματα σε οπτικά φωτόνια, με ταυτόχρονη διατήρηση της σύζευξης. Μία πρόταση παρουσιάζεται από μια ομάδα επιστημόνων [31] όπου ένας ηλεκτρο- οπτικός διαμορφωτής (electro-optic modulator EOM) χρησιμοποιείται ως μια υποσχόμενη πλατφόρμα προς αυτή την κατεύθυνση.

Οι ηλεκτροοπτικοί διαμορφωτές αποτελούν ένα ουσιώδες τμήμα των σύγχρονων επικοινωνιών, επιτρέποντας τη δημιουργία των δικτύων μεγάλων αποστάσεων με χρήση οπτικών ινών, τα οποία αποτελούν τη ραχοκοκαλιά του διαδικτύου. Έτσι λοιπόν, στην προσπάθεια να υλοποιήσουμε το κβαντικό διαδίκτυο, στο οποίο ημιαγωγιμοί κβαντικοί επεξεργαστές θα συνδέονται μέσω οπτικών συνδέσεων, ένας επαρκής για τα κβαντικά δεδομένα ηλεκτροοπτικός διαμορφωτής απαιτείται για να μετατρέπει σήματα ανάμεσα στα μικροκυματικά και οπτικά πεδία συχνοτήτων, διατηρώντας παράλληλα τις κβαντικές του ιδιότητες.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μελέτες πάνω στους φωτονικούς κρυστάλλους σε συνδυασμό με τις κβαντικές τελείες (Quantum Dots, QDs), οι οποίες είναι πολύ μικρά ημιαγωγιμα σωματίδια, μεγέθους μερικών νανομέτρων, τόσο μικρά που οι οπτικές τους και οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες διαφοροποιούνται από άλλα μεγαλύτερα σωματίδια.

Οι κοιλότητες των φωτονικών κρυστάλλων και οι κβαντικές τελείες παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον στην προσπάθεια υλοποίησης κβαντικών στοιχείων, όπως οι κβαντικές μνήμες [32], αλλά και γενικότερα στην προσπάθεια προσέγγισης του κβαντικού διαδικτύου [33] ή στο πεδίο της ολοκληρωμένης κβαντικής φωτονικής. Στο άρθρο [33] παρουσιάζεται η προσπάθεια να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε με ντετερμινιστικό τρόπο συστήματα πολλαπλών κβαντικών τελειών. Η μέθοδος που εφαρμόζεται επιβάλλει οι κβαντικές τελείες να ολοκληρωθούν μέσα σε μια μεμβράνη φωτονικού κρυστάλλου. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει, κατά τους αρθρογράφους, την κλιμάκωση των τεχνολογικών ιδιοτήτων που μας ενδιαφέρουν στις κβαντικές τελείες, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η υλοποίηση ολοκληρωμένων φωτονικών συσκευών. (Σχήμα 2.5)



Σχήμα 2.5: Ντετερμινιστική ολοκλήρωση δύο πυραμιδικών QDs με τροποποιημένη κοιλότητα μεμβράνης Ph3 της L3. **(α)** Σχηματική απεικόνιση. **(β)** προσομοίωση πρότυπο της έντασης του κοντινού πεδίου του βασικού οπτικού ρυθμού. Η απόσταση μεταξύ των δύο QD (350 nm) είναι ίση με την απόσταση των λοβών του πεδίου όπως υποδεικνύεται στο σχήμα.

Στην ίδια λογική κινείται και η εργασία [34], όπου υλοποιούνται ενεργές φωτονικές νανοδομές βασισμένες σε κβαντικές τελείες, με βασικό σκοπό την κλιμάκωση (large-scale manufacturing) της παραγωγής συσκευών. Ουσιαστικά περιγράφεται η ανάπτυξη μιας μεθόδου που χρησιμοποιεί υλικά μεγάλου δείκτη διάθλασης, τα οποία εκτυπώνονται σε επίπεδο νανομέτρων και φέρουν νανοκρυστάλλους κβαντικών τελειών, για να κατασκευαστούν ενεργές φωτονικές συσκευές με υψηλή αξιοπιστία και χαμηλό κόστος, στην προσπάθεια να προωθηθεί μια νέα γενιά φωτονικών εφαρμογών.

2.1.2

Μη γραμμικότητες

Όπως έχουμε δει, η μελέτη και η έρευνα για τους φωτονικούς κρυστάλλους περιστρέφεται κυρίως γύρω από το πεδίο της φωτονικής τεχνολογίας και των φωτονικών τηλεπικοινωνιών. Μεγάλη σημασία αποδίδεται στον εν λόγω τομέα στα θέματα των μη γραμμικών φαινομένων, λόγω κυρίως της χρησιμότητας που έχουν στην μελέτη και κατασκευή τεχνολογιών laser. Επομένως είναι λογικό κομμάτι της έρευνας για τους φωτονικούς κρυστάλλους να επικεντρώνεται στις μη γραμμικότητες.

Οι μη γραμμικές φωτονικές συσκευές και ιδίως αυτές που μπορούν να κατασκευαστούν με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, είναι πολλά υποσχόμενες αναφορικά με την προσπάθεια να επιτύχουμε επεξεργασία σήματος μόνο με οπτικές συσκευές. Σε διαδικασίες που εκτελούν επιτυχή μη γραμμική μετατροπή, οι υψηλές μη γραμμικές επιδεκτικότητες είναι καίριας σημασίας για εφαρμογές σε τέτοιες φωτονικές τεχνολογίες. Η μη γραμμική οπτική επιδεκτικότητα ενός υλικού μπορεί να οριστεί αναπτύσσοντας την πόλωσή του σε μια δυναμοσειρά σε όρους του εφαρμοζόμενου οπτικού ηλεκτρικού πεδίου E.

$$P(t) = \chi^{(1)}E(t) + \chi^{(2)}EE(t) + \chi^{(3)}EEE(t) + \dots \quad (8)$$

όπου $\chi^{(1)}$ είναι η γραμμική επιδεκτικότητα. Η επιδεκτικότητα δευτέρου βαθμού $\chi^{(2)}$ περιγράφει διαδικασίες όπως η παραγωγή δεύτερης αρμονικής και η επιδεκτικότητα τρίτου βαθμού $\chi^{(3)}$ περιγράφει, για παράδειγμα, την παραγωγή

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

τρίτης αρμονικής. Η παράμετρος $\chi^{(2)}$ είναι μη μηδενική μόνο σε κεντροσυμμετρικά υλικά ενώ η παράμετρος $\chi^{(3)}$ είναι μη μηδενική σε όλα τα οπτικά υλικά, ανεξάρτητα από τη συμμετρία τους [35]

Η παραγωγή δεύτερης αρμονικής είναι μια μη γραμμική οπτική διαδικασία, κατά την οποία δύο φωτόνια με τη ίδια συχνότητα αλληλεπιδρούν με ένα μη γραμμικό υλικό, συνδυάζονται και παράγουν ένα νέο φωτόνιο με τη διπλάσια ενέργεια από τα αρχικά φωτόνια (αντιστοίχως διπλασιάζεται η συχνότητα και υποδιπλασιάζεται το μήκος κύματος), παράγεται δηλαδή μια συνιστώσα με συχνότητα διπλάσια από την αρχική. Αντίστοιχα, στην παραγωγή τρίτης αρμονικής μας ενδιαφέρει η παραγωγή και διάδοση μιας συνιστώσας με συχνότητα τριπλάσια της αρχικής.

Ένα από τα θέματα που μελετώνται είναι το λεγόμενο phase-matching (προσαρμογή φάσης), η ανάγκη, δηλαδή, όταν σε ένα μέσο διαδίδονται η αρχική μας συχνότητα μαζί με κάποια άλλη αρμονική (δεύτερη ή τρίτη ή μεγαλύτερη) να υπάρχει σταθερή διαφορά φάσης ανάμεσα στα οπτικά αυτά κύματα, γεγονός που είναι ιδιαίτερα δύσκολο κυρίως λόγω του φαινομένου της διασποράς.

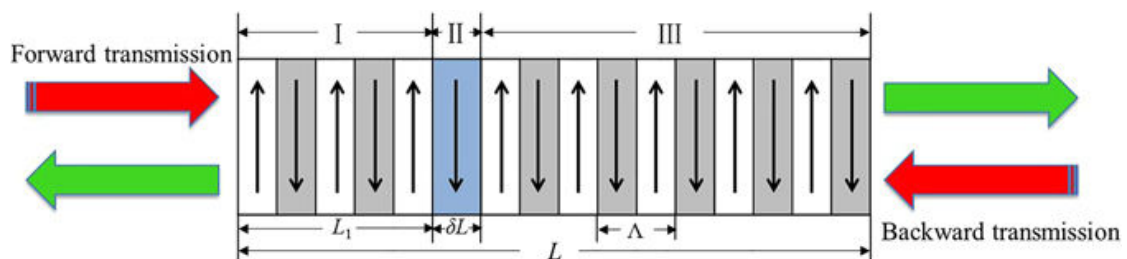
Τέτοιες μελέτες έχουν γίνει στο παρελθόν για phase-matching μεταξύ του βασικού ρυθμού που κινείται πάνω σε συμβατικό κυματοδηγό και της δεύτερης αρμονικής που κινείται πάνω σε έναν κυματοδηγό από φωτονικό κρύσταλλο.

Ένα βήμα παραπέρα πήγαν οι [35] όπου το phase-matching επιτυγχάνεται μεταξύ πρώτης και τρίτης αρμονικής, ενώ και οι δύο κινούνται ως επιφανειακά κύματα μέσα στο φωτονικό χάσμα ενός φωτονικού κρυστάλλου. Τα αποτελέσματα είναι ενδιαφέροντα (καθώς επιτυγχάνεται η ενίσχυση του πεδίου της τρίτης αρμονικής), το επιθυμητό phase-matching μεταξύ πρώτης και τρίτης αρμονικής, αλλά και η διάδοση των επιφανειακών αυτών κυμάτων σε μεγάλη απόσταση.

Αντίστοιχα η ενίσχυση των μη γραμμικοτήτων σε δομές όπου χρησιμοποιούνται φωτονικοί κρύσταλλοι μελετάται και από άλλες ομάδες. Στο [36] μελετάται μια δομή στην οποία κυριαρχεί μια κοιλότητα φωτονικού κρυστάλλου από πυρίτιο, η οποία έχει κατασκευαστεί για μετάδοση συγκεκριμένης συχνότητας, που καθορίζει τη συχνότητα των παλμών του laser που χρησιμοποιείται. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι, όταν έχουμε συντονισμό, η ενίσχυση της δεύτερης αρμονικής είναι 600 φορές μεγαλύτερη από ότι όταν αλλάζουμε τη συχνότητα του laser. Μάλιστα τα ευρήματα δείχνουν ότι αν ο φωτονικός κρύσταλλος είχε καλύτερο συντελεστή ποιότητας Q, τότε η ενίσχυση θα αυξανόταν αναλογικά με το Q^2 . Ενίσχυση προκύπτει από την αλληλεπίδραση των συντονισμένων παλμών του laser με το παροδικό πεδίο που δημιουργείται μέσα στην κοιλότητα.

Στο άρθρο [37] βλέπουμε τη μελέτη παραγωγής δεύτερης αρμονικής σε μονοδιάστατο φωτονικό κρύσταλλο με μια θέση κενή (στη διαδοχή των στοιβών

που αποτελούν το κρυσταλλικό πλέγμα), όπου μελετάται η μη αμοιβαία συμπεριφορά των πεδίων που παράγονται, καθώς η παραγωγή δεύτερης αρμονικής γίνεται και στις δύο κατευθύνσεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6. Τα αποτελέσματα μελετώνται με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους, καθώς και με προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα αυτά εμφανίζουν ενδιαφέρον, καθώς στοιχεία της δομής των φωτονικών κρυστάλλων, όπως το μήκος τους, το πλάτος της ατέλειας και το εισερχόμενο κύμα είναι οι παράγοντες που τελικά επηρεάζουν και καθορίζουν τον υπολογισμό των πεδίων που μας ενδιαφέρουν. Σχετικές εφαρμογές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της έρευνας είναι διάφορες οπτικές συσκευές, όπως μια καθ' όλα οπτική δίοδος, ένας οπτικός απομονωτής κ.α.



Σχήμα 2.6: Μια σχηματική απεικόνιση των διαδικασιών SHG (Second Harmonic Generation) προς τα εμπρός και προς τα πίσω σε ένα 1D μη γραμμικό φωτονικό κρύσταλλο με ενσωματωμένο ελάττωμα.

Ταυτόχρονα στο [38] επιτυγχάνεται η παραγωγή δευτέρων αρμονικών για πρώτη φορά στο πεδίο της A υπεριώδους ακτινοβολίας και συγκεκριμένα στα 306 με 334.5 νανόμετρα, χρησιμοποιώντας έναν φωτονικό κρύσταλλο κατασκευασμένο στο εργαστήριο .

Γενικότερα παρατηρούμε ότι οι φωτονικοί κρύσταλλοι με τις ιδιαίτερες ιδιότητες τους, όσον αφορά τη διάδοση του φωτός, αλλά και την ενίσχυση συγκεκριμένων συχνοτήτων μέσα στις κοιλότητές τους, διαδραματίζουν καίριο ρόλο για την ανάπτυξη καινούριων τεχνολογιών.

2.1.3

Φωτονική και τηλεπικοινωνίες

Η ιδιότητα των κοιλότητων των φωτονικών κρυστάλλων να συντονίζονται σε συγκεκριμένες συχνότητες στην περιοχή των οπτικών και εγγύς υπερέρυθρων (near infrared) συχνοτήτων, καθιστά την έρευνα πάνω σε αυτούς ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Πολλές ομάδες επιστημόνων μελετούν τις ιδιότητες διαφόρων δομών βασισμένων σε φωτονικούς κρυστάλλους, σε σχέση με το πώς συντονίζονται σε διάφορες διεγέρσεις (σήματα εισόδου), καθώς και τις ιδιότητες που εμφανίζουν

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

αναφορικά με κλασικές έννοιες της οπτικής και της κυματικής, όπως οι απώλειες, οι ανακλάσεις και ο συντονισμός. Απώτερος σκοπός αυτών των ερευνών είναι η δημιουργία νέων οπτικών διακοπών ή αισθητήρων, φίλτρων, αλλά και οπτομηχανικών συσκευών.

Οπτομηχανική είναι ένας υποτομέας της φυσικής που περιλαμβάνει την μελέτη της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με μηχανικά συστήματα, μέσω της ηλεκτρομαγνητικής πίεσης (radiative pressure). Μεγάλη σημασία στην οπτομηχανική παίζει η λεγόμενη οπτομηχανική κοιλοτήτων, που αποτελεί έναν κλάδο της φυσικής, ο οποίος επικεντρώνεται στην διάδραση μεταξύ φωτός και μηχανικών αντικειμένων, σε χαμηλής ενέργειας κλίμακες. Καταλαβαίνουμε, επομένως, πως οι φωτονικοί κρύσταλλοι με τις κοιλοτήτες τους μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στους κλάδους αυτούς της φυσικής.

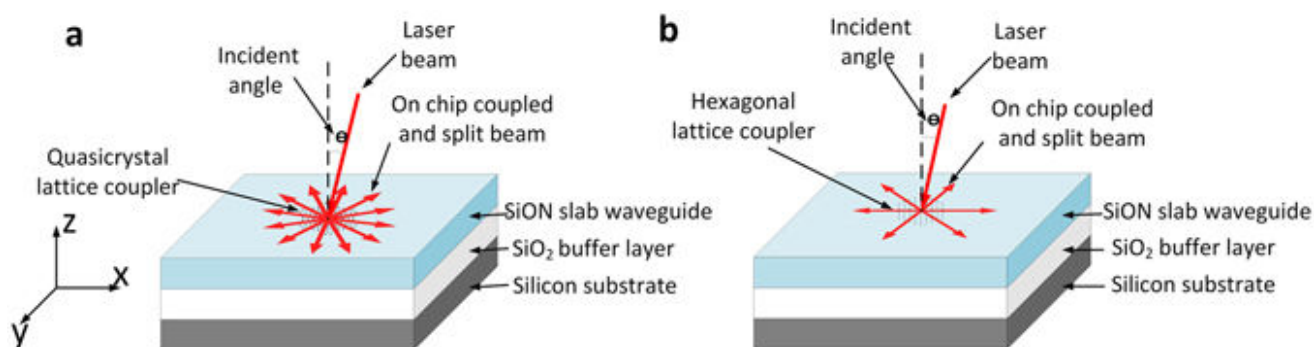
Λόγω της φύσης των φωτονικών κρυστάλλων η έρευνα σχετικά με τις ιδιότητες τους και τις πιθανές εφαρμογές τους επικεντρώνεται στη δομή που θα έχει η περιοδικότητα που τους χαρακτηρίζει, αλλά και στον τρόπο, τη μέθοδο δηλαδή με βάση την οποία θα κατασκευαστεί, με γνώμονα κυρίως την κλιμακωσιμότητα.

Στην [39] βλέπουμε την προσπάθεια μιας ομάδας μελετητών να συμβιβάσουν δύο βασικές ιδιότητες των φωτονικών κυκλωμάτων σε μία δομή και συγκεκριμένα τη σύζευξη (coupling) και τον διαχωρισμό (splitting) ισχύος. Δύο διαδικασίες που παραδοσιακά γίνονται με διαφορετικές συσκευές.

Η διπλή λειτουργικότητα σε μία συσκευή συχνά είναι το ζητούμενο για ολοκληρωμένες οπτικές συσκευές. Στην εν λόγω εργασία αναφέρεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή συζευκτών που επιτελούν τη διπλή λειτουργικότητα της σύζευξης, αλλά και του διαχωρισμού, για φως 785 νανομέτρων. Η λειτουργικότητα αυτή βασίζεται σε ένα δισδιάστατο φωτονικό κρύσταλλο και έναν φωτονικό ημικρύσταλλο (quasicrystal, όπου quasi σημαίνει σχεδόν, κρύσταλλοι διατεταγμένοι, αλλά όχι περιοδικοί), δομές που χρησιμοποιούν πλέγματα και παρουσιάζουν πολύ μικρό αποτύπωμα (μικρά αντί για μίλι μέτρα για το συνδυαστικό σύστημα). Οι συσκευές αυτές ενσωματώνονται σε κυματοδηγούς χαμηλής έντασης ανάκλασης (SiON), οι οποίοι μπορούν να συνδυαστούν με κυκλώματα CMOS. Τα σημεία του πλέγματος σχηματίζονται από χαραγμένες οπές. Το μήκος κύματος των 785 νανομέτρων επιλέχθηκε για να επιτευχθεί συμβατότητα με εφαρμογές αισθητήρων. Οι συζεύκτες που βασίζονται σε περιοδικά και σχεδόν περιοδικά δισδιάστατα φωτονικά κρυσταλλικά πλέγματα παρέχουν πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα. Αρχικά καθίσταται δυνατή η σύζευξη κατά ένα μεγάλο αζιμουθιακό γωνιακό εύρος με μια συγκεκριμένη γωνία εισόδου (πρόσπτωσης) και δεύτερον το πλέγμα μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να βελτιώνεται το ταίριασμα του ρυθμού στον κυκλικά συμμετρικό Γκαουσιανό παλμό που χαρακτηρίζει την

δέσμη laser. Τρίτο και πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα ως συζεύκτες και ως διαχωριστές δέσμης. Τέλος, παρέχουν πολύ υψηλή οπτική παροχή ισχύος (throughput), καθώς οι συνεπίπεδα διαχωρισμένες δέσμες είναι πλευρικά πολυρυθμικές, όπως θα χρειαζόταν για έναν ευρύ πλευρικό κυματοδηγό. Έτσι λοιπόν, χρησιμοποιώντας αυτή την ιδιότητα, ενεργοποιούμε πολλούς συνεπίπεδους διαδιδόμενους ρυθμούς σε έναν επίπεδο κυματοδηγό.

Οι δύο αυτές λειτουργικότητες της σύζευξης και του διαχωρισμού ισχύος βασίζονται στη διάθλαση Bragg. Όταν το φως πέφτει πάνω στον φωτονικό κρύσταλλο με γωνία πρόσπτωσης θ (Σχήμα 2.7), το εισερχόμενο φως θα διαθλαστεί σε πολλούς συζευγμένους ρυθμούς. Ο μέγιστος αριθμός συζευγμένων ρυθμών εξαρτάται από την περιστροφική συμμετρία του πλέγματος του φωτονικού κρυστάλλου, όπως καθορίζεται από τον αριθμό των πρωταρχικών σημείων Bragg στο μοτίβο διάθλασης. Στο σημείο της σχεδόν κάθετης πρόσπτωσης ο διαχωρισμός είναι συμμετρικός, με εξίσου συνεπίπεδη (στο επίπεδο XY) γωνία. Διαθλασμένο φως χαμηλότερου ρυθμού παραμένει μέσα στον επίπεδο κυματοδηγό.



Σχήμα 2.7: Σχέδια της σύζευξης και διαχωρισμού φωτός σε δομές φωτονικών κρυστάλλων. (α) Κυκλικό κρυσταλλικό πλέγμα και (b) τριγωνικοί συζεύκτες / διαχωριστές πλέγματος.

Για να σχεδιάσουμε, λοιπόν, συζεύκτες από φωτονικούς κρυστάλλους για σύζευξη κάθετης πρόσπτωσης απαιτούνται δύο βασικά βήματα. Αρχικά μελετάται το μοτίβο διάθλασης (diffraction pattern) του πλέγματος για να καθοριστεί η θέση των πρωταρχικών κορυφών Bragg και δεύτερον, για να επιτύχουμε ταίριασμα συχνότητας (phase-matching). Το μοτίβο διάθλασης είναι βασικά η αναπαράσταση του αμοιβαίου χώρου (επίπεδο συχνότητας) του πλέγματος. Οι παράμετροι του πλέγματος πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε τα συνεπίπεδα στοιχεία του κυματοδιανύσματος, που ανταποκρίνονται στον ρυθμό Bloch του φωτονικού κρυστάλλου, να ταιριάζουν με την τοποθεσία των πρωταρχικών κορυφών Bragg του κυματοδηγού. Ο ρυθμός Bloch του φωτονικού κρυστάλλου εξαρτάται έντονα από το υλικό και το πάχος του επίπεδου κυματοδηγού, καθώς και από τον λόγο πλήρωσης του φωτονικού κρυστάλλου.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τις θεωρητικές προβλέψεις. Ο αριθμός των διαχωρισμένων δεσμών εξαρτάται από τη συμμετρία του πλέγματος του φωτονικού κρυστάλλου. Αλλάζοντας την ελαστική σταθερά και τη διάμετρο των τρυπών, μπορεί να επιτευχθεί ένα ταίριασμα συχνότητας ανάμεσα στο συζευγμένο φως και στο πλέγμα του φωτονικού κρυστάλλου, οδηγώντας στη δημιουργία πολλών δεσμών.

Η δομή του φωτονικού κρυστάλλου ως παράμετρος που μας επιτρέπει να επιτύχουμε επιθυμητά αποτελέσματα, με απώτερο σκοπό την κατασκευή συσκευών φαίνεται και στην εργασία των [40]. Μονοδιάστατοι φωτονικοί κρύσταλλοι μπορούν να παραχθούν για να επιτευχθεί ανάκλαση συγκεκριμένων και ευρέων περιοχών μήκους κύματος. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή είναι μια θεμελιώδης πρόκληση, καθώς επίσης και η διαφορετικότητα των περιοδικών δομών και στρωμάτων που χρειάζεται κάθε διαφορετικός φωτονικός κρύσταλλος. Μελετήθηκε ένα πλαίσιο για το σχεδιασμό φωτονικών κρυστάλλων υψηλής ανακλαστικότητας, για κάθε επιθυμητή περιοχή μηκών κύματος.

Γενικότερα οι βασικές παράμετροι των οποίων η επιλογή πρέπει να γίνει κατάλληλα για να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα, αναφορικά με την ανακλαστικότητα του φωτονικού κρυστάλλου σε μια συγκεκριμένη περιοχή μηκών κύματος, είναι ο αριθμός των στρωμάτων, καθώς και το πάχος τους.

Ο σχεδιασμός ενός ευρυζωνικού φωτονικού καθρέφτη απαιτεί μια επαρκή υπερτοποθέτηση ξεχωριστών ανακλαστών Bragg (υποκαθρεπτών). Κάθε υποκαθρέπτης ($n_s=1,2,\dots,n_i,\dots,f$) δημιουργεί ένα φωτονικό χάσμα ζώνης, το οποίο απαγορεύει την ηλεκτρομαγνητική διάδοση γύρω από την κεντρική συχνότητα ($\Lambda(n_s)$) για την οποία έχει σχεδιαστεί. Κατ' αυτόν τον τρόπο, για να ανακλάται μια ευρεία περιοχή μηκών κύματος είναι αναγκαίο να βρεθεί η κατάλληλη κατανομή από $\Lambda(n_s)$ για τους υποκαθρέπτες, ώστε να υπερτεθούν με έναν βέλτιστο τρόπο. Μια μέθοδος που προτείνεται βασίζεται στην προσέγγιση Rade για να βρεθεί κάθε κεντρικό μήκος κύματος, όπου ορίζουμε την κατανομή του ως

$$\Lambda(n_s) = \frac{a+a_1 \times n_s}{a+b_1 \times n_s}, \quad (9)$$

όπου a , a_1 και b_1 είναι άγνωστες παράμετροι. Για να βρεθούν προτείνεται το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων

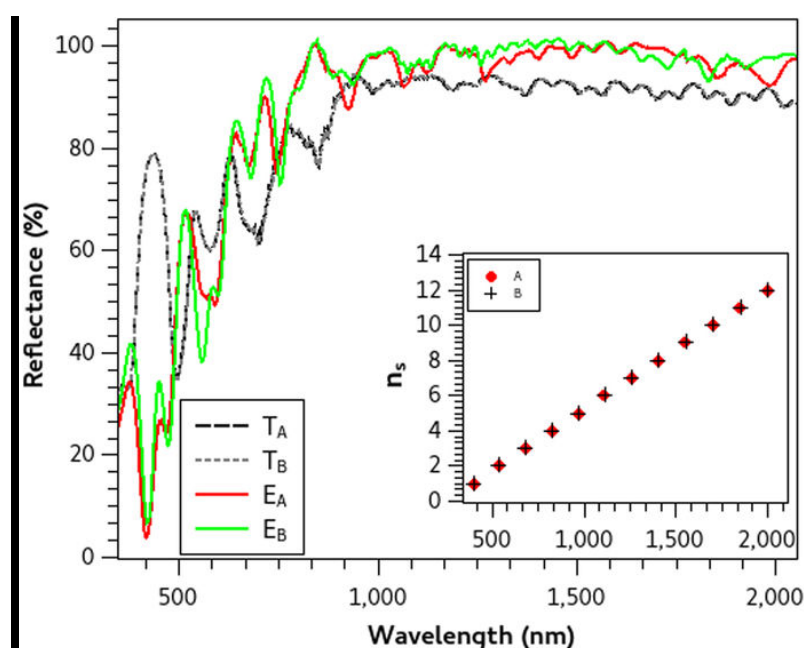
$$\Lambda(1) = \frac{a+a_1 \times 1}{a+b_1 \times 1}, \quad (10)$$

$$\Lambda(n_i) = \frac{a+a_1 \times n_i}{a+b_1 \times n_i}, \quad (11)$$

$$\Lambda(f) = \frac{a+a_1 \times f}{a+b_1 \times f} \quad (12)$$

Το κεντρικό μήκος κύματος του πρώτου $\Lambda(1)$ και τελευταίου $\Lambda(f)$ υποκαθρέπτη καθορίζουν το εύρος των ανακλώμενων μηκών κύματος και ως εκ τούτου καθορίζουν το φωτονικό χάσμα ζώνης του ευρυζωνικού καθρέπτη.

Τελικά όμως η διαδικασία βελτιστοποίησης καθορίζεται από την επιλογή της καλύτερης διάταξης πλέγματος φωτονικού κρυστάλλου, με την υψηλότερη ανακλαστικότητα στο επιλεγμένο εύρος μηκών κύματος. Ο αλγόριθμος που προτείνεται είναι υβριδικός και συμπεριλαμβάνει τρεις στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης. : 1)Random Search, 2) Particle Sum Optimization (PSO) και 3)Simulated Annealing. Χρησιμοποιεί δε έναν αριθμό N σωματιδίων με συντεταγμένες $(\Lambda(n_i), n_i, n_s)$. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται θεωρητικά (T_A, T_B) και πειραματικά (EA,EB) αποτελέσματα για εύρος μηκών κύματος 400 με 2000 nm.



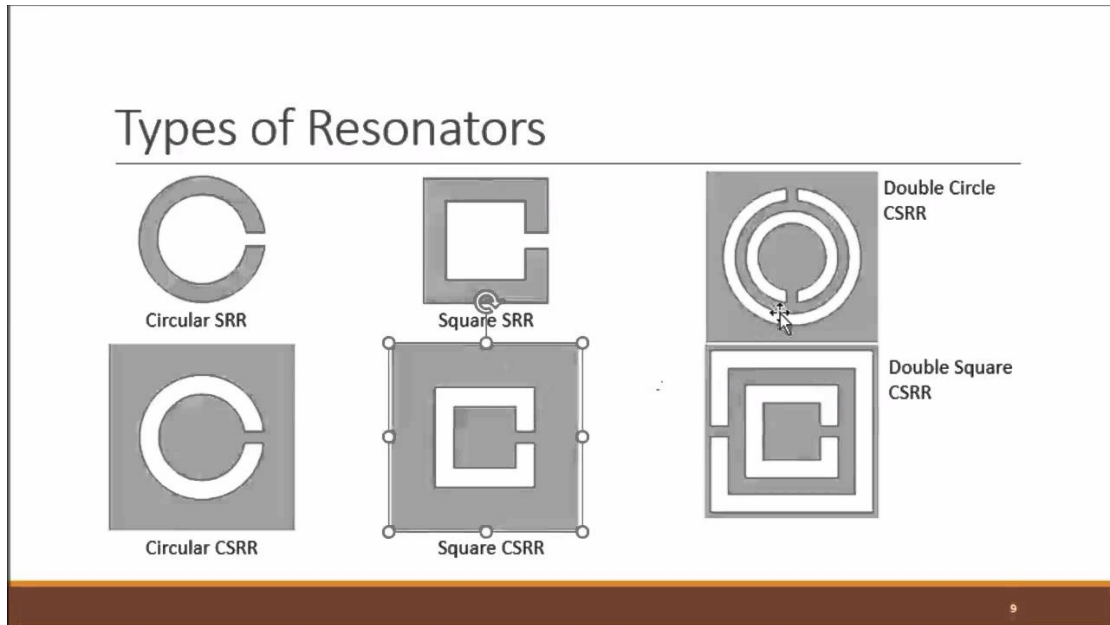
Σχήμα 2.8: Φάσματα θεωρητικών και πειραματικών αντανακλαστικών των κατόπτρων M1. Τα θεωρητικά (T_A, T_B) και πειραματικά (E_A και E_B) φάσματα ανάκλασης των ευρυζωνικών κατόπτρων A και B σχεδιασμένα έτσι ώστε να αντανακλούν από 400 έως 2000 nm. Η κεντρική κατανομή μήκους κύματος λ (n_s) (ένθετο σχήμα) λαμβάνεται από τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους.

Ο κύριος σκοπός ενός οπτικού διαμορφωτή είναι να διαμορφώνει το οπτικό σήμα διαφοροποιώντας χαρακτηριστικά της δέσμης φωτός όπως το πλάτος, τη φάση ή την πόλωση. Ο έλεγχος της δέσμης φωτός σε έναν κυματοδηγό μπορεί να είναι δυνατός με το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να οδηγεί σε μια αλλαγή του πραγματικού ή του φανταστικού μέρους του δείκτη διάθλασης του υλικού στον εν λόγω κυματοδηγό, τα οποία είναι γνωστά ως ηλεκτροδιάθλαση και

ηλεκτροαπορρόφηση, αντίστοιχα. Παρά το γεγονός ότι η αλλαγή στο φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης, που σχετίζεται με την απορρόφηση, μπορεί ευθέως να χρησιμοποιηθεί για να διαμορφωθεί η ένταση του πεδίου, η αλλαγή στο πραγματικό μέρος, που δημιουργείται με διάφορες μεθόδους, προτιμάται για τη διαμόρφωση έντασης, αναλογιζόμενοι τις εφαρμογές που σχετίζονται με τη μεταγωγή. Οι παραδοσιακές μέθοδοι όπως το φαινόμενο Pockel, το φαινόμενο Kerr και το φαινόμενο Franz-Keldysh, δεν παρέχουν αρκετά μεγάλη αλλαγή στο δείκτη διάθλασης του πυριτίου, ώστε να καταστεί εφαρμόσιμο στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Γι' αυτό χρειάζονται διαφορετικές προσεγγίσεις ώστε να χρησιμοποιηθεί το πυρίτιο σε διαμορφωτές ή μεταγωγείς.

Κατά κύριο λόγο υπάρχουν δημοφιλείς προσεγγίσεις διαθέσιμες στη βιβλιογραφία, όσον αφορά την διαμόρφωση έντασης με ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η πρώτη είναι με τη χρήση ενός συμβολόμετρου Mach-Zender (MZI), το οποίο βασίζεται στην παρεμβολή(συμβολή) των κυμάτων φωτός, η οποία μπορεί να είναι ενισχυτική ή καταστρεπτική για να μετάγουμε την ένταση στην έξοδο. Η απαραίτητη σχετική αλλαγή φάσης μεταξύ των δύο κυμάτων φωτός, που διαδίδονται μέσα στους βραχίονες του MZI, καθίσταται δυνατή μόνο με αλλαγή του δείκτη διάθλασης. Προσφάτως έχουν γίνει πολλές έρευνες πάνω στο σχεδιασμό διαμορφωτών, βασισμένες στο MZI, με δομές αλλαγής φάσης που σχεδιάστηκαν με τη χρήση παραδοσιακών pn, p-i-n διόδων ή δομών MOS και ως αποτέλεσμα επιτεύχθηκαν υψηλές ταχύτητες λειτουργίας μέχρι και τα 50 Gb/s.

Πέραν από τα πλεονεκτήματά τους, όπως οι υψηλές ταχύτητες, το ευρύ φάσμα λειτουργίας και η χαμηλή ευαισθησία στη θερμοκρασία, οι διαμορφωτές που βασίζονται σε MZI έχουν και αρκετά σοβαρά μειονεκτήματα όπως η απαίτηση για μεγάλο μήκος διάδρασης, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τις μεγάλες απώλειες, την κατάληψη μεγάλου χώρου και την υψηλή κατανάλωση ισχύος. Στην προσπάθεια να προσπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα έχει προταθεί μια άλλη προσέγγιση για την διαμόρφωση έντασης. Αυτή η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί μια δομή συντονισμού (resonance) που λειτουργεί ως ένας διαμορφωτής με διαφορετικές συνθήκες συντονισμού σε διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Οι πιο δημοφιλείς δομές για διαμόρφωση επαγωγής(συντονισμού) είναι τα ring resonators (δαχτυλίδια συντονισμού) (Σχήμα 2.9). Η μετάδοση δεσμών φωτός σε τέτοιους επαγωγείς εξαρτάται από την περίμετρο του δαχτυλιδιού και το μήκος κύματος του φωτός. Εάν η περίμετρος του δαχτυλιδιού είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του φωτός, τότε η διάδοση μειώνεται δραματικά. Αυτοί οι επαγωγείς συζευγνύονται με έναν μόνο κυματοδηγό, για να διαμορφώσουν το οπτικό σήμα. Επομένως, αφού εφαρμοστεί το ηλεκτρικό πεδίο και αλλάξει ο δείκτης διάθλασης στην περιοχή του δαχτυλιδιού μπορεί κανείς να τροποποιήσει το μήκος κύματος συντονισμού.



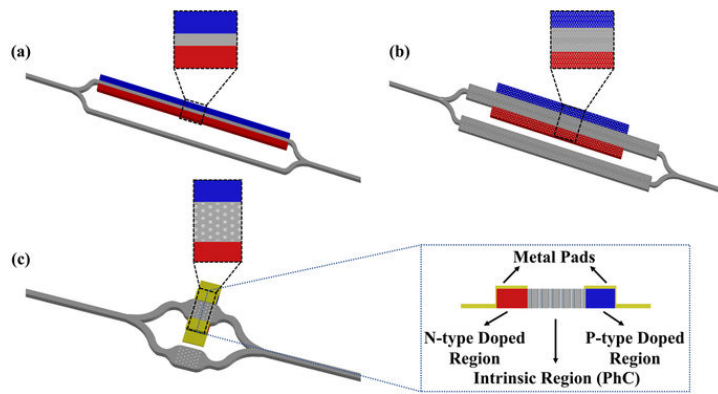
Σχήμα 2.9: Δακτύλιοι συντονισμού και συμπληρωματικοί δακτύλιοι συντονισμού.

Αντίθετα από τους βασισμένους σε MZI διαμορφωτές τα δαχτυλίδια περιορίζουν το φως έντονα, γεγονός που οδηγεί σε μικρή κατανάλωση ισχύος και σε μικρότερο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ως συνέπεια αυτού, έχουν αναφερθεί υψηλές ταχύτητες λειτουργίας (50 Gb/s) σε διαμορφωτές βασισμένους σε επαγωγείς, όταν η ακτίνα του δαχτυλιδιού είναι κοντά στα 5 μm . Για αυτούς τους διαμορφωτές η αλλαγή της τάσης που απαιτείται για διαμόρφωση υψηλής ταχύτητας είναι κοντά στα 2 Vpp. Από την άλλη, το εύρος ζώνης φάσματος λειτουργίας των ring resonators είναι αρκετά μικρό ($\sim 0.1 \text{ nm}$), γεγονός που οδηγεί σε υψηλή ευαισθησία στη θερμοκρασία και στις διαδικασίες κατασκευής. Επιπλέον, το γεγονός αυτό οδηγεί σε ένα πολύ υψηλό κόστος κατασκευής.

Στην εργασία [41] παρουσιάζεται μια δομή που προσπαθεί να παρέχει τα πλεονεκτήματα και των δύο ειδών διαμορφωτών. Το προτεινόμενο σχέδιο περιλαμβάνει έναν MZI με έναν μετατροπέα φάσης (phase shifter) από φωτονικό κρύσταλλο πάνω σε μια δίοδο p-i-n.

Συγκεκριμένα, οι δύο βραχίονες του MZI αποτελούνται από δύο πανομοιότυπους φωτονικούς κρυστάλλους. Για να χρησιμοποιηθεί ο φωτονικός κρύσταλλος ως phase shifter, ένας φωτονικός κρύσταλλος στον ένα βραχίονα τοποθετείται ανάμεσα σε μια περιοχή p νόθευσης και μία περιοχή n νόθευσης. Ως εκ τούτου, η δομή αποτελεί απλώς μια p-i-n δίοδο, η οποία λειτουργεί στην ορθή πόλωση για να αυξηθεί η συγκέντρωση ελευθέρων φορτίων στην εσωτερική περιοχή (δηλαδή τον φωτονικό κρύσταλλο), (Σχήμα 2.10)

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.



Σχήμα 2.10: Διάφορες δομές οπτικού διαμορφωτή με βάση το MZI. Οι περιοχές με μπλε (σκοτεινές) και κόκκινο (ελαφρές) αντιπροσωπεύουν τις περιοχές τύπου p και τύπου n, αντίστοιχα. **(α)** Απλό συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI) που περιλαμβάνει κυματοδηγό πυριτίου ως μεταγωγέα φάσης σε δομή διόδου p-i-n. Με την αλλαγή του δείκτη πυριτίου 0,01, το απαιτούμενο ελάχιστο μήκος αλληλεπίδρασης είναι περίπου 78 μm για μια σωστή διαδικασία διαμόρφωσης (δηλ. δημιουργώντας μια διαφορά φάσης π μεταξύ των δύο βραχιόνων του MZI, μέσω ηλεκτρικού σήματος). **(β)** MZI με κυματοδηγούς φωτονικού κρυστάλλου με ατέλειες γραμμής και στους δύο βραχίονες. Η μετατόπιση φάσης δημιουργείται μέσω της επίδρασης διασποράς στο πλάσμα με ηλεκτρικό σήμα που εφαρμόζεται στη δομή διόδου p-i-n σε ένα βραχίονα. Το μήκος του μετατοπιστή φάσης είναι 80 μm . **(γ)** Η σχηματική αναπαράσταση του προτεινόμενου σχεδιασμού που αποτελείται από ένα MZI με PhC στους βραχίονες του. Το μήκος του μετατοπιστή φάσης είναι $\sim 5 \mu\text{m}$. Ένθετο: Δομή διόδου p-i-n για ελεύθερη συσσώρευση φορέα για κυματοδηγό PhC πλάκας. Τα πεδία δεν σχεδιάζονται σε κλίμακα.

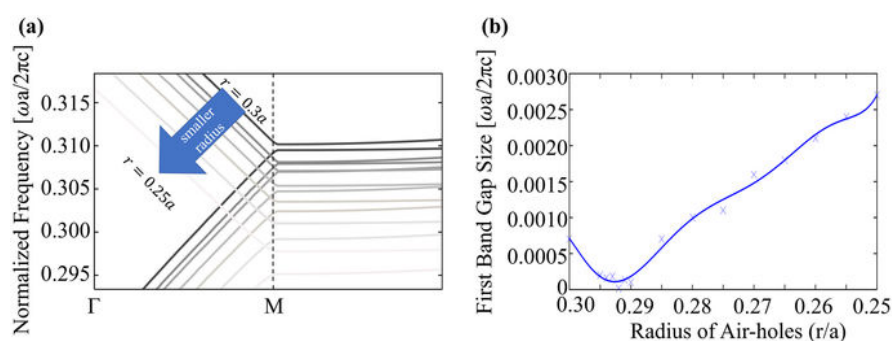
Σε αντίθεση με προηγούμενα σχήματα, το σχήμα αυτό στηρίζεται στη μετάβαση από φωτονική ζώνη σε φωτονική ζώνη για την οπτική διαμόρφωση. Με άλλα λόγια, η αλλαγή στον δείκτη διάθλασης του πυριτίου χρησιμοποιείται για να αλλάξει η δομή της φωτονικής ζώνης του φωτονικού κρυστάλλου και η μετάβαση από τη μία ζώνη στην άλλη γίνεται στη συχνότητα λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα αυτού είναι δυνατή μια πιο αποτελεσματική αλλαγή στο δείκτη διάθλασης στο επίπεδο του φωτονικού κρυστάλλου. Επίσης το μέγεθος και το πρόσημο του δείκτη διάθλασης αλλάζουν σημαντικά μεταξύ πρώτης και δεύτερης φωτονικής ζώνης. Παρά το γεγονός ότι η πληθώρα των μελετών πάνω στους φωτονικούς κρυστάλλους επικεντρώνεται στη μεγιστοποίηση του χάσματος ζώνης, ο στόχος στην εν λόγω έρευνα είναι να ελαχιστοποιηθεί το χάσμα ζωνών, καθώς η συχνότητα λειτουργίας θα αλλάζει ζώνες κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης.

Ο φωτονικός κρύσταλλος που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από ένα δισδιάστατο εξαγωνικό πλέγμα, όπου έχουν γίνει οπές αέρα, πάνω σε μια πλατφόρμα SOI (silicon on insulator). Η ακτίνα των οπών είναι $r=0.3^a$ και το πάχος της πλάκας

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

πυριτίου είναι $h=0.6^{\alpha}$, όπου η ελαστική σταθερά είναι $\alpha=0.5 \mu\text{m}$ (η κανονικοποιημένη συχνότητα των $0.322(\omega a/2\pi c)$ αντιστοιχεί στα 1550 nm .)

Ξεκινώντας από αυτόν το φωτονικό κρύσταλλο η ακτίνα των οπών βελτιστοποιήθηκε και στο σχήμα 2.11α βλέπουμε την συμπεριφορά των ζωνών για διάφορες ακτίνες. Η αναπαράσταση του χάσματος ζώνης μεταξύ πρώτης και δεύτερης φωτονικής ζώνης φαίνεται στο σχήμα 2.11b. Ως αποτέλεσμα η ιδανική ακτίνα για τον φωτονικό κρύσταλλο, για να χρησιμοποιηθεί για τη μετάβαση από ζώνη σε ζώνη που θα οδηγήσει στην αλλαγή φάσης, φαίνεται να είναι 0.292^{α} , όταν η ελαστική σταθερά καθορίζεται στα $0.4774 \mu\text{m}$ για διαμόρφωση οπτικού σήματος στα 1550nm (κανονικοποιημένη συχνότητα στα $0.3080(\omega a/2\pi c)$)



Σχήμα 2.11: (α) Δομές ταινιών (πρώτες δύο φωτονικές ταινίες) PhCs με πάχος $0.6a$ επί SOI για διάφορες τιμές ακτίνας αέρα. Τα διαγράμματα ζώνης μετατοπίζονται παρακάτω για την κατιούσα κατεύθυνση. (β) Συμπεριφορά μεγέθους διακένου ζώνης για διαφορετική ακτίνα ανοιγμάτων. Το ελάχιστο κενό εμφανίζεται όταν η ακτίνα είναι $0,292a$.

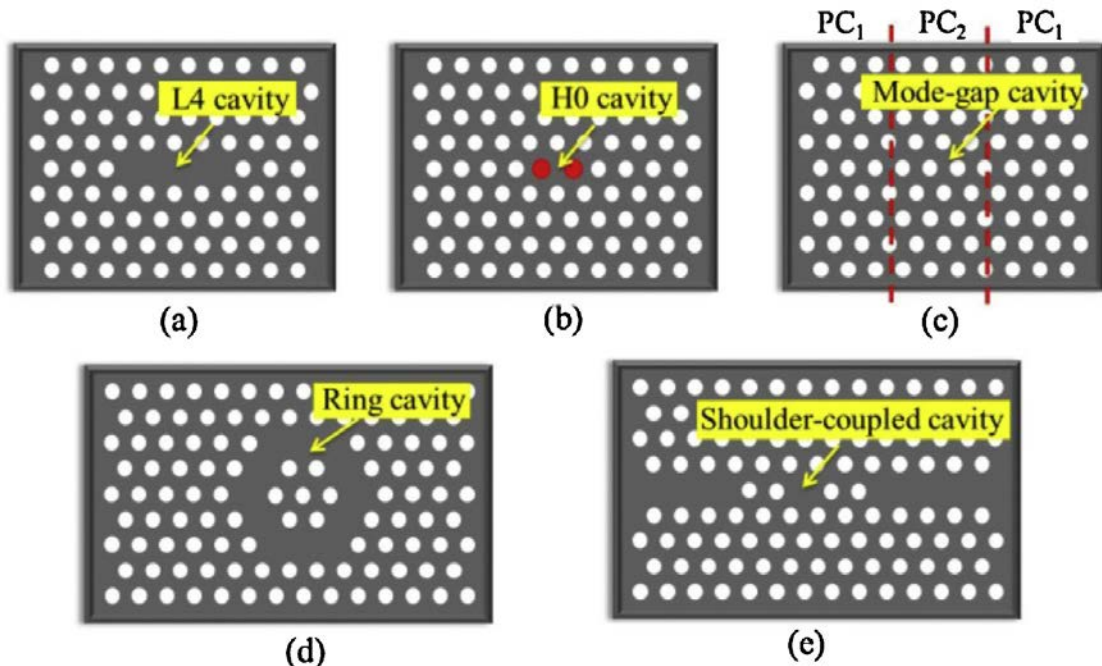
Εν τέλει παρατηρείται μείωση του μήκους διάδρασης σε λίγα μm . Ταυτόχρονα η τάση λειτουργίας για τη διαμόρφωση μειώθηκε συγκρινόμενη με προηγούμενες μελέτες και επομένως, οι οπτικές απώλειες και η κατανάλωση ισχύος κατά τις προσπάθειες για κατασκευή καθ'όλα οπτικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας.

2.1.4 Τεχνολογία αισθητήρων (Sensing)

Σύμφωνα με το [42] αισθητήρες με βάση τους PC φαίνεται να είναι πολύ πιο δημοφιλείς λόγω των πολλά υποσχόμενων χαρακτηριστικών τους όπως το εξαιρετικά συμπαγές μέγεθος, η υψηλή ευαισθησία μέτρησης, η ευελιξία στο δομικό σχεδιασμό, και το γεγονός ότι είναι κατάλληλο για μονολιθική ολοκλήρωση. Εκτός αυτού, οι αισθητήρες με βάση τους PC μπορούν επίσης να κληρονομήσουν τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά των οπτικών αισθητήρων, όπως η ασφάλεια στο εύφλεκτο

εκρηκτικό περιβάλλον, η ανοσία στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η παρακολούθηση σε μεγάλες αποστάσεις και η ταχύτητα γρήγορης απόκρισης. Ως εκ τούτου, τις τελευταίες δεκαετίες, πολλοί εξαιρετικοί οπτικοί αισθητήρες με βάση τους PC έχουν διερευνηθεί και αναπτυχθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών ανίχνευσης, όπως αισθητήρες αερίου, αισθητήρες υγρού, αισθητήρες θερμοκρασίας, αισθητήρες τάσης, αισθητήρες δείκτη διάθλασης (RI), αισθητήρες υγρασίας και βιοχημικοί αισθητήρες

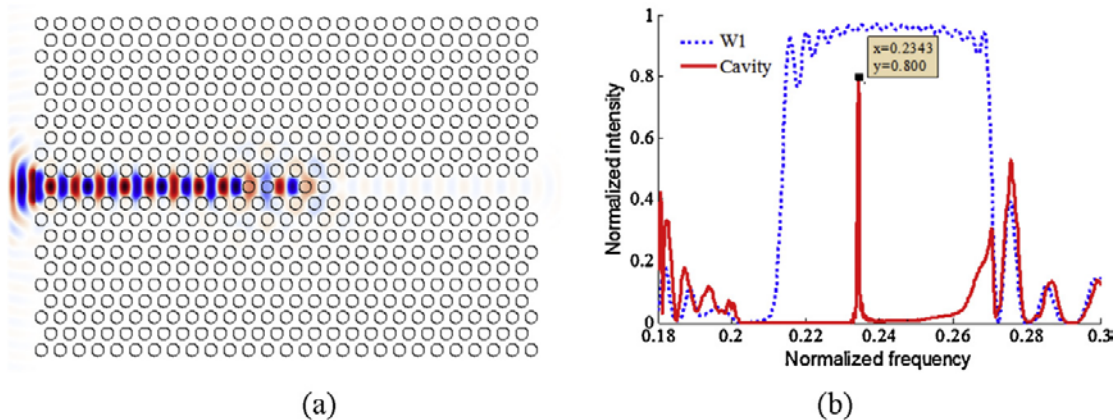
Ως τυπικός τύπος δομής, σχηματίζεται μια κοιλότητα PC (Photonic Crystal Cavity-PCC) με εισαγωγή μιας ατέλειας στα κανονικά διατεταγμένα πλέγματα. Εμφανίζει ισχυρό χωρικό και χρονικό περιορισμό φωτός και μεγάλη διάρκεια ζωής φωτονίων (δηλαδή υψηλής ποιότητας συντελεστή Q), ενισχύοντας έτσι την ένταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του οπτικού πεδίου και του υλικού της περιοχής με την ατέλεια. Όσον αφορά τις εφαρμογές αισθητήρων, το ενισχυμένο φαινόμενο αλληλεπίδρασης δημιουργεί ένα οπτικό ρυθμό PCC με ένα συντονισμένο μήκος κύματος, το οποίο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις τοπικές μεταβολές του περιβάλλοντος μέσου και κάνει το PCC ένα πολλά υποσχόμενο δομικό στοιχείο για υψηλής ευαισθησίας οπτικούς αισθητήρες. Επιπλέον, η αποτελεσματική περιοχή ανίχνευσης του PCC είναι της τάξης ενός μικρόμετρου ή μικρότερη, κάτι που παρέχει μια εξελιγμένη πλατφόρμα ανίχνευσης για επιτόπια παρακολούθηση με έξυπνο σχεδιασμό.



Σχήμα 2.12 : Σχηματική δομή του (α) L4 PCC, (b) H0 PCC, (c) PCC χάσματος λειτουργίας, (d) PCC δακτυλίου, και (e) PCC με σύζευξη κατ' ώμο.

Λαμβάνοντας σαν παράδειγμα την συζευγμένη κατ' ώμο κοιλότητα, θα εισαγάγουμε τις ιδιότητες συντονισμού και την αρχή ανίχνευσης αυτής της PCC.

Αρχικά, αναλύουμε την ιδιότητα του κυματοδηγού φωτονικού κρυστάλλου (PCW), που σχηματίζεται με την αφαίρεση της κεντρικής γραμμής οπών αέρα από τον τέλει φωτονικό κρύσταλλο κατά μήκος της κατεύθυνσης x , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12 (a), όπου a είναι η σταθερά πλέγματος, r είναι η ακτίνα της οπής αέρα, d είναι το εύρος του κυματοδηγού και h είναι το πάχος της πλάκας. Βασική του ιδιότητα είναι ότι το φως που βρίσκεται στο PBG μπορεί να οδηγηθεί μόνο στον κυματοδηγό γραμμής, καθώς το φως περιορίζεται οριζόντια από το PBG του H / Y και κάθετα με συνολική εσωτερική ανάκλαση, λόγω των διαφορών n στα διαφορετικά στρώματα. Το σχήμα 2.12 (b) δείχνει την υπολογισμένη κατανομή ηλεκτρικού πεδίου του PCW, όταν η συχνότητα λειτουργίας του φωτός μετάδοσης είναι εντοπισμένη στο PBG, το οποίο προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας το ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό του MIT MEEP. Βρίσκεται ότι το πολωμένο φως τύπου TE μπορεί να είναι έντονα περιορισμένο στην περιοχή του κυματοδηγού, τόσο στην κατεύθυνση προς τα μέσα (οριζόντια) όσο και στην κατεύθυνση προς τα έξω από το επίπεδο (κάθετα) και η διαρροή του φωτός είναι πολύ μικρή. Ωστόσο, όταν οι τέσσερις οπές αέρα εισάγονται στο κέντρο του παραπάνω κυματοδηγού για να σχηματίσουν μια κοιλότητα συζευγμένη κατ'ώμο, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του φωτός θα εντοπίζεται έντονα στο κεντρικό τμήμα του PCC, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13



Σχήμα. 2.13. (α) Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου ενός PCC που συζευγνύεται κατ'ώμο, και (β) φάσματα μετάδοσης W1 PCW και PCC με σύζευξη κατ'ώμο .

Το αναφερόμενο φάσμα μετάδοσης του W1 PCW και του PCC που συζευγνύονται παραπλήσια εμφανίζονται στο Σχήμα 2.13 (b), από το οποίο μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το PCW έχει υψηλό εύρος μετάδοσης και ευρεία κλίμακα λειτουργίας, ενώ το φάσμα μετάδοσης του PCC χαρακτηρίζεται από μια πολύ στενή καμπύλη Lorentz με συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού. Δηλαδή, μόνο η ενέργεια φωτός σε συχνότητα συντονισμού θα μπορούσε να διαρρεύσει από το κεντρικό σημείο της ατέλειας.

Αποδείχθηκε ότι η σχέση μεταξύ της κανονικοποιημένης έντασης μετάδοσης T του PCC που συζευγνύεται κατ'ώμο και των συχνοτήτων λειτουργίας ω μπορούν να εκφραστούν περίπου ως συνάρτηση Lorentz.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

$$T(\omega, \omega_0) = \frac{\frac{\omega_0^2}{2Q}}{(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\omega_0^2}{2Q}} \quad (13)$$

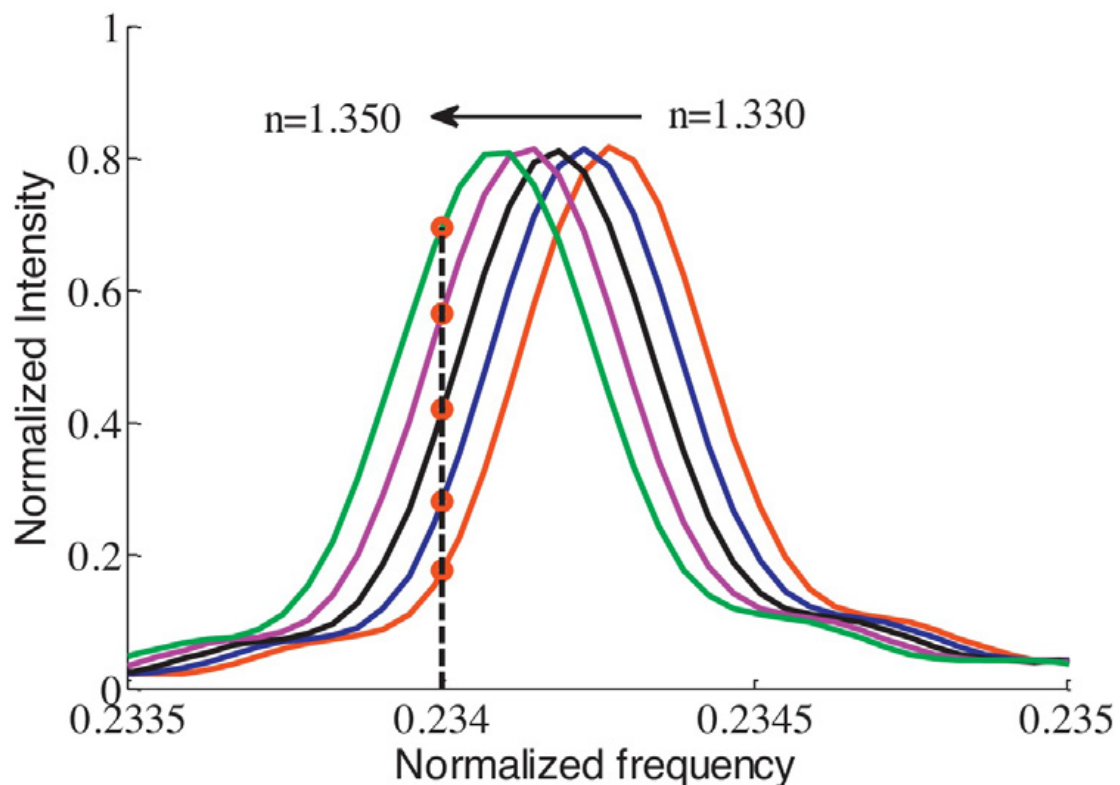
όπου ω_0 είναι η συχνότητα συντονισμού, Q είναι ο συντελεστής ποιότητας της κοιλότητας του φωτονικού κρυστάλλου, ο οποίος δίνεται από τον τύπο

$$Q = \left(\frac{1}{Q_\omega} + \frac{1}{Q_r} \right)^{-1} = \frac{Q_\omega Q_r}{Q_\omega + Q_r} \quad (14)$$

όπου Q_ω είναι η διάρκεια ζωής του φωτός για να κατέλθει από την κοιλότητα στον κυματοδηγό και Q_r είναι η διάρκεια ζωής του φωτός που εκπέμπεται από την κοιλότητα στον περιβάλλοντα αέρα. Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του ισχυρού περιορισμού πεδίου και του υψηλού συντελεστή Q του PCC, το μήκος κύματος συντονισμού του PCC είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στις διακυμάνσεις του περιβάλλοντος. Ειδικά, το μήκος κύματος συντονισμού

$$\lambda_0 \left(\lambda_0 = \frac{a}{\omega_0} \right) \quad (15)$$

του PCC θα μετατοπιστεί με την διακύμανση RI των οπών-ατελειών του PCC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Φάσματα μετάδοσης του PCC όταν αλλάζει η RI των οπών από 1.330 έως 1.350 με ένα διάστημα 0.005 .

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Όπως η κοιλότητα Fabry-Perot, η μετατόπιση του μήκους κύματος συντονισμού ικανοποιεί τη σχέση

$$\Delta\lambda_0 = S \times \Delta n \quad (16)$$

όπου το S είναι σχεδόν σταθερό όταν αλλάζει το μήκος κύματος συντονισμού κατά ένα μικρό εύρος, και παριστάνει την ευαισθησία μέτρησης του PCC αισθητήρα RI. Εάν υπάρχουν κάποιες άλλες παράμετροι, όπως βιοχημικές, μοριακές, συγκέντρωση αερίου και μηχανική επίδραση, συμβάλλουν για να αλλάξουν το RI των τρυπών που έχουν υποστεί ατέλειες και μπορούν επίσης να προκαλέσουν τη μετατόπιση του μήκους κύματος συντονισμού. Έτσι, διάφοροι υψηλής ευαισθησίας και υπερσυμπαγείς οπτικοί αισθητήρες που βασίζονται σε PCC έχουν σχεδιαστεί και προταθεί.

Επιπλέον, το όριο ανίχνευσης (C) του αισθητήρα RI με βάση το PCC μπορεί να υπολογιστεί από την ευαισθησία μέτρησης (S) και την ελάχιστη ανιχνεύσιμη μετατόπιση μήκους κύματος του PCC ($\Delta\lambda_{\min}$), και μπορεί να δοθεί από τον τύπο:

$$C = \frac{\Delta\lambda_{\min}}{S}. \quad (17)$$

Για το PCC, η σχέση μεταξύ $\Delta\lambda_{\min}$ και συντελεστή ποιότητας Q ακολουθεί:

$$\Delta\lambda_{\min} = \frac{\lambda_0}{10Q}. \quad (18)$$

Επομένως, έχουμε

$$C = \frac{\lambda_0}{10QS} \quad (19)$$

Από αυτή την εξίσωση μπορούμε να δούμε ότι η υψηλή ευαισθησία RI και ο υψηλός συντελεστής ποιότητας απαιτούνται στις PCC, για τη βελτίωση των ιδιοτήτων ανίχνευσης των αισθητήρων με βάση το PCC.

Αισθητήρες Δείκτη Διάθλασης (Refractive index sensors)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το PCC εμφανίζει ισχυρό περιορισμό πεδίου και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής φωτονίων, η οποία δημιουργεί έναν οπτικό ρυθμό με ένα μήκος κύματος συντονισμού που είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στις διαταραχές του RI, που αποδίδονται στο μέσο που διεισδύσε στις οπές αέρα του PCC, και μας επιτρέπει να αναπτύξουμε διάφορους αισθητήρες RI βασισμένους σε φωτονικούς κρυστάλλους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορούν επίσης να παρέχουν καθοδήγηση για ορισμένους άλλους αισθητήρες, όπως βιοαισθητήρες,

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

χημικούς αισθητήρες, μηχανικούς αισθητήρες και αισθητήρες αερίων, στους οποίους η αλλαγή αυτών των παραμέτρων μέτρησης μπορεί να μετατραπεί σε μεταβολές RI.

Βιοχημικός αισθητήρας (Biochemical sensor)

Καθώς η συγκέντρωση βιοχημικού δείγματος συνδέεται άμεσα με το RI της αναλυόμενης ουσίας, τώρα οι εμπορικά διαθέσιμοι αισθητήρες βιοχημικών δειγμάτων συνήθως εκμεταλλεύονται την αλλαγή του RI που προκαλείται από την αλληλεπίδραση του αναλύτη με το οπτικό πεδίο, ως τον μηχανισμό ανίχνευσης. Με αυτά τα μέσα, οι αναλυτές στόχοι μπορούν να ανιχνευθούν στο φυσικό τους περιβάλλον, χωρίς καμία τροποποίηση. Μαζί με την ανάπτυξη των βασισμένων σε PCC αισθητήρων RI, προτάθηκαν και αναπτύχθηκαν πολλοί βιοχημικοί αισθητήρες με βάση το PCC.

Αισθητήρας αερίου (Gas sensor)

Η μικροδομή περιοδικών τρυπών αέρα του PCC αποτελεί φυσικό υποψήφιο για τη συγκρότηση αναλυτών αερίων. Έτσι, το μήκος κύματος συντονισμού του PCC, καθώς και το RI της οπής αέρα, θα άλλαζαν με τη μεταβολή της συγκέντρωσης του διηθημένου αερίου ή τη μεταβολή της πίεσης του περιβάλλοντος. Αυτό είναι επίσης η αρχή μέτρησης του αισθητήρα αερίου, που βασίζεται στο PCC. Συγκρίνοντας με τον παραδοσιακό αισθητήρα οπτικού αερίου, το μέγεθος του PCC αισθητήρα αερίου θα μπορούσε να μειωθεί δραστικά.

Μηχανικός αισθητήρας (Mechanical sensor)

Η αρχή λειτουργίας του μηχανικού αισθητήρα με βάση το PCC είναι το φωτοελαστικό, το πιεζοηλεκτρικό και το ηλεκτροοπτικό φαινόμενο των υλικών που αποτελούν τη δομή PCC. Όταν ορισμένη μηχανική δράση εφαρμόζεται στο PCC, θα προκαλέσει την αποτελεσματική παραλλαγή του RI, την παραμόρφωση ή την εκτροπή της δομής PCC, η οποία θα τροποποιήσει στη συνέχεια το φάσμα μετάδοσης του PCC και έτσι θα μετατοπίσει το αντίστοιχο μήκος κύματος συντονισμού. Το ποσοστό των φασματικών αυτών μετατοπίσεων μπορεί συνεπώς να αξιοποιηθεί για τη μέτρηση της εφαρμοζόμενης μηχανικής δράσης.

Νέες κατευθύνσεις των PCCs για εφαρμογές ανίχνευσης (New directions of PCCs for sensing applications)

PCC ελεγχόμενο από υγροπτικά (Optofluidic controlled PCC)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ιδιότητες ανίχνευσης των αισθητήρων με βάση το PCC έχουν στενή σχέση με τον συντελεστή Q του PCC. Τρέχουσες μέθοδοι για να

πραγματοποιήσουμε PCC υψηλής ποιότητας συνήθως βασίζονται σε εξαιρετικά ακριβή έλεγχο του μεγέθους και της θέσης των οπών αέρα της τάξης του νανομέτρου, τα οποία είναι δύσκολο να επιτευχθούν με ακρίβεια. Ως εκ τούτου, η απαιτούμενη ακρίβεια κλίμακας νανομέτρων για την υλοποίηση εξελιγμένων και βελτιστοποιημένων δομών τελικά γίνεται ένας περιοριστικός παράγοντας για την επίτευξη PCC υψηλού συντελεστή ποιότητας Q. Εκτός αυτού, το μήκος κύματος λειτουργίας του PCC μπορεί να βρίσκεται μόνο σε μια ορισμένη τιμή και δεν μπορεί να μεταβληθεί αφού κατασκευαστεί. Η τιμή αυτή θα περιορίσει τις καταστάσεις εφαρμογής και τις περαιτέρω εξελίξεις των αισθητήρων με βάση το PCC.

Πολύ πρόσφατα έχει αναπτυχθεί ένας νέος κλάδος της φωτονικής και συγκεκριμένα στο επίπεδο της νανοφωτονικής ολοκλήρωσης με σκοπό τον χειρισμό των φωτονίων στην κλίμακα των οπτικών μηκών κύματος με υγροπτικά, για τον έλεγχο ρευστών στην κλίμακα των μικρών, η οποία ορίζει ένα σημαντικό μέρος του πεδίου υγροπτικών υπολογισμών. Εκτός αυτού, τα υγρά που έχουν διεισδύσει έχουν ένα ευρύ φάσμα δεικτών διάθλασης (από 1,33 για διαλύματα με βάση το νερό έως, 1,5 για υγρά λαδιού πυριτίου και πάνω από 1,8 για υγρά Cargille), το οποίο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στον συντονισμό των φωτονικών δομών πέρα από αυτό που είναι προσβάσιμο μέσω της διείσδυσης στερεών υλικών Παρουσιάζει συσκευών οπτορευστοειδών υπολογισμών αξιοποιούν τα χαρακτηριστικά των ρευστών για να επιτύχουν δυναμικό χειρισμό των οπτικών ιδιοτήτων και αποκαλύπτουν την υπόσχεση για την ευρεία χρήση τους. Αυτό παρέχει μια πιθανή τεχνολογία για να υλοποιηθούν αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας, και προσφέρει ένα ευέλικτο μέσο για την εγγραφή, τον συντονισμό ή τη διαμόρφωση των φωτονικών συσκευών για μια εφαρμογή.

Από αυτή την άποψη έχει αποδειχθεί ότι οι κοιλότητες φωτονικών κρυστάλλων γενικά και ειδικά μπορούν να αξιοποιηθούν επωφελώς εντός των αρχιτεκτονικών υγροπτικών υπολογισμών. Επιπλέον, τόσο η ποσότητα του υγρού όσο και η θέση της επιλεκτικά διηθημένης περιοχής μπορούν να ελεγχθούν με ακρίβεια, με τη χρήση ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος υγροπτικών υπολογισμών συνδεδεμένου επάνω στη λιθογραφική μάσκα, ενός συνεστιακού μικροσκοπίου σάρωσης με λέιζερ, εξοπλισμένου με σύστημα μικροδιήθησης ή μιας ελεγχόμενης από υπολογιστή μικροπιπέτας, της οποίας το μέγεθος είναι συγκρίσιμο με τις οπές αέρα.

Αξιοποιώντας την εγγενή ευκαμψία της διείσδυσης υγρών, τα συστήματα υγροπτικών υπολογισμών διείσδυσης όχι μόνο προσφέρουν τις δυνατότητες υλοποίησης συντονιζόμενων και επαναπροσδιορίσιμων PCC κατά βούληση, χωρίς να χρειάζεται δομική ποικιλία, αλλά και την ευελιξία για τη δημιουργία χώρου προγραμματιζόμενων PCC, σύμφωνα με τις πρακτικές απαιτήσεις. Στην περίπτωση αυτή, η διείσδυση υγρών στις οπές αέρα των συσκευών PCC έχει διερευνηθεί και αποδειχθεί δημοφιλής

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

PCC σε δομή καταρράκτη (Cascaded PCC)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αισθητήρες PCC με υψηλό συντελεστή Q και μικρό όγκο μπορούν να ενισχύσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ αναλύτη και εισερχόμενου φωτός και να βελτιώσουν την ευαισθησία στις ιδιότητες όγκου. Ωστόσο, οι περισσότεροι από αυτούς τους αισθητήρες λειτουργούν τυπικά ως αισθητήρες σημείου ή μεμονωμένοι και ο αριθμός των στόχων που μπορούν να ανιχνευθούν ταυτόχρονα είναι σχετικά μικρός. Για να ξεπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα και να υλοποιηθούν πολλαπλά αισθητήρια σημεία, έχουν αναπτυχθεί πολλές συστοιχίες αισθητήρων βασισμένες σε αλληλουχίες PCCs.

Λειτουργικές PCC με οπτική επίστρωση (Functional PCC with optical coating)

Τα τελευταία χρόνια, η απόθεση της οπτικής επίστρωσης με νανομετρικό πάχος έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει σημαντικά την ευαισθησία και την επιλεκτικότητα ενός αριθμού οπτικών συστημάτων ανίχνευσης, σε ορισμένες εξωτερικές παραμέτρους όπως ο δείκτης διάθλασης, το pH, η συγκέντρωση αερίου, η θερμοκρασία, η βιοχημική ενός μόριου και η υγρασία. Μπορούμε να προβλέψουμε ότι το εύρος εφαρμογής αισθητήρων βασισμένων σε PCC μπορεί να επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό, συνδυάζοντας οπτική επίστρωση με PCC για την υλοποίηση του λειτουργικού PCC. Εκτός αυτού, η τεχνολογία της οπτικής επίστρωσης μπορεί επίσης να βελτιώσει την ευαισθησία και την επιλεκτικότητα των οπτικών αισθητήρων με βάση το λειτουργικό PCC, με οπτική επικάλυψη.

Στο μέλλον, οι τεχνολογίες-κλειδιά των οπτικών αισθητήρων με βάση το PCC θα είναι η δυνατότητα ελέγχου, η ανάπτυξη δικτύου, η ολοκλήρωση, η καθ' όλα κατασκευή από ίνες, οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο σε ρευστό περιβάλλον, καθώς και οι διερευνήσεις νέων μηχανισμών και νέων μεθόδων.

2.1.5

Δομές Bragg

Τεχνολογίες βασισμένες σε καθρέφτες Bragg είναι γνωστές εδώ και αρκετά χρόνια και οι εν λόγω διατάξεις έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί διεξοδικά, βρίσκοντας πολλές εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται προσπάθειες να βρούμε νέες τεχνολογίες και δομές που να αντικαθιστούν τους καθρέφτες Bragg, κυρίως γιατί οι ιδιότητες των εν λόγω δομών παραμένουν πολύ ελκυστικές, αλλά δεν είναι εφαρμόσιμες σε πολλά υλικά. Νέες δομές μελετώνται ακριβώς γιατί θέλουμε να επεκτείνουμε τη χρήση των ιδιοτήτων των καθρεφτών Bragg.

Στην [43] σημειώνεται ότι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη φωτονική είναι να κατασκευαστούν μονολιθικά ολοκληρωμένοι αγωγίμοι, κατανεμημένοι καθρέφτες Bragg (DBRs: Distributed Bragg Reflectors) με πάνω από 97% ανακλαστικότητα οπτικής ισχύος, σε όλα τα συστήματα υλικών που χρησιμοποιούνται σε τεχνολογίες VCSEL (Vertical-cavity surface-emitting laser) . Μονολιθικά ολοκληρωμένα DBRs που είναι συντεθειμένα από υλικά ταιριασμένου πλέγματος (lattice-matched) σε ζευγάρια με στρώματα μήκους ενός τετάρτου μήκους κύματος ($\lambda/4$) (quarter-wavelength) με μεγάλη αντίθεση/διαφορά (contrast) στο δείκτη διάθλασης, μπορούν να παραχθούν εύκολα σε συστήματα βασισμένα στο αρσενίδιο (arsenide) (GaAs και AlGaAs με υψηλή περιεκτικότητα αλουμινίου). Ωστόσο είναι εξαιρετικά δύσκολο να κατασκευαστούν σε άλλα συστήματα υλικών όπως GaN και InP. Εναλλακτικές δυνατότητες περιλαμβάνουν μη αγωγίμους διηλεκτρικούς DBRs ή ημιαγωγίμους DBRs. Ωστόσο αυτοί οι τύποι καθρεφτών μπορούν να μειώσουν την εισροή ρεύματος στο κεντρικό μέρος της ενεργής περιοχής του VCSEL ,κάτω από το παράθυρο εκπομπής, απαιτώντας χρήση μεθόδου πλευρικού περιορισμού του ρεύματος. Γι 'αυτό στρεφόμαστε προς μια άλλη επιλογή τους HCGs (high refractive index-contrast grating- διατάξεις υψηλής διαφοράς δεικτών διάθλασης).

Στο [44] παρατηρούμε τη χρήση δισδιάστατων πλακών φωτονικών κρυστάλλων ως ελκυστικές εναλλακτικές για κατανεμημένους καθρέφτες Bragg και φίλτρα για διάφορες εφαρμογές, όπως φίλτρα οπτικού μήκους κύματος και πόλωσης, ανακλαστήρες laser ημιαγωγών, φωτοεντοπιστές, βιοαισθητήρες και μη γραμμικά οπτικά στοιχεία.

Ταυτόχρονα όμως, με την προσπάθεια διεύρυνσης της χρήσης των ιδιοτήτων των καθρεφτών Bragg σε άλλες δομές, συνεχίζεται η έρευνα πάνω σε δομές Bragg, καθώς συνεχίζουν να προκύπτουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα . Για παράδειγμα, σε άλλο σημείο της εργασίας αναφερθήκαμε στη χρήση διαδοχικών καθρεφτών Bragg για την βέλτιστη κατασκευή ανακλαστήρων μεγάλου εύρους και συγκεκριμένου φάσματος μηκών κύματος [40]. Αλλού παρουσιάζεται η χρήση καθρεφτών Bragg για τεχνολογίες laser [45].

Στην [46] βλέπουμε ότι οι καθρέφτες Bragg είναι τα βασικά στοιχεία πολλών οπτικών συστημάτων, εξαιτίας της ικανότητάς τους να πετυχαίνουν σχεδόν απόλυτη ανάκλαση του φωτός κατά μήκος ενός ακριβώς καθορισμένου εύρους μηκών κύματος. Σχηματισμένοι από την ενισχυτική παρεμβολή διαδοχικών ανακλάσεων Fresnel , μέσα από ένα απλό πολυστρώμα διηλεκτρικών στοιβών, το εύρος ανάκλασης των καθρεφτών Bragg σε κάθετη γωνία εισόδου χαρακτηρίζεται από μια λεία, ομοιόμορφη και ισχυρή ζώνη μη πολωμένης ανάκλασης, συνοδευόμενη από υψηλή διάδοση. Μέσω αυτών των ιδιοτήτων ανάκλασης, που εύκολα μπορούμε να χειριστούμε και να σχεδιάσουμε όπως θέλουμε, οι καθρέφτες Bragg έχουν βρει

χρήση σε αναρίθμητες εφαρμογές όπως οι διηλεκτρικοί καθρέφτες, διαχωριστές δέσμης και φίλτρα, αισθητήρες και lasers και σε πολλά άλλα καταναμεημένα συστήματα laser ανάδρασης. Καθώς η επικράτηση συσκευών κατασκευασμένων από συνδυασμούς καθρεφτών Bragg είναι αξιοσημείωτη, μια ολοένα αυξανόμενη απαίτηση να χειριζόμαστε συγκεκριμένες καταστάσεις πόλωσης έχει οδηγήσει στη συγκέντρωση της έρευνας πάνω σε νανοδομές ικανές για διάδραση κατά την κάθετη γωνία εισόδου με συγκεκριμένη πόλωση. Συγκεκριμένα μια απαίτηση για έλεγχο της στροφορμής που μεταφέρει η κυκλική πόλωση έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νανοδομών σε διάφορες γεωμετρίες, όπως ελικοειδείς ή σπειροειδείς συστοιχίες και gyroids (γυροειδή) που παρουσιάζουν κυκλικό διχρωισμό με διαφορεική ανάκλαση, διάδοση ή απορρόφηση, μεταξύ φωτός δεξιάς κυκλικής και αριστερής κυκλικής πόλωσης. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι τέτοιες δομές μπορούν και παρουσιάζουν κυκλικό διχρωισμό, η φασματική συμπεριφορά συχνά κυριαρχείται από οξέα και στενά χαρακτηριστικά, μη πολωμένες ζώνες ανάκλασης και διακυμάνσεις στο πρόσημο του κυκλικού διχρωισμού. Εμείς θα προτιμούσαμε μια απόκριση τύπου καθρέφτη Bragg, που καθορίζεται εδώ ως φασματική απόκριση συγκρίσιμη με το απλό, καθαρό και λείο φάσμα ενός καθρέφτη Bragg.

Στο άρθρο [46] παρουσιάζεται συγκεκριμένα μια δομή εμπνευσμένη από τη φύση και συγκεκριμένα από τις ανακλάσεις στα φτερά της πεταλούδας *Parides sesostris*, η οποία παρουσιάζει κυκλικό διχρωισμό όμοια με καθρέφτη Bragg σε τετραπλές γυροειδείς νανοδομές. Παρατηρείται μια ισχυρή ανθεκτικότητα της ζώνης κυκλικού διχρωισμού σε αλλαγές της γωνίας εισόδου και στην ευθυγράμμιση της δέσμης και παρουσιάζεται η ικανότητα να εφαρμοστούν ρυθμοί με ατέλειες (defect modes) μέσα στην κυκλικά πολωμένη ζώνη απαγόρευσης, γεγονός που μπορεί να παρέχει τη δυνατότητα για ανάπτυξη νέων φωτονικών συσκευών διαφόρων γεωμετριών.

Σύμφωνα με το [47], τα τελευταία χρόνια δομές πολαριτονίων Bragg (Bragg polaritons) έχουν προσελκύσει μεγάλη προσοχή ως ένα πρωτοποριακό σύστημα για την εξερεύνηση της αλληλεπίδρασης φωτός-ύλης. Ο ρυθμός Bragg πραγματώνεται καθώς η φωτονική λειτουργία και ένας μεγάλος αριθμός από κβαντικά πηγάδια μπορούν να τοποθετηθούν περιοδικά στο ανώτατο σημείο του πεδίου του ρυθμού Bragg, χωρίς να αυξηθεί η ένταση του ρυθμού. Σε αυτήν την μη φωλιασμένη μικροκοιλότητα ημιαγωγού τα πολαριτόνια Bragg προκύπτουν από την ισχυρά συνεκτική σύζευξη μεταξύ των φωτονίων Bragg και των εξιτονίων κβαντικών πηγιδιών. Παρά το γεγονός ότι οι ρυθμοί Bragg έχουν έναν μικρότερο παράγοντα ποιότητας, σε σύγκριση με τις συμβατικές μικροκοιλότητες ημιαγωγών, αυτά τα πολαριτόνια έχουν μια εξαιρετικά μικρή ενεργή μάζα (effective mass) σε σύγκριση με αυτές των συμβατικών μικροκοιλοτήτων. Από τη στιγμή που η κρίσιμη θερμοκρασία για συμπύκνωση πολαριτονίων είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ενεργή μάζα των πολαριτονίων, τέτοιες δομές είναι υποσχόμενες για την υλοποίηση συμπύκνωσης πολαριτονίων υψηλής θερμοκρασίας. Ένα επιπλέον βασικό

χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι ότι η ισχυρή σύζευξη μπορεί να προκύψει σε όλο το πάχος της δομής Bragg. Έχει προβλεφθεί θεωρητικά ότι η ιδιαίτερη διασπορά των ρυθμών πολαριτονίων Bragg μπορεί να οδηγήσει σε πολλά μη οπτικά φαινόμενα, όπως ενισχυμένη μη γραμμική διάδοση αργού φωτός και υπεραποτελεσματική παραμετρική σκέδαση. Πιο πρόσφατα δείγμα πολαριτονίων Bragg προτάθηκε για την υλοποίηση υπερβολικών μεταϋλικών, μέσω ελέγχου των προσήμων των ενεργών μαζών τέτοιων μεικτών quasiparticles φωτός-ύλης. Πολαριτόνια Bragg παρατηρήθηκαν επίσης σε συμβατικές μικροκοιλότητες τύπου Fabry-Perot. Ωστόσο η περιοδική διάταξη των διεγερμένων συντονισμών (resonances) σε δομές Bragg παρέχει μια μέγιστη υπερκάλυψη μεταξύ κυματοσυνάρτησης και φωτονικού ρυθμού. Από τεχνολογικής σκοπιάς τέτοιες δομές προσφέρουν ένα μειωμένο αριθμό από διεπαφές ανάπτυξης μεταξύ επιταξιακών στρωμάτων, σε σύγκριση με μια συμβατική δομή μικροκοιλότητας, που εξασφαλίζει έναν θετικό αντίκτυπο στη κρυσταλλική ποιότητα του δείγματος.

Για να υλοποιηθεί πλήρως το σύστημα μη φωλιασμένης μικροκοιλότητας ως μια πολύπλευρη πειραματική πλατφόρμα βασισμένη σε πολαριτόνια Bragg πρέπει να ικανοποιηθούν μερικές θεμελιώδεις διαφορές, όπως ο έλεγχος και ο χειρισμός των ιδιοκαταστάσεων των πολαριτονίων Bragg και η υλοποίηση ενός περιορισμένου συστήματος πολαριτονίων. Η σημαντικότητα των πλευρικά περιορισμένων πολαριτονίων έχει φανεί από διάφορες πιθανές εφαρμογές. Στις συμβατικές μικροκοιλότητες ο περιορισμός των κοιλοτήτων πολαριτονίων επιτυγχάνεται μέσω των εξιτονικών και των φωτονικών στοιχείων τους. Ο εν λόγω περιορισμός έχει πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας επιφανειακά ακουστικά κύματα, τοπική έλκυση, μια δεξαμενή εξιτονίων, παγίδες φωτονικών αταξιών, διαμόρφωση πάχους κοιλοτήτων, μεταλλικά στρώματα κάτω του ορίου περίθλασης, κιγκλιδώματα και κοιλοότητες με σχήμα κολώνας. Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν έχει αναφερθεί περιορισμός του ρυθμού και χειρισμός των πολαριτονίων Bragg για μη φωλιασμένη μικροκοιλότητα.

Συγκεκριμένα, στην εν λόγω δημοσίευση παρουσιάζονται δύο υποσχόμενες μέθοδοι για χειρισμό των ιδιοκαταστάσεων των πολαριτονίων Bragg, μέσω της αλλαγής του πάχους του πάνω στρώματος της δομής Bragg ή με την τοποθέτηση ενός στρώματος Ag. Και στις δύο περιπτώσεις πραγματοποιείται μια μετατόπιση αρκετών meV του κατώτερου πολαριτονίου Bragg. Μια τόσο μεγάλη μετατόπιση είναι καίρια για να επιτευχθεί η δημιουργία μιας πιθανής παγίδας πολαριτονίων Bragg. Επιπροσθέτως, αναφέρεται η μη γραμμική εκπομπή από τις υβριδικές δομές Bragg Ag. Πραγματοποιούνται μετρήσεις φωτοφθορισμού που εξαρτώνται από τη διέγερση. Οι υπολογισμοί αποκαλύπτουν ότι ο συντελεστής ποιότητας Q του ρυθμού Bragg μπορεί να ενισχυθεί κατά έναν παράγοντα 2.3, μέσω της χρήσης ενός στρώματος Ag 30nm. Τέτοια βελτίωση του συντελεστή Q είναι πολύ σημαντική για να αυξηθεί ο χρόνος ζωής των πολαριτονίων, έτσι ώστε η χαλάρωση των

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

πολαριτονίων στην κατάσταση γείωσης να γίνεται πιο γρήγορα από ότι ή μείωση ακτινοβολίας(radiative decay).

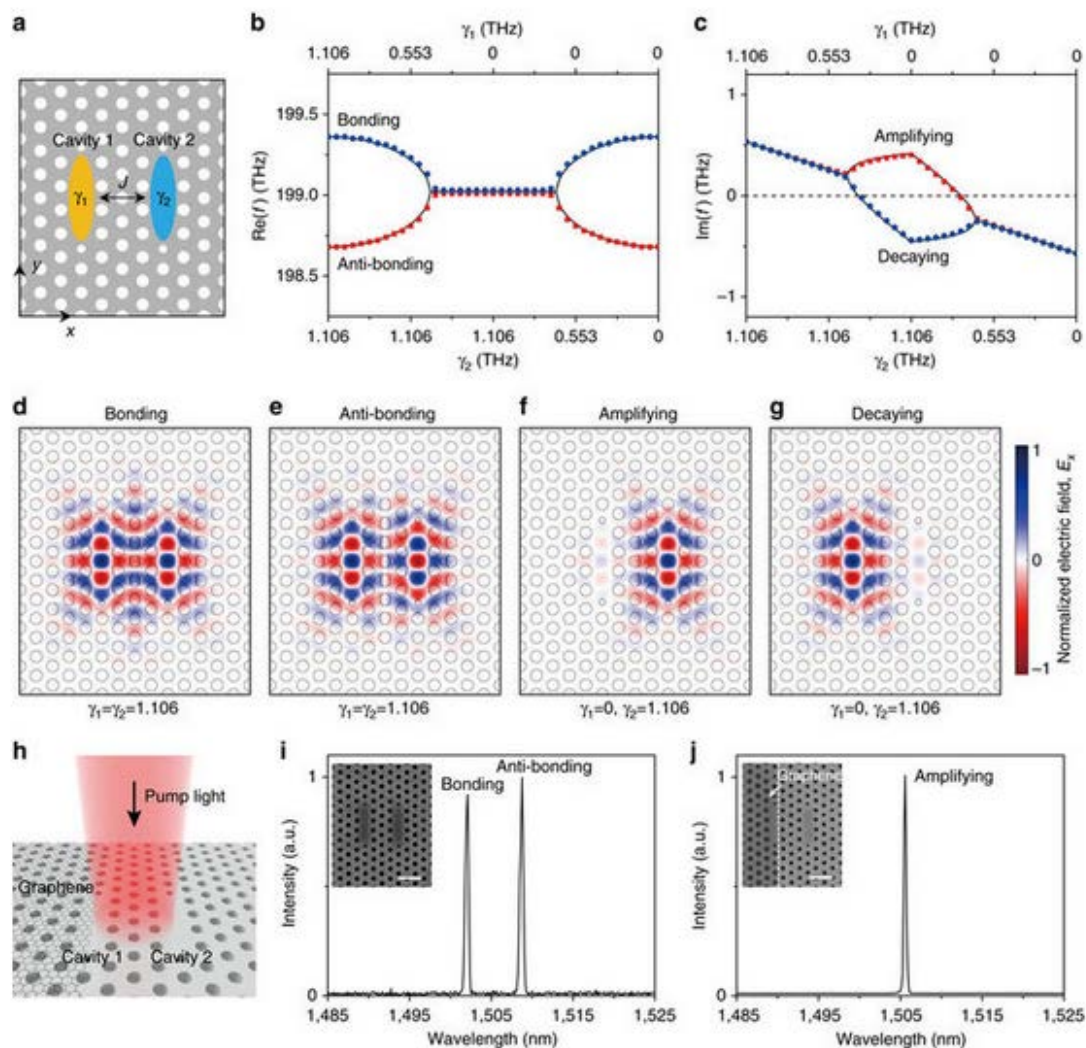
2.1.6

Lasers

Η έρευνα γύρω από τον τρόπο που χρησιμοποιούνται οι φωτονικοί κρύσταλλοι σε τεχνολογίες laser προφανώς και δεν περιορίζεται στις μη γραμμικότητες και στον τρόπο που αυτές σχετίζονται με τα laser.

Παραδείγματα τέτοιας δουλειάς αποτελούν οι εργασίες [45],[48],[49].

Στην [48] παρουσιάζεται μια δομή δύο συζευγμένων κοιλοτήτων φωτονικών κρυστάλλων με ένα μονοστρωματικό σεντόνι γραφενίου, το οποίο καλύπτει μερικώς τη μία κοιλότητα για να παρέχει ασύμμετρο οπτικό κέρδος και επαρκή αύξηση αντίθεσης/ διαφορά κέρδους (gain contrast) (Σχήμα 2.15). Με ειδικές τεχνικές εξέτασαν τρεις διαφορετικές δομές αποτελούμενες από συζευγμένες κοιλοότητες φωτονικού κρυστάλλου. Στην πρώτη διάταξη δεν πρόσθεσαν καθόλου γραφένιο, στη δεύτερη έβαλαν μεγάλα καλύμματα γραφενίου και στην τρίτη μικρά στρώματα/καλύμματα γραφενίου. Οι παρατηρούμενοι ρυθμοί laser προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας τις καταγεγραμμένες εικόνες ρυθμών και το θεωρητικό μοντέλο ασύμμετρου κέρδους για μη-Ερμιτιανές συζευγμένες κοιλοότητες. Συγκεκριμένα η αλλαγή φάσης των ρυθμών laser στα εξαιρετικά σημεία(exceptional points-EPs) μπορούν να μετρηθούν απευθείας, εναλλάσσοντας την αντλούμενη θέση και ισχύ στις συζευγμένες κοιλοότητες με μικρές περιοχές γραφενίου. Επιπλέον, οι οπτικές απώλειες του γραφενίου είναι συστηματικά ελεγχόμενες από ηλεκτρική περίφραξη με ζελέ ιόντων, για την επίδειξη των ρυθμιζόμενων εξαιρετικών σημείων.



Σχήμα 2.15: Δομή δύο συζευγμένων κοιλοτήτων φωτονικών κρυστάλλων με ένα μονοστρωματικό σεντόνι γραφενίου και αποτελέσματα: **(α)** Σχηματική απεικόνιση συζευγμένων κοιλοτήτων PhC που αποτελούνται από δύο πανομοιότυπες κυψελίδες τριών κυττάρων, σε δομή πλάκας τριγωνικού πλέγματος με σταθερά πλέγματος 420 nm, κανονική διάμετρο οπής 265 nm και διάμετρο οπής με μειωμένη οπή 140 nm. Το πάχος της πλάκας είναι 250 nm. Οι κοιλοότητες 1 και 2 έχουν οπτικά κέρδη, γ_1 και γ_2 , και μια σταθερά σύζευξης διεμπλοκής, J . Στο μοντέλο μας γ_1 και γ_2 παρέχονται μόνο μέσα στις κοιλοότητες. **(b, c)** Πραγματικά **(b)** και φανταστικά **(c)** τμήματα υπολογιζόμενων πολύπλοκων ιδιοσυχνοτήτων χρησιμοποιώντας προσομοίωση πλήρους κύματος (μπλε και κόκκινα σύμβολα) και μοντέλο συζευγμένης κοιλοότητας μη-ερμητιανής, γ_1 και γ_2 . Τα μπλε και κόκκινα σύμβολα υποδηλώνουν δύο διαφορετικά σούπερ μοντέλα στις συζευγμένες κοιλοότητες PhC. Στους υπολογισμούς, ο J σταθεροποιήθηκε στα 0,34 THz, ενώ $0 < \gamma_1 < 1,106$ THz και $0 < \gamma_2 < 1,106$ THz. **(d-g)** Υπολογιζόμενα συστατικά x των κανονικοποιημένων ηλεκτρικών πεδίων, E_x , για $\gamma_1 = \gamma_2 = 1.106$ THz (**d** και **e**) και $\gamma_1 = 0$ και $\gamma_2 = 1.106$ THz (**f** και **g**). Αυτές οι καταστάσεις ονομάστηκαν **(d)** δέσμευση ($\text{Re}(f) = 199.36$ THz), **(e)** αντι-συγκόλληση ($\text{Re}(f) = 198.68$ THz) αποσυντίθενται ($\text{Re}(f) = 199.02$ THz). **(h)** Σχηματική απεικόνιση των συζευγμένων κοιλοτήτων PhC με μερικώς καλυμμένο γραφένιο. Το κέντρο των συζευγμένων κοιλοτήτων φωτίζεται ομοιόμορφα από ένα λέιζερ άντλησης. **(i)** Μετρημένο φάσμα PL από τις συζευγμένες κοιλοότητες χωρίς γραφένιο. Η ισχύς άντλησης ήταν 213 μW . Δύο αιχμές λέιζερ παρατηρήθηκαν σε μήκη κύματος 1502,1 και

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

1508,8 nm. Εισαγωγή, κατασκευασμένες συζευγμένες κοιλότητες χωρίς γραφένιο. Γραμμή κλίμακας, 1 μm . (ι) Μετρημένο φάσμα PL από τις συζευγμένες κοιλότητες του πλαισίου i μετά την εισαγωγή του καλύμματος από το γραφένιο. Η ισχύς άντλησης ήταν 303 μW . Μία μοναδική κορυφή λήψης παρατηρήθηκε σε μήκος κύματος 1505,6 nm. Εισαγωγή, κατασκευασμένες συζευγμένες κοιλότητες με γραφένιο. Το όριο του καλύμματος γραφικού υποδεικνύεται με μια λευκή διακεκομμένη γραμμή. Γραμμή κλίμακας, 1 μm .

Ο έλεγχος της ενίσχυσης αντίθεσης από το γραφένιο είναι χρήσιμος ιδιαίτερα στις συζευγμένες κοιλότητες κλίμακας μήκους κύματος, επειδή οι συμβατικές οπτικές μέθοδοι άντλησης δεν είναι αρκετές για να παρέχουν ασύμμετρο κέρδος, καθώς οι δύο καλύτερες είναι τοποθετημένες αρκετά κοντά. Επιπλέον, οι οπτικές απώλειες του γραφενίου ρυθμίστηκαν από την ηλεκτρική περίφραξη με ζελέ ιόντων και ως αποτέλεσμα επιτεύχθηκε ενεργή ρύθμιση/συντονισμός των εξαιρετικών σημείων. Οι ερευνητές εκφράζουν την άποψη ότι η εν λόγω διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια ισχυρή πλατφόρμα για να ερευνηθούν μοναδικές ιδιότητες μη Ερμιτιανών συστημάτων και να κατασκευαστούν νέες οπτικές συσκευές με συμμετρία, όσον αφορά την ισοτιμία του χρόνου (parity time). Η μελέτη γύρω από την ισοτιμία του χρόνου αποτελεί πεδίο έρευνας στη σύγχρονη φυσική, με πολλές θεωρητικές ιδιότητες που οφείλουν να διερευνηθούν και η κατανόηση τους ξεφεύγει από τους σκοπούς της εν λόγω εργασίας. Παρ'όλα αυτά κρίθηκε απαραίτητο να αναφερθούν για να καταστεί κατανοητό πόσο η έρευνα για τους φωτονικούς κρυστάλλους έρχεται και δένει με τις πιο σύγχρονες αναζητήσεις στον κόσμο της φυσικής.

Πέραν τούτου η μελέτη της παραπάνω διάταξης μπορεί να φέρει ποικίλες πρακτικές εφαρμογές, όπως η υλοποίηση ρυθμιζόμενων εξαιρετικών σημείων, η παραγωγή επιθυμητών ρυθμών laser και η παραγωγή καθ'όλα οπτικής μεταγωγής, που καθίσταται δυνατή με τον έλεγχο των οπτικών απωλειών του γραφενίου.

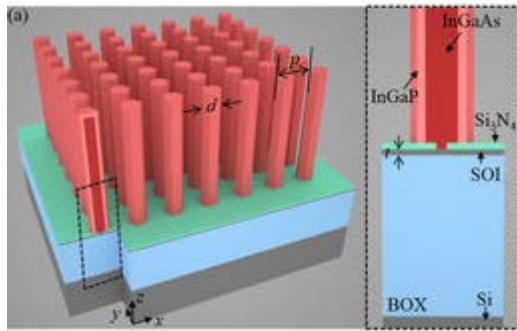
Οι κοιλότητες των φωτονικών κρυστάλλων είναι ένας από τους πιο ελκυστικούς υποψηφίους για την υλοποίηση συμπαγών και υψηλής έντασης laser εξαιτίας του υψηλού συντελεστή ποιότητας Q και της λειτουργίας τους σε επίπεδα της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος. Συγκεκριμένα, μεμβράνες φωτονικών κρυστάλλων με οπές αέρα, οι οποίες παρέχουν ισχυρό κάθετο περιορισμό λόγω ολικής εσωτερικής ανάκλασης, έχουν ερευνηθεί εξονυχιστικά με σκοπό να επιτευχθεί η δημιουργία laser ολοκληρωμένων σε chip.

Ωστόσο, απαιτούνται επιπλέον τεχνολογικές βελτιώσεις για να επιτευχθεί η παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα, με τις γνωστές μεθόδους κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Ως εναλλακτική προσέγγιση, δομές φωτονικών

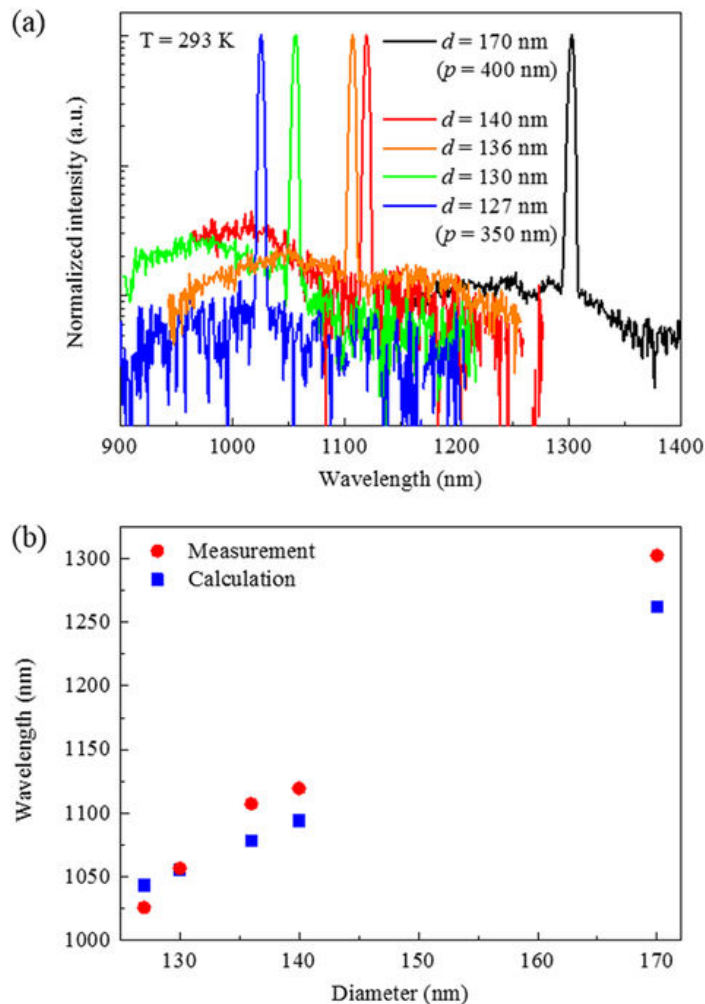
κρυστάλλων από νανοκολόνες (ή νανοκαλώδια), που παρήχθησαν από επιλεκτική επιταξία, μοιάζει να παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε σχέση με την επίτευξη πρακτικών εφαρμογών, επειδή οι III-V ημιαγώγιμες νανοκολόνες, με σκληρότητα πλευρικού τοιχώματος ατομικής κλίμακας, προσφέρουν μικρές οπτικές απώλειες και εύκολη δημιουργία φέρουσας. Επιπλέον, αυτές οι δομές φωτονικών κρυστάλλων με νανοκολόνες μπορούν να ολοκληρωθούν απευθείας σε τρισδιάστατα δομημένα υποστρώματα SOI (silicon on Insulator- πυρίτιο σε μονωτή), όπου τα SOI είναι μια πολλά υποσχόμενη πλατφόρμα για ολοκληρωμένα κυκλώματα. Οι νανοκολόνες φωτονικών κρυστάλλων επιτρέπουν ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ συντονισμένων ρυθμών και του περιβάλλοντος χώρου, προτείνοντας υψηλές πιθανότητες για την εφαρμογή συσκευών lab-on-a-chip . Οι lab-on-a-chip συσκευές αποτελούν μια μεγάλη μόδα της εποχής, όσον αφορά πολύ μικρές συσκευές που μετρούν δεδομένα κυρίως βιολογικής και ιατρικής φύσης, αναλύουν και βοηθούν στη διάγνωση παθολογιών. Ωστόσο, το να επιτευχθεί κάθεται περιορισμός αποτελεί μια πρόκληση σε αυτές τις κοιλότητες φωτονικών κρυστάλλων τύπου κολόνας, εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς δείκτη διάθλασης μεταξύ νανοκολόνων και απαιτείται η ανάπτυξη υποστρωμάτων για την αποφυγή διαρροών. Πολλές μέθοδοι έχουν αναφερθεί που να ικανοποιούν αυτή την απαίτηση και να φέρουν και λειτουργία laser.

Στην εργασία [49] παρουσιάζεται ένα υπερσυμπαγές laser φωτονικών κρυστάλλων το οποίο αποτελείται από 7*7 στοίβες νανοκολόνων, που λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου με οπτική άντληση. Η μέθοδος επιλεκτικής επιταξίας (SAE, selective—area—epitaxy) υιοθετήθηκε για την ανάπτυξη ομοιόμορφα διατεταγμένων σειρών νανοκολόνων και ένα βελτιστοποιημένο πάχος στρώματος SOI χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθεί ισχυρός κάθεται περιορισμός. Η εξάρτηση των χαρακτηριστικών του laser από τη διάμετρο καταδεικνύει μια νέα προσέγγιση για ολοκληρωμένους νανοαισθητήρες σε μια πλατφόρμα πυριτίου, η οποία πιθανώς να επιτρέπει αποτελεσματικούς βιοαισθητήρες τεχνολογίας lab-on-a-chip. Η χρήση μιας bottom-up προσέγγισης επιτρέπει τη δημιουργία laser φωτονικών κρυστάλλων με μέγεθος δισκίου ολοκλήρωσης κατευθείαν σε υποστρώματα SOI, καταδεικνύοντας ότι η δομή των νανοκολόνων από φωτονικούς κρυστάλλους παρέχει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας για μελλοντικές φωτονικές συσκευές. (Σχήμα 2.16 και αποτελέσματα Σχήμα 2.17)

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.



Σχήμα 2.16: Σχηματική απεικόνιση του 7x7 nanopillar PhC laser με δομές πυρήνα-κελύφους InGaAs / InGaP σε υπόστρωμα SOI, με πάχος στρώματος SOI t . d και p δείχνουν τη διάμετρο και το βήμα των νανοπυλών, αντίστοιχα.

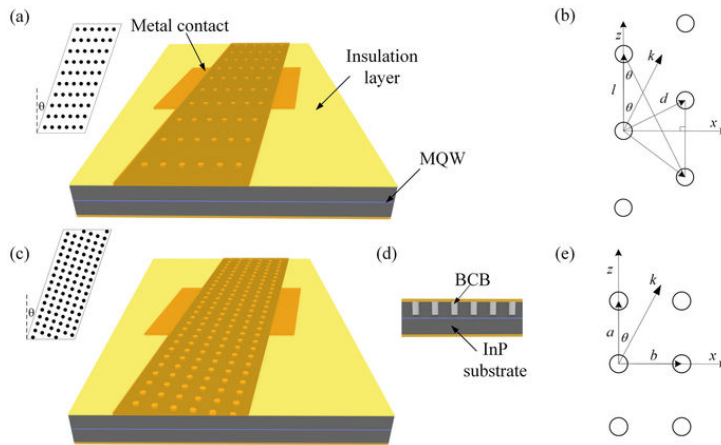


Σχήμα 2.17: (α) Φάσματα εκπομπής εξαρτώμενα από τη διάμετρο των λαμπτήρων PhC νανολιθίων που μετρώνται σε θερμοκρασία δωματίου σε γραφική κλίμακα. Ακολουθώντας φθάνει ένα μήκος κύματος τηλεπικοινωνίας 1300 nm ($d = 170$ nm και $p = 400$ nm). **(β)** Μετρημένα μήκη κύματος λήψης και υπολογισμένα συντονισμένα μήκη κύματος των πρώτων ρυθμών TM (σημείο M).

Ημιαγώγιμα laser υψηλής ισχύος και μονού μήκους κύματος είναι πολύ επιθυμητά για πολλές εφαρμογές. Τα συμβατικά, μονού μήκους κύματος κατανεμημένης ανάδρασης (DFB-Distributed feedback) ημιαγώγιμα laser βασίζονται σε κυματοδηγούς στενής λωρίδας και μπορούν να παρέχουν μέχρι αρκετές δεκάδες milliwatts ισχύος εξόδου. Στα laser διόδου στενής λωρίδας καθοδηγούμενα από δείκτη, ο θεμελιώδης ρυθμός λειτουργίας περιορίζεται σε αρκετά μικρά. Ωστόσο, η λειτουργία υψηλής ισχύος απαιτεί ένα μεγάλο άνοιγμα εκπομπής ευρείας περιοχής για να ξεπεράσουν το φαινόμενο COD (catastrophic optical damage) και να βοηθήσουν με τη διάχυση λόγω θερμότητας. Ένα εμπορικά διαθέσιμο laser διόδου υψηλής ισχύος και ευρείας περιοχής συνήθως έχει πλάτος περίπου 100μm. Το εγκάρσιο κυματοδιάνυσμα γίνεται συγκρίσιμο με το παράλληλο και πολλοί ρυθμοί κυματοδήγησης μπορούν να υποστηριχθούν από ένα laser ευρείας περιοχής. Ως εκ τούτου, η λειτουργία μονού μήκους κύματος ενός laser διόδου ευρείας περιοχής απαιτεί έλεγχο και του εγκάρσιου και του παράλληλου ρυθμού. Για να εξασφαλιστεί ένα laser υψηλής ισχύος, μονού μήκους κύματος, υπάρχουν δύο απαιτήσεις: το μεγάλο άνοιγμα εκπομπής και ο ταυτόχρονος έλεγχος του παράλληλου και του εγκάρσιου ρυθμού.

Ένα υποψήφιο σύστημα που μπορεί να ικανοποιήσει και τις δύο αυτές απαιτήσεις είναι το laser Bragg από φωτονικό κρύσταλλο. Η κοιλότητα του laser καθορίζεται από την δισδιάστατη δομή του φωτονικού κρυστάλλου. Το laser φωτονικού κρυστάλλου Bragg είναι ένα δισδιάστατο ανάλογο του μονοδιάστατου laser DFB. Υπάρχουν μερικές ενδιαφέρουσες εφαρμογές του laser φωτονικού κρυστάλλου Bragg όπως οι δισδιάστατοι μηχανισμοί ανάδρασης και το laser δίχως καθρέφτη. Επιπλέον, το laser φωτονικού κρυστάλλου Bragg με ορθογωνικό πλέγμα έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για να εξασφαλιστεί δέσμη εξόδου μονού μήκους κύματος, περιορισμένη κοντά στη διάθλαση. Ο θεμελιώδης ρυθμός κυματοδήγησης Bragg επιλέγεται από την περιοδική δομή κατά την εγκάρσια διεύθυνση και ο παράλληλος ρυθμός πρέπει να συντονιστεί με την περιοδική δομή κατά τη διεύθυνση διάδοσης. Σε αυτή την εργασία σχεδιάζεται ένα laser φωτονικού κρυστάλλου Bragg με τριγωνικό πλέγμα για μονολιθικό συνεκτικό συνδυασμό δέσμης (CBC) ώστε να αναβαθμιστεί η ισχύος εξόδου. Παρουσιάζεται το γεγονός ότι το laser φωτονικού κρυστάλλου Bragg τριγωνικού πλέγματος και το laser φωτονικού κρυστάλλου Bragg ορθογωνικού πλέγματος έχουν παρόμοια απόδοση, αναφορικά με το ρεύμα κατωφλίου, την επάρκεια κλίσης, το μακρινό και το κοντινό πεδίο. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το laser φωτονικού κρυστάλλου Bragg τριγωνικού πλέγματος μπορεί επίσης να παρέχει μονού μήκους κύματος λειτουργία με καλή ποιότητα δέσμης. Περαιτέρω παρουσιάζεται ότι τα συμπαγή συνδυασμένα Lasers φωτονικού κρυστάλλου Bragg τριγωνικού πλέγματος διατηρούν την λειτουργία μονού μήκους κύματος και καλή ποιότητα δέσμης. (Σχήμα 2.18)

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.



Σχήμα 2.18: Σχηματογραφικά διαγράμματα των λέιζερ PC Bragg με τριγωνικό πλέγμα **(α)** και ορθογώνιο πλέγμα **(c)**. **δ)** Διατομή των λέιζερ PC Bragg. Γεωμετρίες και σχέσεις με τον φορέα k στο σχέδιο τριγωνικού πλέγματος **(b)** και τον ορθογώνιο σχεδιασμό πλέγματος **(e)**. MQW: πολλαπλών κβαντικών πηγών. BCB: βενζοκυκλοβουτένιο.

Τα λέιζερ ημιαγωγών έχουν συμβάλει σε ένα ευρύ φάσμα τομέων στη σύγχρονη κοινωνία, ιδίως των τηλεπικοινωνιών, της μετάδοσης δεδομένων και την οπτική αποθήκευση. Μέχρι σήμερα μεγάλο ενδιαφέρον έχει αφιερωθεί στην επέκταση της χρησιμότητας του λέιζερ ημιαγωγού για αυτά τα πεδία, όπως με τη διεύρυνση της γκάμας προσβάσιμων μηκών κύματος και την ταχύτητα διαμόρφωσής τους. Από την άλλη μεριά, όσον αφορά εφαρμογές υψηλής ισχύος, τα λέιζερ ημιαγωγών είχαν δυσκολία να επιτυγχάνουν ταυτόχρονα υψηλή ισχύ εξόδου και υψηλής ποιότητας δέσμη, έτσι ώστε η ανάπτυξή τους να έχει καθυστερήσει σε σχέση με άλλα λέιζερ, όπως τα CO₂ και τα λέιζερ ινών. Επιπλέον, όπως και με πολλά άλλα λέιζερ, τα λέιζερ ημιαγωγών δεν έχουν την ικανότητα του μοτίβου δέσμης on-chip, της πόλωσης και του έλεγχου κατευθυντικότητας.

Αυτές οι λειτουργίες απαιτούν την προσθήκη εξωτερικών στοιχείων, γεγονός που αφαιρεί το πλεονέκτημα της συνεκτικότητας για το οποίο είναι γνωστά τα λέιζερ ημιαγωγών. Τώρα, με την ανάπτυξη των photonic-crystal surface-emitting lasers (PCSELS) που είναι ένας νέος τύπος λέιζερ ημιαγωγού, αυτό το πρότυπο αναμένεται να αλλάξει. Το PCSEL προσελκύει την προσοχή όχι μόνο για την ταυτόχρονη επίτευξη υψηλού επιπέδου ισχύος εξόδου και την υψηλή ποιότητα δέσμης, αλλά και για το γεγονός ότι επιδεικνύει λειτουργίες που δεν είναι εύκολα επιτεύξιμες με άλλους τύπους λέιζερ, όπως πόλωση και έλεγχο μοτίβων δέσμης on-chip και έλεγχου κατεύθυνσης δέσμης, η οποία εξαλείφει την ανάγκη για ογκώδη εξωτερικά οπτικά στοιχεία.

Στο άρθρο [50] εξετάζεται η πρόοδος των PCSEL, συμπεριλαμβανομένων της αρχής λειτουργίας τους ως λέιζερ, τον έλεγχο του μοτίβου της δέσμης και την υψηλή συχνότητας δέσμη λέιζερ τάξης watt. Στη συνέχεια, εισάγεται η έννοια των M-

PCSELS για την ενοποίηση της lasing ταλάντωσης και του ελέγχου δέσμης κατά παραγγελία. Δείχνεται ότι αυτή η μοναδική ιδέα επιτρέπει το δισδιάστατο σύστημα διεύθυνσης δέσμης χωρίς κανένα εξωτερικό στοιχείο και ανοίγει το δρόμο προς τον απόλυτο έλεγχο της δέσμης εξόδου των λέιζερ ημιαγωγών. Τέτοιες εξελίξεις στα PCSEL και στα M-PCSELS θα συμβάλουν στην υλοποίηση του προγράμματος λέιζερ επόμενης γενιάς, ενός σσιπ, εξαιρετικά συμπαγούς για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας υλικών, λέιζερ ραντάρ, heads-up / τοποθετημένες οθόνες και αυτοματοποιημένη οδήγηση.

2.1.7

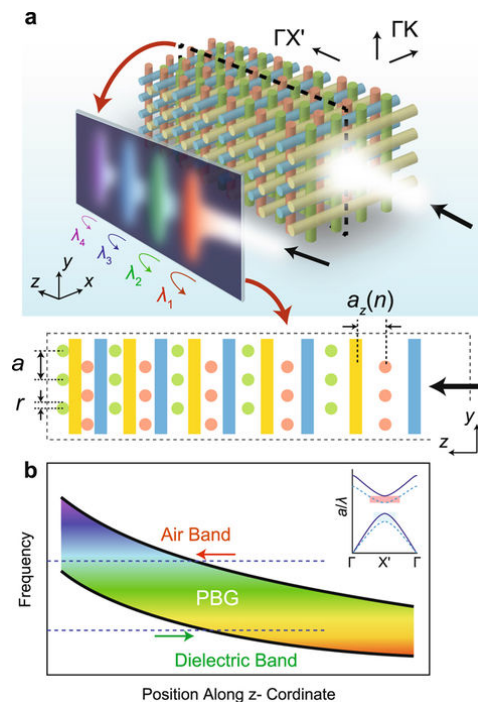
Παγίδευση φωτός (Light trapping)

Η προσωρινή αποθήκευση του φωτός, με την έννοια ότι αυτό επιβραδύνεται, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της τοπικής έντασης του αργού φωτός, έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς έρευνας, καθ' ότι πολλά χρήσιμα οπτικά φαινόμενα στηρίζονται έντονα στην αλληλεπίδραση μεταξύ φωτός και ύλης. Οι αρχικές προσπάθειες με σκοπό τη σταδιακή μείωση της ταχύτητας του φωτός βασίστηκαν σε κβαντικά φαινόμενα, όπως η ηλεκτρομαγνητικά προκαλούμενη διαφάνεια ή οπτικά συνεκτικά φαινόμενα όπου περιορισμοί, όπως η χρησιμοποίηση υπερκρύων αερίων ή το στενό εύρος ζώνης λειτουργίας περιόρισαν τις πρακτικές εφαρμογές. Πιο πρόσφατα, οι υλοποιήσεις σε ολοκληρωμένα κυκλώματα σχημάτων αργού φωτός έχουν καταστεί δυνατές, όπως οι συζευκτικοί οπτικοί κυματοδηγοί συντονισμού/επαγωγής, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε χαμηλές ταχύτητες ομάδας με αμελητέα παραμόρφωση. Ωστόσο ένα θεμελιώδες όριο, που περιορίζει τέτοιες δομές είναι το λεγόμενο παράγωγο καθυστερημένου εύρους ζώνης, το οποίο επιβάλλει μια ανταλλαγή μεταξύ του παράγοντα της καθυστέρησης και του εύρους ζώνης, στο οποίο συμβαίνει η καθυστέρηση. Ένας τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτός ο περιορισμός είναι να ρυθμιστεί αδιαβατικά (on chirp) η δομή, που σημαίνει ότι μία ή αρκετές παράμετροι της δομής σταδιακά ποικίλουν κατά τη διεύθυνση διάδοσης. Συγκεκριμένα, έχει δειχθεί ότι σε μια κανονική ετεροδομή από μεταϋλικά, το φως μπορεί να επιβραδυνθεί και να παγιδευτεί σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, εξαρτώμενες από τη συχνότητα, χρησιμοποιώντας αλλαγή (shift) Gaus-Hanchen. Αυτό το φαινόμενο που χαρακτηρίζεται «παγιδευμένο ουράνιο τόξο», μπορεί να θεωρηθεί ως ο χωρικός διαχωρισμός των παραμέτρων συχνότητας του διαδιδόμενου κύματος και έχει πραγματοποιηθεί σε διηλεκτρικά ή πλασματικά κυκλιδώματα ή κυματοδηγούς, σε μονοδιάστατους και δισδιάστατους φωτονικούς κρυστάλλους, σε έναν υπερβολικό κυματοδηγό από μεταϋλικά, σε ηχητικούς κρυστάλλους και σε έναν κυματοδηγό υπό την επίδραση ενός κωνικού μαγνητικού πεδίου. Καθώς έχουν γίνει σημαντικά

βήματα όσον αφορά στην επιβράδυνση του φωτός και την «παγίδευση» του, ακόμα μένει να αντιμετωπιστούν οι εξωτερικές απώλειες. Έχει συζητηθεί ιδιαίτερα κατά πόσον η απορρόφηση από υλικά, χαρακτηριστικό των μεταλλικών δομών, μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες απώλειες διάδοσης και τελικά να αποτρέψει το μηχανισμό παγίδευσης φωτός σε μεταϋλικά. Παρά το ότι είναι δυνατό να ξεπεράσουμε τις απώλειες υλικών σε μεταϋλικά, χρησιμοποιώντας διηλεκτρικούς δισδιάστατους φωτονικούς κρυστάλλους χωρίς απορρόφηση στην περιοχή αρνητικής διάθλασης, αντί μεταϋλικών μερών, παραμένει άγνωστο κατά πόσον άλλοι μηχανισμοί εξωτερικών απωλειών, όπως οι εκτός επιπέδου απώλειες ακτινοβολίας, μπορούν να μετριασθούν και να ξεπεραστούν σε τέτοιες δομές. Ωστόσο, ενώ έχουν γίνει μερικές προσπάθειες να μειώσουμε τις απώλειες σε δισδιάστατους φωτονικούς κρυστάλλους, η αναπόφευκτη σχέση μεταξύ της ταχύτητας ομάδας και του χρόνου διάδρασης με το μέσο οδηγεί σε μη αμελητέο ποσό αύξησης απωλειών σκέδασης, καθώς προσεγγίζεται η περιοχή άκρης της ζώνης (όπου παρατηρείται στο μεγαλύτερο βαθμό η συμπεριφορά αργού φωτός).

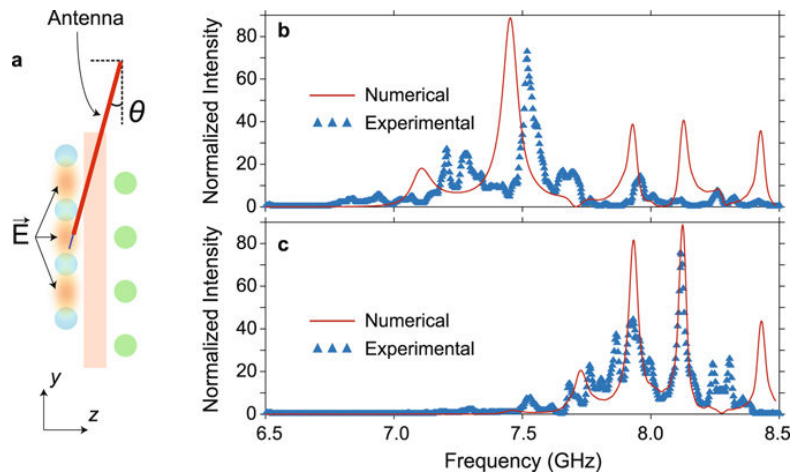
Σε αντίθεση με τους δισδιάστατους, οι τρισδιάστατοι φωτονικοί κρύσταλλοι είναι ικανοί να παρέχουν πλήρη χάσματα ζώνης και στις τρεις κατευθύνσεις. Ανάμεσα σε αυτούς οι στρώμα-πάνω-σε-στρώμα (ή στοίβα από ξύλα-woodpile) φωτονικοί κρύσταλλοι έχουν μελετηθεί εντατικά λόγω των προσαρμόσιμων απαιτήσεων όσον αφορά την παρασκευή τους σε κλίμακα μικρών ή νάνο, καθώς επίσης της ανοχής τους απέναντι σε ατέλειες κατασκευής. Τέτοιες δομές αποτελούνται από στρώματα παράλληλων ράβδων ή κορμούς, όπου οι ράβδοι σε κάθε διαδοχικό στρώμα με τον ίδιο προσανατολισμό ράβδων μετακινούνται σε σχέση με τον προηγούμενο, κατά το μισό της συνεπίπεδης περιόδου a , σχηματίζοντας έναν τρισδιάστατο φωτονικό κρύσταλλο της συμμετρίας ενός τετραγωνικού πλέγματος. Στη δημοσίευση [51] προτείνεται ένας φωτονικός κρύσταλλος woodpile με σταδιακά εναλλασσόμενες παράλληλες περιόδους κατά την κατεύθυνση στοίβας, ώστε σταδιακά να μειώνεται και να σταματάει το εισερχόμενο κύμα (Σχήμα 2.19). Σημειώνεται ότι διάφορες, όπως προαναφέραμε, δομές παγίδευσης ουρανίου τόξου έχουν πειραματικά υλοποιηθεί σε μικροκυματικές ή ακόμα και οπτικές συχνότητες. Ωστόσο, σε τέτοιες δομές κυματοδήγησης ή κιγκλιδώματα, η ένταση του ρυθμού του εντοπισμένου κύματος αναπόφευκτα περιορίζεται από την ένταση των ατελειών του κυματοδηγού ή το πλάτος του κωνικού κιγκλιδώματος. Τέτοιοι περιορισμοί επιβάλλουν σοβαρή μείωση της έντασης του τοπικού πεδίου και στην απαραίτητη ένταση στην οποία το κύμα μπορεί επιτυχώς να διαδοθεί. Αντίθετα, το φαινόμενο «παγίδευσης ουρανίου τόξου», που προκύπτει σε μια δίχως ατέλειες ογκώδη δομή, μπορεί να οδηγήσει σε αισθητά μεγαλύτερες εντάσεις τοπικού πεδίου, χρησιμοποιώντας τρισδιάστατους ογκώδεις ρυθμούς υψηλής έντασης σε φωτονικούς κρυστάλλους.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.



Σχήμα 2.19: Προτεινόμενη διαμόρφωση 3D PhC για παγίδευση ουράνιου τόξου. (α) Σχηματική απεικόνιση της δομής του PhC με ξυλοκοπή. Για καλύτερη απεικόνιση μειώνεται ο αριθμός περιόδων της εικονογραφημένης δομής PhC. Το κάτω ένθετο απεικονίζει την εγκάρσια τομή της δομής στο επίπεδο yz . (β) Η παραλλαγή του PBG κατά μήκος της κατεύθυνσης διάδοσης παρουσιάζεται αντιπροσωπευτικά. Λόγω της σταδιακής μεταβολής των αποστάσεων στρώματος-στρώματος, το προσπίπτον κύμα θα διαχωρίζεται χωρικά στα συστατικά της συχνότητας κατά μήκος της κατεύθυνσης διάδοσης, σχηματίζοντας έτσι ένα "παγιδευμένο ουράνιο τόξο", όπως παρουσιάζεται αντιπροσωπευτικά ως όψη διατομής στο κάτω ένθετο αριστερά του (α). Το άνω δεξιό ένθετο στο (b) δείχνει αντιπροσωπευτικά την αλλαγή των καμπυλών διασποράς στην κατεύθυνση διάδοσης, όπου η απόσταση στρώσης-στρώσης της στερεής καμπύλης μαύρης διασποράς είναι μικρότερη από εκείνη της διακεκομμένης κυανής καμπύλης διασποράς. Τα μαύρα βέλη αποκαλύπτουν την κατεύθυνση διάδοσης του εισερχόμενου κύματος.

Η δομή που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας τρισδιάστατος woodpile φωτονικός κρύσταλλος, που αποτελείται από κυλινδρικές ράβδους αλουμίνιας (Al_2O_3) με μια ακτίνα και ύψος ίσα με $r = \frac{\sqrt{2}}{8} a$ και $h = 8.463a$ αντίστοιχα, όπου a είναι η συνεπίπεδη περίοδος. Οι Al_2O_3 ράβδοι έχουν διηλεκτρική σταθερά ίση με 9.8 στις μικροκυματικές συχνότητες.



Σχήμα 2.20: Μετρήσεις ενίσχυσης πεδίου. (α) Σχηματική περιγραφή της μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στη δομή. Τα αριθμητικά υπολογισμένα και πειραματικά μετρηθέντα φάσματα έντασης ηλεκτρικού πεδίου που λαμβάνονται στο κέντρο του xy -επιπέδων και σε απόσταση ίση με (b) 9,25 cm και (c) 17,15 cm στην κατεύθυνση z σε σχέση με την είσοδο της δομής, υπερκαλύπτονται.

Τελικά η δομή που μελετήθηκε αριθμητικά αλλά και πειραματικά, κατάφερε να επιβραδύνει και τελικά να παγιδεύσει και να ενισχύσει διαφορετικά φασματικά συστατικά σε διαφορετικές θέσεις. Σημειώνεται ότι η προτεινόμενη δομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύγχρονες τεχνολογίες παρασκευής σε κλίμακα νανομέτρων, όπως η λιθογραφία με δέσμη ηλεκτρονίων ή οι τεχνικές απευθείας εγγραφής με laser, χάρη στην απλή στρώμα επί στρώματος δομή της και την ανοχή της σε λάθη κατασκευής.

Πρέπει να τονιστεί όμως ότι το φαινόμενο ενίσχυσης του φωτός (Σχήμα 2.20) στην προτεινόμενη δομή δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως μόνιμη αποθήκευση ενός «παγιδευμένου ουράνιου τόξου», αλλά μάλλον σαν ένας προσωρινός εντοπισμός λόγω του πεπερασμένου χρόνου παγίδευσης, που οφείλεται στην ανάκλαση στο σημείο αλλαγής. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι ενώ παρατηρήθηκαν υψηλοί ομαδοί δείκτες μέχρι το 120 δεν μπορέσαμε να μηδενίσουμε την ταχύτητα ομάδας κοντά στην περιοχή εντοπισμού, εξαιτίας των πρόσθετων εξωτερικών απωλειών του επιπέδου και των περιορισμών του πειράματος.

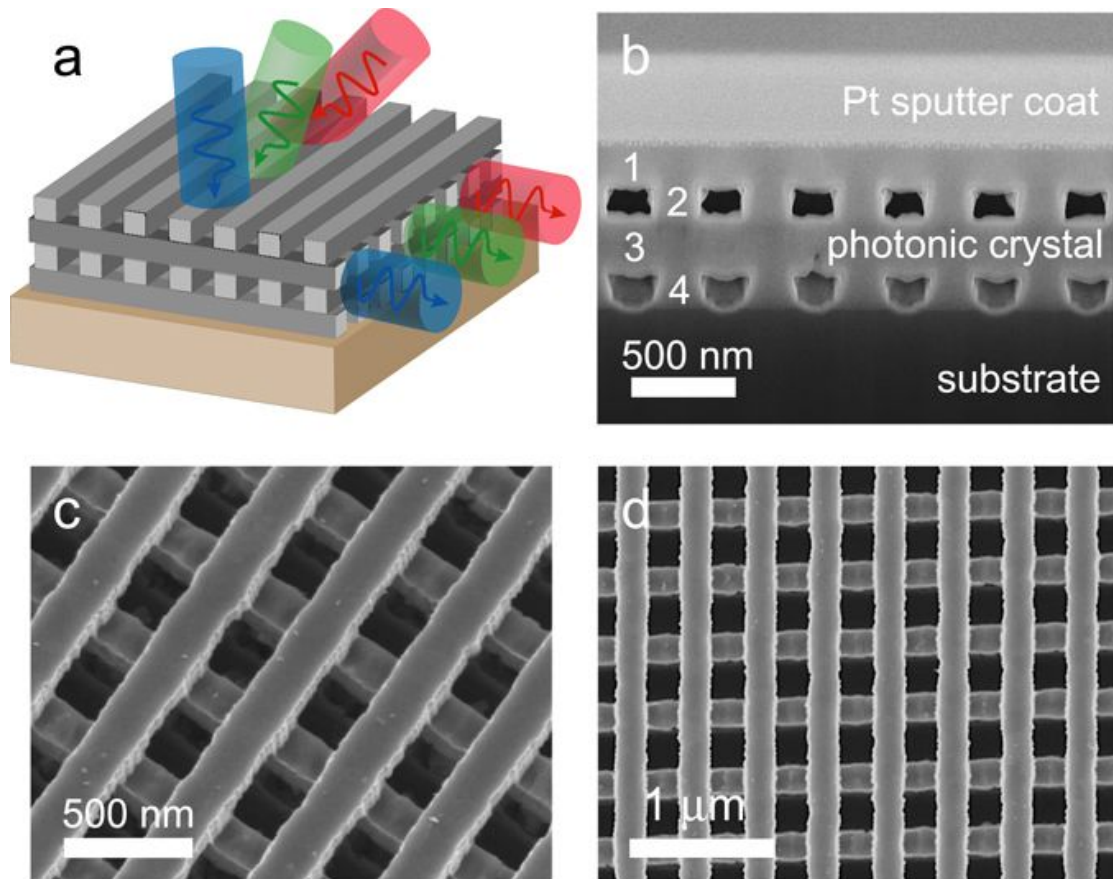
Ιστορικά, στην προσπάθεια να επιτευχθεί παγίδευση φωτός, χρησιμοποιήθηκαν τυχαία σκέδαση από τραχείες επιφάνειες αλλά οι περιοδικές δομές έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον τελευταία, εξαιτίας της ικανότητάς τους να εκμεταλλεύονται την κυματική φύση του φωτός. Κινητροποιούμενοι από το ερώτημα κατά πόσον αυτές οι διατεταγμένες αρχιτεκτονικές μπορούν να ξεπεράσουν την ικανότητα για παγίδευση φωτός των προηγούμενων τεχνολογιών, η στρατηγική αυτή έχει παράξει μια ποικιλία από συσκευές, όπως αυτές που βασίζονται σε καταναμημένες ανακλάσεις Bragg, στη σκέδαση Mie ή σε κυματοδηγούμενους ρυθμούς σε

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

διηλεκτρικές πλάκες. Επιπλέον, μερικές μελέτες έχουν αναδείξει δομές ικανές να ξεπεράσουν το εργοδικό όριο σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων.

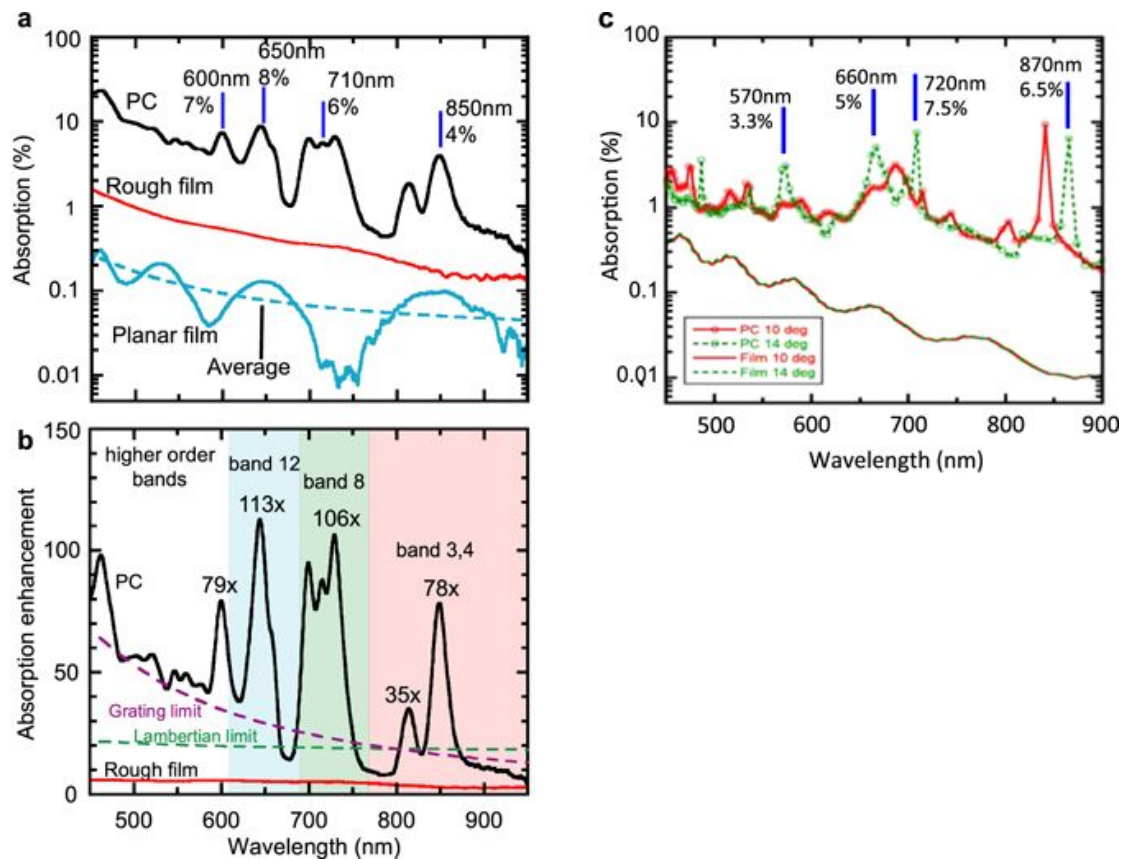
Στο [52] παρουσιάζεται ένας ακριβής μηχανισμός για ενίσχυση του μήκους μονοπατιού, που έχει την βάση του στην διάθλαση του φωτός από έναν τρισδιάστατο φωτονικό κρύσταλλο. Αυτό το φαινόμενο που καλείται διάθλαση παράλληλη στην επιφάνεια επεκτείνει το μήκος του μονοπατιού σε όρους μεγέθους, συζευγνύοντας το φως σε ρυθμούς στους οποίους το διάνυσμα Rouyting είναι σχεδόν παράλληλο στην διεπιφάνεια του φωτονικού κρυστάλλου. Η μέθοδος αυτή έχει μελετηθεί θεωρητικά στο παρελθόν, αλλά αποτελεί πρόκληση να επιβεβαιωθεί πειραματικά, επειδή έχει δοκιμαστεί μόνο σε υλικά για τα οποία η βάση απορρόφησης φτάνει σε κορεσμό σε κάποιο μέρος του φάσματος. Για να υπολογιστεί με ακρίβεια η απόδοση οποιουδήποτε σχήματος παγίδευσης φωτός, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν σαν αναφορά υλικά ασθενούς απορρόφησης. Αυτό επιτρέπει σε κάποιον να εντοπίζει περιοχές συχνοτήτων όπου παρατηρείται ισχυρή ενίσχυση. Τότε θα μπορούσαν να σχεδιαστούν συσκευές που να στοχεύουν σε περιοχές με ασθενή απορρόφηση, χρησιμοποιώντας τις γνωστές ιδιότητες κλιμάκωσης των φωτονικών κρυστάλλων.

Συγκεκριμένα, η δυσκολία αυτή ξεπερνιέται κατασκευάζοντας έναν απλό κυβικό φωτονικό κρύσταλλο υψηλού δείκτη διάθλασης ($n > 2$) από διάφανο TiO_2 , για να παρατηρηθεί η τάξη μεγέθους ενίσχυση σε σχέση με ένα φιλμ TiO_2 αναφοράς, για το οποίο η βάση απορρόφησης είναι κάτω από 1% κατά ολόκληρο το ορατό και το εγγύς υπέρυθρο (near-infrared) φάσμα. Τα συμπεράσματα που ακολουθούν από την ανάλυση δεν περιορίζονται στο TiO_2 ή οποιοδήποτε υλικό συγκεκριμένα. Μετρήσεις που αφορούν στην εξάρτηση από τη γωνία φανερώνουν την δομή της φωτονικής διασποράς του φωτονικού μας κρυστάλλου και αποδεικνύουν ότι η ενίσχυση προκαλείται από το PIR (parallel to interference refraction). Η πειραματική επιβεβαίωση του PIR παρέχει μια ευκαιρία να χρησιμοποιήσουμε έναν απλό κυβικό φωτονικό κρύσταλλο ως ένα διατεταγμένο τρισδιάστατο δίκτυο που διαθλά το φως σύμφωνα με τη σχέση διασποράς (Σχήμα 2.21, 2.22 και 2.23). Αυτή η προσέγγιση στην ενίσχυση απορρόφησης υπάγεται στη διήθηση από διάφορες παραμέτρους, όπως σε πολυμερή και νανοφώσφορο και είναι κατάλληλο για τη διερεύνηση της ενίσχυσης εκπομπής φωτός παραγόμενου από φωτονικό κρύσταλλο.

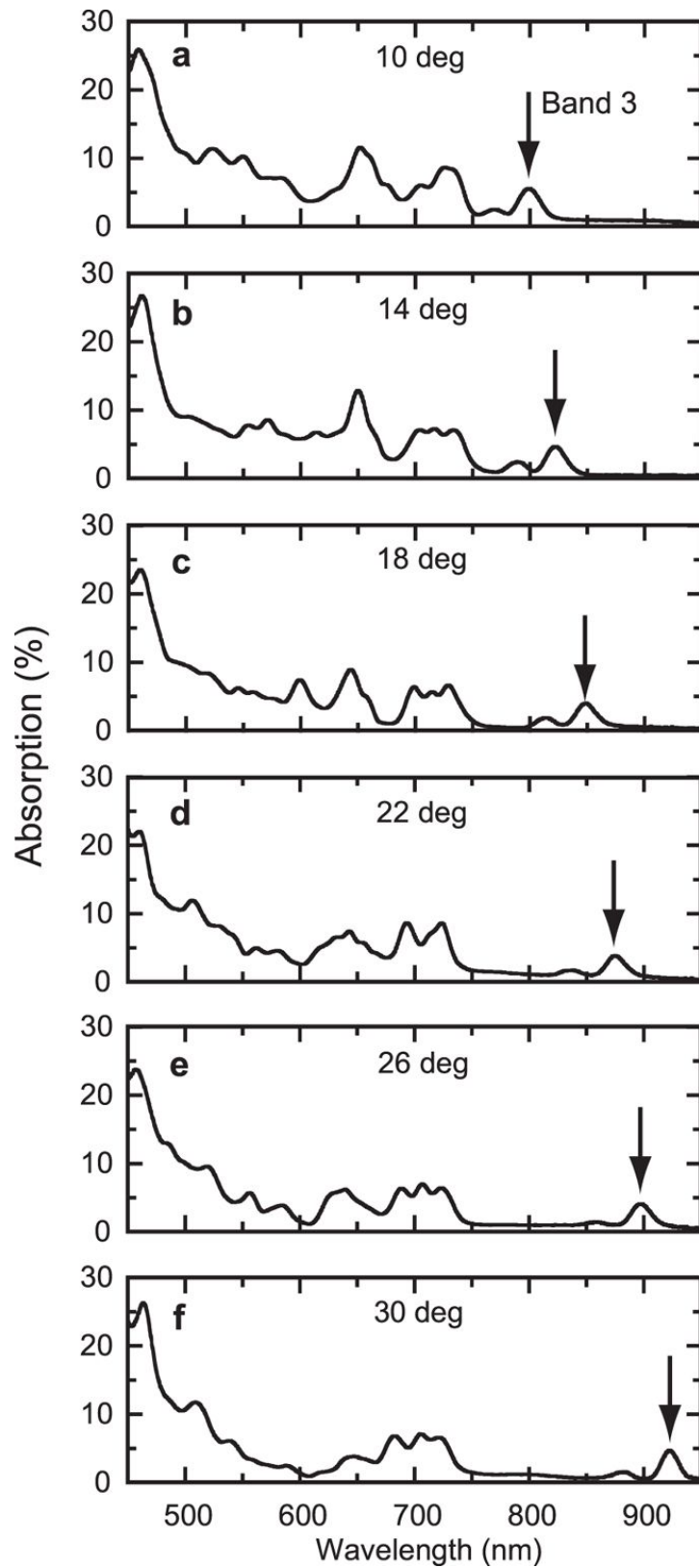


Σχήμα 2.21: Σχέδιο ενός απλού κυβικού φωτονικού κρυστάλλου TiO_2 . (α) Σχηματική του PC TiO_2 που απεικονίζει τη διάθλαση παράλληλης προς τη διεπαφή. (β) Πλευρική όψη εγκάρσιας τομής (γ) προοπτική όψη και (δ) κάτωψη κατασκευασμένου PC TiO_2 .

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.



Σχήμα 2.22: Ενίσχυση απορρόφησης ευρείας ζώνης σε φωτονικό κρύσταλλο TiO_2 . (α) Φάσμα απορρόφησης για PC (μαύρο) και ταινίες αναφοράς R2 (κόκκινο) και R1 (μπλε). (β) Βελτίωση απορρόφησης για PC (μαύρο) και R2 (κόκκινο) σε σχέση με το R1. Επίσης παρουσιάζονται τα θεωρητικά όρια για τη βελτίωση της απορρόφησης σε ένα εργοδικό σύστημα (Lambertian Limit), και στο πλέγμα περίθλασης σε σχήμα απορροφητικής στρώσης. (γ) Ένας υπολογισμός FDTD της απορρόφησης φωτονικών κρυστάλλων παρουσιάζεται για το εύρος μήκους κύματος από 450–900 nm, για γωνίες πρόσπτωσης 10° και 14° . Οι κορυφές απορρόφησης αναγνωρίζονται με μπλε γραμμή.



Σχήμα 2.23: Γωνιακή εξάρτηση της απορρόφησης φωτονικών κρυστάλλων. (a-f) Φάσματα απορρόφησης του PC TiO₂ για γωνίες πρόσπτωσης των 10, 14, 18, 22, 26 και 30 μοιρών, αντίστοιχα. Ένα βέλος δείχνει τη θέση του συντονισμού απορρόφησης της ζώνης 3 σε κάθε περίπτωση.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Ο οπτικός εντοπισμός που εμφανίζουν δομές όπως οι φωτονικοί κρύσταλλοι φαίνεται ότι μπορεί να συνδυαστεί και με δομές TMDCs (two-dimensional transition metal dichalcogenites), όπως MoS₂ και WSe₂, για να ενισχυθεί η απορρόφηση και η εκπομπή φωτός, όπως φαίνεται στο [53]

2.1.8

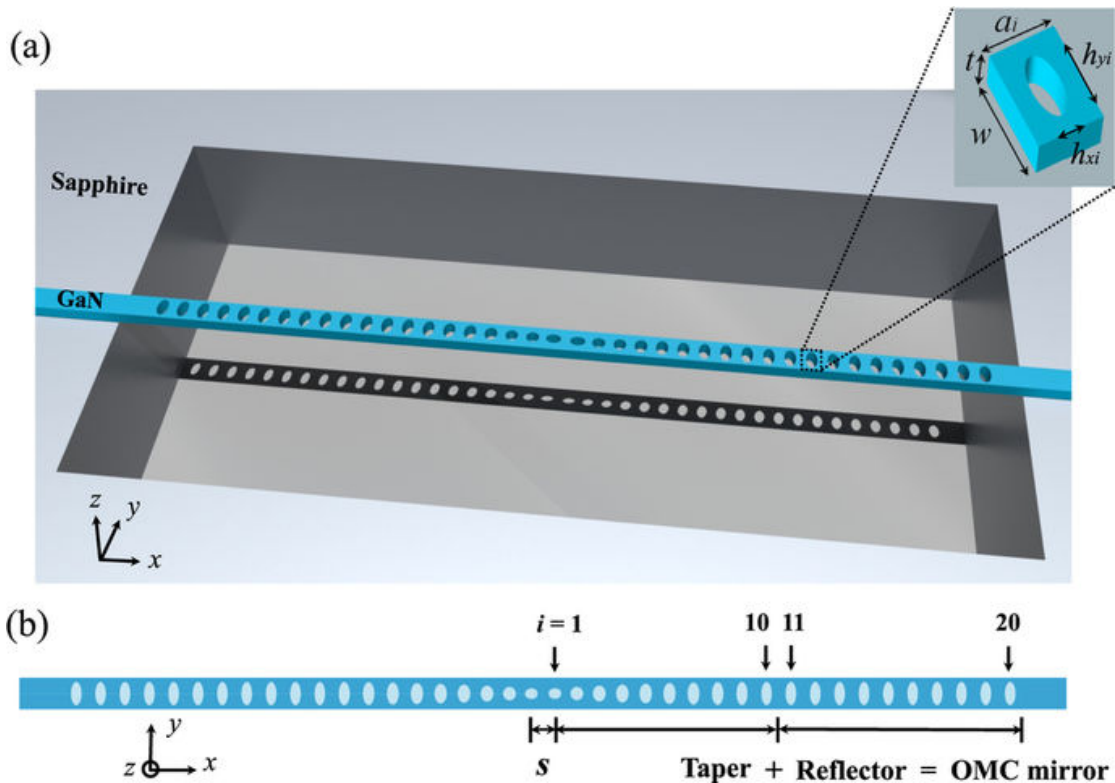
Οπτομηχανική (Optomechanics)

Οι οπτομηχανικές κρυσταλλικές κοιλότητες (OMC), που υποστηρίζουν υψηλό συνεντοπισμό οπτικών και μηχανικών ρυθμών, έχουν ξεκινήσει μια νέα εποχή για τον συνεκτικό έλεγχο της αλληλεπίδρασης φωτονίου-φωτονίου, σε τάξεις μεγέθους νανομέτρων. Οι οπτομηχανικές κρυσταλλικές κοιλότητες, που βασίζονται σε μια δομή νανοδεσμών φωτονικών κρυστάλλων, υποστηρίζουν υπερυψηλούς οπτικούς και μηχανικούς συντελεστές ποιότητας Q, μάζες ρυθμών (femtogram modal masses) τάξεις μεγέθους φεμτογραμμαρίων, μηχανικές ταλαντώσεις σε συχνότητες GHz και υψηλούς οπτομηχανικούς βαθμούς σύζευξης. Είναι πολύ επιθυμητά για resolved laser sideband cooling, ηλεκτρομαγνητικά προκαλούμενη διαφάνεια και υψηλής ταχύτητας ακουστοπτικές συσκευές υπερευαίσθητου εντοπισμού σήματος. Το πυρίτιο είναι η βασική πλατφόρμα για την υλοποίηση οπτομηχανικών κρυσταλλικών κοιλότητων. Επιπροσθέτως, ημιαγωγοί ευρέος χάσματος ζώνης μπορούν να προσφέρουν πολλές παραπάνω λειτουργικότητες, εξαιτίας της ευρείας οπτικής διαφάνειάς τους (transparency), της αμελητέας μη γραμμικής απορρόφησης, του υψηλού δείκτη Young και των ισχυρών πιεζοηλεκτρικών φαινομένων.

Σε διάφορες υλοποιήσεις που έχουν προταθεί είναι δύσκολο να πετύχουμε ταυτόχρονα υψηλό βαθμό οπτομηχανικής σύζευξης και μικρή μάζα ρυθμών. Στην πραγματικότητα η μάζα ρυθμών όλων των κατασκευασμένων οπτοηλεκτρικών κρυσταλλικών κοιλότητων, με οπτομηχανικό βαθμό σύζευξης πάνω από 1 MHz, έχουν περιοριστεί σε πάνω από 85.00 fg. Αυτός ο περιορισμός οφείλεται στη μείωση της χωρικής επικάλυψης μεταξύ οπτικών και μηχανικών ρυθμών. Από τη στιγμή που η ένταση του οπτικού ρυθμού είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του μηχανικού ρυθμού, το σύστημα υποφέρει από τη μείωση της οπτομηχανικής αλληλεπίδρασης, καθώς η μηχανική μάζα ρυθμών μειώνεται περαιτέρω.

Με σκοπό να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός προτείνονται στην [54] οπτομηχανικές κρυσταλλικές κοιλότητες βασισμένες σε GaN που λειτουργούν στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος. Με την ένταση της οπτικής λειτουργίας να ταιριάζει καλύτερα με την ένταση της μηχανικής λειτουργίας, οι οπτομηχανικές κρυσταλλικές κοιλότητες αυτού του είδους είναι ικανές να πετύχουν πολύ μικρές

μάζες ρυθμών με υψηλό οπτομηχανικό βαθμό σύζευξης. Συγκρινόμενες με άλλους ημιαγωγούς ευρέος χάσματος ζώνης, το βασικό πλεονέκτημα του GaN είναι η εκπομπή στην άκρη της ζώνης που καλύπτει τη ζώνη φάσματος των υπεριωδών συχνοτήτων, για ολοκληρωμένα οπτομηχανικά και οπτοηλεκτρικά κυκλώματα, σε μία μόνο συσκευή. Οι ώριμες τεχνολογίες σύνθεσης, νόθευσης και επιταξιακής ανάπτυξης, έχουν οδηγήσει σε ανάπτυξη διόδου laser υψηλής ισχύος και σε φωτοαισθητήρες υψηλής αποκρισιμότητας, βασισμένο σε δομές InGaN/GaN πολυκβαντικών πηγαδιών. Έχουν χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση παθητικών φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, δαχτυλιδιών συντονισμού και κοιλοτήτων δισδιάστατων φωτονικών κρυστάλλων. Το GaN θα μπορούσε επίσης να είναι μια υποσχόμενη πλατφόρμα για την ανάπτυξη ενεργών οπτομηχανικών κοιλοτήτων στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας, για να μελετηθεί η ισχυρή σύζευξη μεταξύ φωτονίων, φωνονίων GHz και ηλεκτρονίων σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, ισχυρής διαμόρφωσης laser ημιαγωγών και ενισχυμένου ground-state cooling από οπτομηχανικές αλληλεπιδράσεις. Στην εν λόγω δημοσίευση σχεδιάζεται και ερευνάται με αριθμητικές μεθόδους, βασισμένες σε κοιλοότητες νανοδεσμών οπτομηχανικών κρυστάλλων GaN, συντονισμένες σε πολύ μικρό οπτικό μήκος κύματος και ταλαντευόμενες σε υψηλή μηχανική συχνότητα. Επιπλέον βελτιστοποιήθηκε η δομή χάρη στη ρύθμιση των οπτομηχανικών κρυσταλλικών καθρεπτών, για να επιτευχθεί πολύ υψηλός οπτικός και μηχανικός συντελεστής ποιότητας, με βαθμό οπτομηχανικής σύζευξης μεγαλύτερης του 1 MHz.



Σχήμα 2.24: Οπτομηχανική διάταξη (α) Γωνιακή επισκόπηση. Το ένθετο είναι ένα κελί μονάδας με ετικέτες διαστάσεων νανομέτρων. (β) Κάτω

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

όψη. Η κοιλότητα των νανοσωματιδίων OMC κατασκευάζεται συνδυάζοντας δύο καθρέφτες OMC με ένα ρυθμιζόμενο μήκος κοιλότητας s , ενώ κάθε καθρέπτης OMC αποτελείται τόσο από κωνικότητα ($i = 1-10$) όσο και από ανακλαστήρα ($i = 11-20$).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24 μια κοιλότητα νανοδέσμης οπτομηχανικού κρυστάλλου υποστηρίζει ταυτόχρονα οπτική και μηχανική λειτουργία στην κεντρική της περιοχή, επειδή παρέχει μια αποτελεσματική δυνατότητα πραγμάτωσης και για τις δύο λειτουργίες. Το σχήμα 2.24 δείχνει μια συνολική εικόνα της οπτομηχανικής κρυσταλλικής κοιλότητας, βασισμένη στο GaN. Η νανοδέσμη GaN από πάνω και το επιλεκτικά χαραγμένο υπόστρωμα sapphire έχουν μπλε και λευκό χρώμα, αντίστοιχα. Οι ελλειπτικές οπές αέρα εισάγονται για να επιτευχθεί η δυνατότητα για οπτικές και μηχανικές λειτουργίες. Αυτές οι οπές τοποθετούνται συμμετρικά κατά μήκος της νανοδέσμης, με άξονα το κέντρο της. Ως εκ τούτου η οπτομηχανική κοιλότητα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως κοιλότητα Fabry-Perot, της οποίας οι καθρέφτες παρέχουν υψηλή ανάκλαση για φως και ήχο ταυτόχρονα. Συνεπακόλουθα, μπορούμε να αναφερόμαστε στη μία πλευρά της συστοιχίας οπών ως οπτομηχανικό κρυσταλλικό καθρέπτη, του οποίου οι απώλειες ανάκλασης καθορίζουν απευθείας τους εσωτερικούς οπτικούς και μηχανικούς συντελεστές ποιότητας Q. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24 η οπή κοιλότητας αποτελείται από δύο πανομοιότυπους καθρέφτες OMC, οι οποίοι αποτελούνται από ένα στένεμα των οπών και έναν ανακλαστήρα, με προσαρμοζόμενο μήκος κοιλότητας στο κέντρο.

2.1.9 Συμπεράσματα για τους φωτονικούς κρυστάλλους.

Η έρευνα πάνω στους φωτονικούς κρυστάλλους, όπως συμβαίνει συχνά με την βασική έρευνα πάνω σε οποιοδήποτε νέο, ελπιδοφόρο και πολλά υποσχόμενο τομέα που αναπτύσσεται, περνάει μέσα από πολλά και διαφορετικά μονοπάτια. Παρά την αρχική κατάταξη σε κάποιον υποτομέα, θα λέγαμε, των μεταϋλικών, σιγά σιγά οι φωτονικοί κρύσταλλοι έχουν αποκτήσει την δική τους επιστημονική υπόσταση. Η αρχική ενασχόληση με τα φαινόμενα της οπτικής και το ενδιαφέρον που εστιάστηκε στη δημιουργία αρνητικού δείκτη διάθλασης, με όλα τα ερευνητικά συνεπακόλουθα (αρνητική διάθλαση, αντιστροφή φαινομένου Doppler, αορατότητα και ηλεκτρομαγνητικοί μανδύες), άφησαν τη θέση τους σε τρέχοντα ζητήματα της σύγχρονης μηχανικής και κυρίως του τομέα των τηλεπικοινωνιών.

Το βασικό θέμα που μελετάται πλέον είναι η χρήση των δομών των φωτονικών κρυστάλλων σε σχέση με την ικανότητά τους να αλληλεπιδρούν με το φως. Ως εκ τούτου παρατηρούμε ότι τα περισσότερα αποτελέσματα αφορούν στην έρευνα πάνω σε κβαντικά φαινόμενα, την

φωτονική, τα lasers, την απεικόνιση, τους αισθητήρες, αλλά και λίγο πιο εξειδικευμένα ζητήματα όπως τις δομές Bragg, τις μη γραμμικότητες, τα οποία όμως περιστρέφονται τελικά και αυτά γύρω από την υλοποίηση δομών, διατάξεων και συσκευών για χρήση στα προαναφερθέντα πεδία. Παρατηρούμε δηλαδή μια προσπάθεια να χρησιμοποιήσουμε τους φωτονικούς κρυστάλλους και κυρίως δομές συναποτελούμενες και από φωτονικούς κρυστάλλους, για να βελτιώσουμε, να βελτιστοποιήσουμε ή και να ριζοσπαστικοποιήσουμε τεχνολογίες που ήδη υπάρχουν, κυρίως επικεντρωνόμενοι στην μεγάλη μετάβαση που ήδη σε κάποιο βαθμό έχει ξεκινήσει, από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα και δίκτυα στα φωτονικά. Μια αλλαγή που στοχεύει κυρίως στην δραστική αύξηση της ταχύτητας, στη μεταφορά δεδομένων (όπως εν πολλοίς έχει ήδη διαδραματιστεί με την ανάπτυξη και χρήση των οπτικών ινών), αλλά και ιδανικά με την επεξεργασία της πληροφορίας, είτε σε πιο εξειδικευμένο και απλό επίπεδο, όπως συμβαίνει κυρίως με τηλεπικοινωνιακές συσκευές (μεταγωγείς, συζεύκτες, πολυπλέκτες, διαμορφωτές, διόδους κλπ.), είτε ιδανικά με τη δημιουργία δυνατοτήτων ανάπτυξης οπτικών επεξεργασιών.

Οι φωτονικοί κρύσταλλοι διαρκώς κερδίζουν έδαφος σε αυτά τα πεδία, δίχως όμως ακόμα να έχουν μπορέσει να παράξουν αξιόπιστες λύσεις και συμπαγείς, ολοκληρωμένες δομές, έτοιμες να βγουν σε παραγωγή. Παρά ταύτα, όπως η χρονική απόσταση ανάμεσα στη δημιουργία του τρανζίστορ και την άνθηση της ηλεκτρονικής υπήρξε σημαντική, έτσι υπολογίζεται ότι βρισκόμαστε ακόμα στο στάδιο της αναμονής και μέσα στα επόμενα χρόνια όλο και περισσότερες συσκευές, συναποτελούμενες από φωτονικούς κρυστάλλους, θα βγουν στην παραγωγή και την αγορά, αποτελώντας μέρος της συνολικότερης επανάστασης και μετάβασης στην εποχή της χρήσης συσκευών με οπτικά στοιχεία, την οποία εδώ και καιρό έχουν οραματιστεί, επιστήμονες και μηχανικοί.

Η πολυπλοκότητα κυρίως όσον αφορά την κατασκευή των δομών φωτονικών κρυστάλλων, που έχει σαν συνεπακόλουθο τη δυσκολία μελέτης των ιδιοτήτων τους και ιδίως όσον αφορά τους πολλά υποσχόμενους σε θεωρητικό επίπεδο δισδιάστατους και τρισδιάστατους φωτονικούς κρυστάλλους, καθώς και το ζήτημα των μεγάλων απωλειών είναι τα βασικά θέματα που έχουν κρατήσει πίσω την υλοποίηση και πραγμάτωση των αρχικών προσδοκιών για τους φωτονικούς κρυστάλλους. Η έρευνα συνεχίζεται όμως αν όχι με αυξανόμενους, σίγουρα με σταθερούς ρυθμούς και τα αποτελέσματα είναι πολλά και ενδιαφέροντα. Η διαρκής βελτίωση των παραμέτρων, του συντελεστή ποιότητας, της ελαχιστοποίησης των απωλειών, των όλο και πιο περίπλοκων και εξειδικευμένων δομών, δείχνει ότι το πεδίο αυτό της έρευνας βρίσκεται σε άνθηση.

Ταυτόχρονα, το ενδιαφέρον που επιδεικνύουν δομές αναφορικά με τα κβαντικά φαινόμενα, έναν τομέα που έχει δημιουργήσει τεράστιες προσδοκίες, κυρίως λόγω του οραματισμού της κβαντικής πληροφορικής, αλλά μέχρι στιγμής δεν έχουν παραχθεί τα ανάλογα αποτελέσματα, καταδεικνύει το γεγονός ότι οι φωτονικοί κρύσταλλοι βρίσκονται στην αιχμή του δόρατος της τεχνολογίας. Διαφαίνεται η πιθανότητα να προκύψουν αποτελέσματα και φαινόμενα απροσδόκητα με μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς ακόμα είναι σίγουρο ότι οι φωτονικοί κρύσταλλοι δεν έχουν φτάσει στο σημείο να υλοποιήσουν και να πραγματώσουν το δυναμικό τους.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Το στοιχείο αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι βρισκόμαστε ακόμα πίσω σε σχέση με την κατασκευή και μελέτη των τρισδιάστατων φωτονικών κρυστάλλων και του περίφημου πλήρους φωτονικού χάσματος και των δυνατοτήτων που αυτό προσφέρει.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι οι φωτονικοί κρύσταλλοι δεν έχουν καταφέρει να πραγματώσουν τις προσδοκίες που δημιουργήθηκαν 20 και πλέον χρόνια πριν, αλλά παραμένουν ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο που παράγει διαρκώς καινούρια αποτελέσματα, ενισχύοντας πολλούς τομείς της σύγχρονης μηχανικής. Η έρευνα συνεχίζεται και δεν αποκλείεται στο μέλλον να υπάρξουν εξελίξεις που θα δραστηριοποιήσουν τις μεθόδους κατασκευής τους, οι οποίες θα αποτελέσουν καταλύτη για την περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη αυτών και των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους, προσφέροντας καινοτόμες τεχνολογίες.

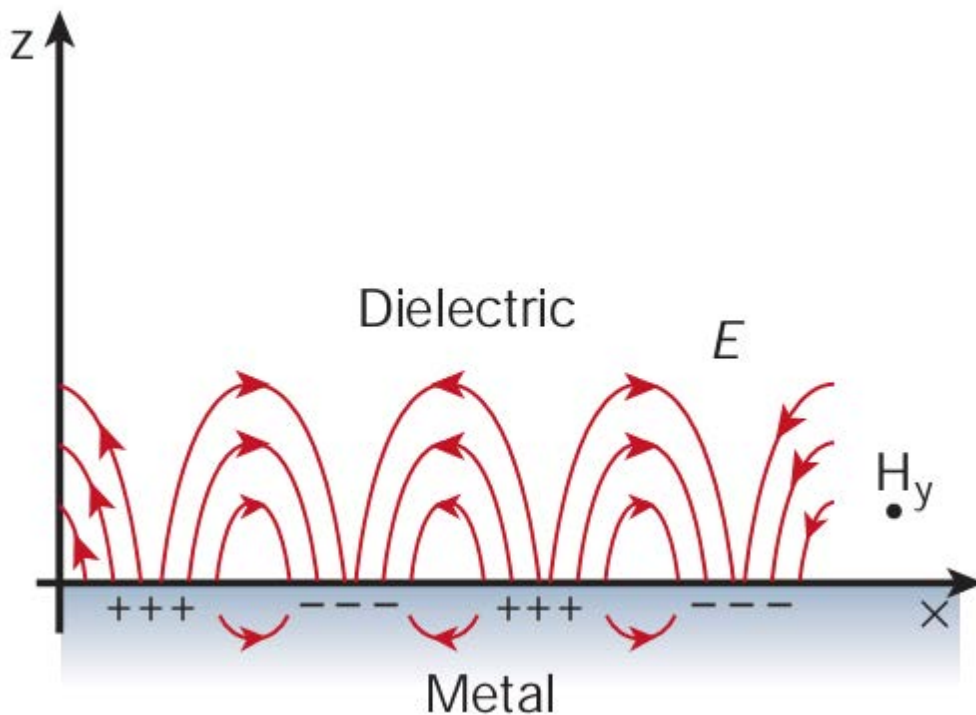
Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Πλασμόνια

3.1

Τα επιφανειακά πλασμόνια

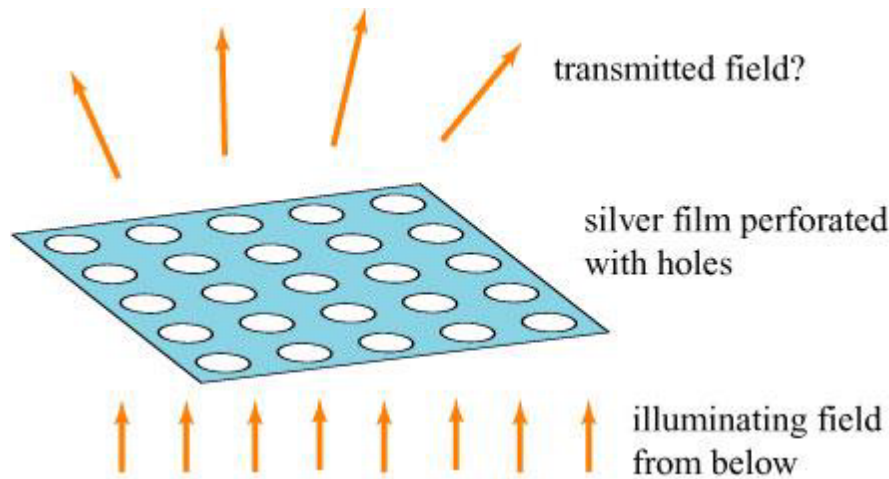
Η έννοια του πλασμονίου ως θεωρητικού σωματιδίου (quasiparticle) διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον R.H. Ritchie το 1957[55], για να εξηγήσει τις ιδιαίτερες απώλειες που παρατηρούσε στα ηλεκτρόνια που ταξίδευαν με ταχύτητα μέσα από λεπτά μεταλλικά στρώματα. Το πλασμόνιο ήταν ουσιαστικά το κβάντο της διαταραχής της πυκνότητας των ηλεκτρονίων μέσα σε αγωγίμα μέσα. Όταν το μέταλλο-αγωγός έρθει σε επαφή με κάποιο διηλεκτρικό (για παράδειγμα τον αέρα), στην διεπαφή μεταξύ τους δημιουργούνται τα λεγόμενα *επιφανειακά πλασμόνια*, που δεν είναι παρά «κύματα» ηλεκτρονιακών διεγέρσεων – συλλογικές διεγέρσεις ηλεκτρονίων - που συμπυκνώνονται στην διεπαφή, και εξασθενούν εκθετικά μέσα στα δύο γειτονικά υλικά (Σχήμα 3.1):



Σχήμα 3.1: Επιφανειακό πλασμόνιο στην διεπαφή μετάλλου-διηλεκτρικού

Με πιο απλά λόγια τα ηλεκτρόνια, σύμφωνα με τις αρχές της κβαντομηχανικής, συμπεριφέρονται ως κύματα και τα κύματα αυτά απλώνονται στην επιφάνεια του μετάλλου, όπως περίπου απλώνονται τα κύματα στην επιφάνεια μιας λίμνης, όταν περνάει ένα πλεούμενο. Στην περίπτωση μας, το «πλεούμενο» αυτό μπορεί να είναι ένα φωτόνιο από προσπίπτον φως, η σύζευξη του οποίου με το επιφανειακό πλασμόνιο δημιουργεί το λεγόμενο *Surface Plasmon Polariton (SPP)*.

Όλες αυτές οι θεωρητικές διατυπώσεις δεν τράβηξαν και πολύ το ενδιαφέρον μέχρι το 1998, όταν ο T.W. Ebbesen παρατήρησε σε ένα πείραμα το εξής περίεργο: Αφού κατασκεύασαν ένα πολύ λεπτό (200nm) φύλλο ασημιού, του οποίου η επιφάνεια ήταν γεμάτη από μικροσκοπικές τρύπες διαμέτρου 150nm – δηλαδή λιγότερο από το μήκος κύματος του ορατού φωτός – παρατηρήθηκε πως αν πέσει φως επάνω σε αυτή την επιφάνεια, όχι μόνο δεν θα υποστεί ολική περίθλαση (σύμφωνα με το όριο περίθλασης-diffraction limit) αλλά ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειάς του είναι μετρήσιμο από την άλλη μεριά, πολλές φορές με το ποσοστό να υπερβαίνει το 100% (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Φύλλο ασημιού στο πείραμα Ebbesen

Ουσιαστικά, το παράδοξο που συμπέρανε ο Ebbesen ήταν ότι όχι μόνο το φως περνούσε από τις τρύπες, αλλά ήταν και σαν να ενισχυόταν από αυτές. Η εξήγηση που δόθηκε, μετά και από κάποιες παρατηρήσεις του P.A. Wolff, ήταν πως αυτή η συμπεριφορά οφειλόταν στα επιφανειακά πλασμόνια. Το οπτικό κύμα που προσπίπτει στην μεταλλική επιφάνεια διεγείρει πλασμόνια στις τρύπες, δημιουργώντας SP polaritons. Αυτά ταξιδεύουν σε άλλες τρύπες και μπορεί, αλληλεπιδρώντας με άλλα polaritons καθώς και με το πεδίο που περνά μέσα από τις τρύπες, να δημιουργήσουν ενισχυτική συμβολή. Αυτό το φαινόμενο συντονισμού ενισχύει το πεδίο σε κάθε μία από τις τρύπες, όπου μετατρέπεται πάλι σε ένα κύμα φωτός κατά την έξοδό του. Το φαινόμενο αργότερα ονομάστηκε “Extraordinary optical transmission”.

Το πραγματικά επαναστατικό με αυτή την ανακάλυψη ήταν πως υπάρχει μηχανισμός, ο οποίος, κόντρα στην παραδοσιακή οπτική, επιτρέπει την διέλευση φωτός από μέσο με μικρότερες διαστάσεις από το μήκος κύματος (sub-wavelength confinement). Με αφετηρία αυτό το πείραμα, αναγεννήθηκε το ενδιαφέρον για τα πλασμόνια, δημιουργώντας ένα νέο τομέα της φωτονικής, το *plasmonics* (Πλασμονική).[56]

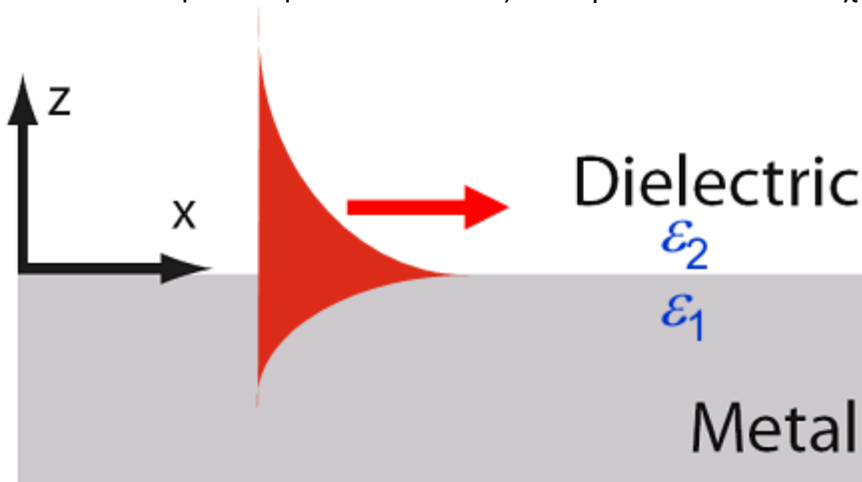
3.1.1

Πλασμονική και εφαρμογές

Στα χρόνια που μεσολάβησαν ως σήμερα, έχουν προταθεί διάφορες αρχιτεκτονικές μεταλλικών νανοκατασκευών για την κυματοδότηση των SPP. Ενώ τα SPP είναι πολλά υποσχόμενα, όσον αφορά την ολοκλήρωση των διασυνδέσεων, παρόλα αυτά συνοδεύονται από κάποια μειονεκτήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Οι βασικότεροι και εγγενείς παράγοντες που διέπουν την αποτελεσματική διάδοση ενός SPP είναι οι *απώλειες διάδοσης* (propagation losses), που προκύπτουν λόγω της διαφυγής μέρους της ενέργειας του SPP στα περιβάλλοντα υλικά, και οι *απώλειες λόγω καμπυλότητας* (bend losses), που παραπέμπουν στο αντίστοιχο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι οπτικές ίνες, την διαρροή στο περιβάλλον υλικό. Κάθε πλασμονική αρχιτεκτονική βασίζεται στο να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά μία από τις δύο απώλειες (ή και τις δύο) ενώ ταυτόχρονα να συμπιέζει την διάδοση των SPP σε όσο το δυνατόν μικρότερες φυσικές διαστάσεις. Επίσης κρίσιμος παράγοντας είναι ο *ενεργός δείκτης διάθλασης* (effective refractive index), δηλαδή ο δείκτης διάθλασης που θα αντιμετωπίζει το εκάστοτε πλασμόνιο κατά την διάδοση του μέσα από τον κυματοδηγό.

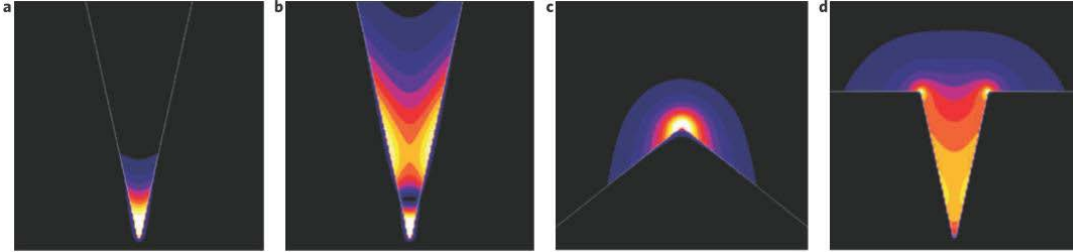
Πιο πριν αναφέραμε πως το πλασμόνιο εξασθενεί εκθετικά μέσα στο μέταλλο και το διηλεκτρικό, και πως περιορίζεται αποτελεσματικά κυρίως στην διεπαφή των δύο υλικών. Η ιδιότητα αυτή αποτυπώνεται ξεκάθαρα στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3.3):



Σχήμα 3.3: Κατανομή πεδίου στην διεπαφή κατά την διάδοση πλασμονίου

Η εφαρμογή της πλασμονικής βασίζεται στον *συνδυασμό των πλεονεκτημάτων* που προσέφεραν στο παρελθόν οι τομείς της ηλεκτρονικής πυριτίου (silicon electronics) και της φωτονικής (photonics). Δηλαδή είτε θα έχουμε μικρές διαστάσεις/υψηλή ολοκλήρωση (ηλεκτρονική) είτε υψηλές ταχύτητες και χαμηλές απώλειες (φωτονική). Η ελπίδα για συνδυασμό των ιδιοτήτων αυτών περνά στην *φωτονική πυριτίου* (silicon photonics) και την πλασμονική.

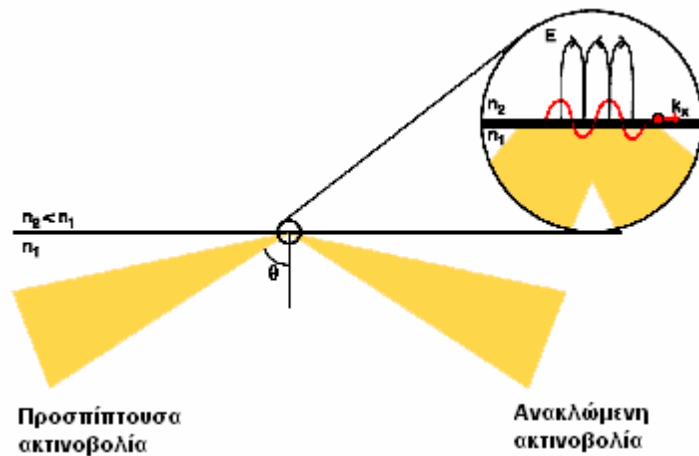
Μεταξύ των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών είναι τα λεπτά μεταλλικά φύλλα, αλυσίδες από μεταλλικά νανοσωματίδια, κυλινδρικές μεταλλικές βέργες, μεταλλικές λωρίδες πάνω σε διηλεκτρικό υπόστρωμα, κενά ανάμεσα σε μεταλλικά μέσα, κυματοδηγοί σχισμής σε μεταλλικά φύλλα, αιχμηρές μεταλλικές σφήνες, αυλάκια σε μεταλλικά υποστρώματα, και υβριδικοί κυματοδηγοί από διηλεκτρικά σύρματα πάνω σε μεταλλικό στρώμα (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Διάφορες αρχιτεκτονικές πλασμονικών κυματοδηγών και αντίστοιχες κατανομές πεδίου

Όπως γνωρίζουμε ήδη από την συμβατική οπτική, είναι δυνατόν να μειώσουμε δραστικά τις φυσικές διαστάσεις του κυματοδηγού με χρήση δείκτη διάθλασης μεγάλης αντίθεσης, δηλαδή κατασκευάζοντας τον κυματοδηγό μας ώστε να έχει δείκτη διάθλασης πολύ μεγαλύτερο από το περιβάλλον μέσο. Σε μια παρόμοια, πρόσφατη πρόταση, η αρχιτεκτονική βασίζεται σε μία ράχη από διηλεκτρικό υλικό τοποθετημένη πάνω σε ένα λεπτό φύλλο μετάλλου. Βάσει ανάλογης ορολογίας της οπτικής, η αρχιτεκτονική αυτή ονομάζεται *Dielectric-loaded SPP waveguide* (DLSPPW) και θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια.

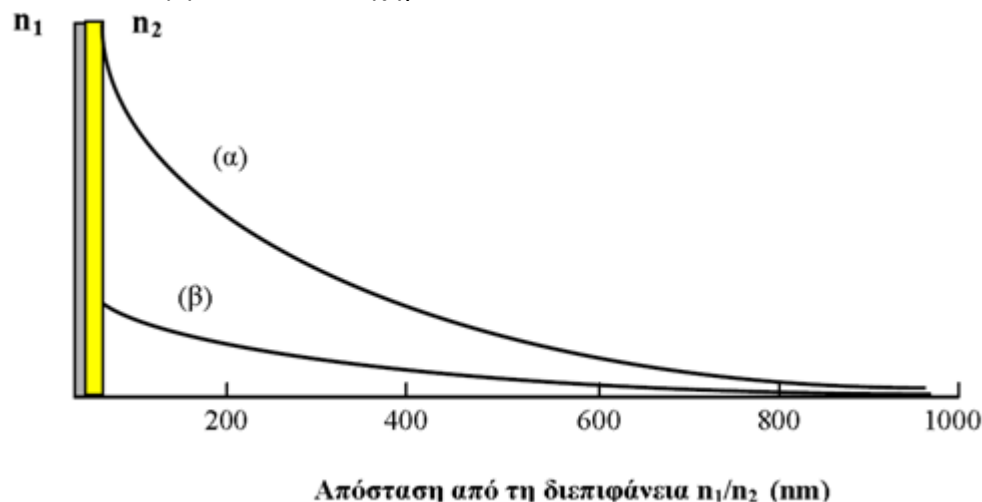
Ο συντονισμός επιφανειακών πλασμονίων (Surface Plasmon Resonance, SPR) είναι μια ευαίσθητη οπτική τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μελέτη επιφανειακών φαινομένων πάνω σε ένα λεπτό στρώμα ενός μετάλλου. Η εφαρμογή της SPR βασίζεται στην αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων του προσπίπτοντος, μονοχρωματικού, γραμμικά πολωμένου φωτός και των ελεύθερων ηλεκτρονίων (νέφος ευκίνητων ηλεκτρονίων) που βρίσκονται στην επιφάνεια του μεταλλικού αγωγού. Προκειμένου να περιγράψουμε το φαινόμενο SPR, είναι χρήσιμο να ορίσουμε πρώτα το φαινόμενο της **ολικής (εσωτερικής) ανάκλασης** (total internal reflection). Όταν μια ακτίνα φωτός, η οποία διαδίδεται μέσω ενός υλικού με υψηλό δείκτη διάθλασης, n_1 (π.χ. κρύσταλλος χαλαζία), φτάσει στην διεπιφάνεια με ένα υλικό με μικρότερο δείκτη διάθλασης, n_2 (π.χ. νερό), με γωνία πρόσπτωσης $\theta > \theta_c$, όπου θ_c η **κρίσιμη ή οριακή γωνία**, το φως ανακλάται πλήρως. Αυτό σημαίνει ότι το φως που προσπίπτει πάνω στη διεπιφάνεια των δύο μέσων δεν μπορεί να εισχωρήσει στο υλικό με το μικρότερο δείκτη διάθλασης, παγιδεύεται στο υλικό με το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης και ανακλάται εξ ολοκλήρου εσωτερικά της διεπιφάνειας (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Εσωτερική ολική ανάκλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας σε μια διεπιφάνεια με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2 . Η ερμηνεία του ανύσματος k_x δίνεται παρακάτω.

Μολονότι η ολικά ανακλώμενη ακτινοβολία διατηρεί στο ακέραιο την αρχική της ενέργεια, μια συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του φωτός διαπερνά το μέσο με το χαμηλό δείκτη διάθλασης δημιουργώντας ένα αποσβεννύμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (evanescent field, E), το πλάτος του οποίου μειώνεται εκθετικά, με την αύξηση της απόστασης από τη διεπιφάνεια. (Σχήμα 3.6)

Όταν μια λεπτή στρώση χρυσού (50 nm) τοποθετηθεί εντός του αποσβεννύμενου πεδίου, τότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του χρυσού στην διεπιφάνεια με το υλικό χαμηλού δείκτη διάθλασης, τα οποία καλούνται επιφανειακά **πλασμόνια** (surface plasmons) διεγείρονται και προκαλούν ενίσχυση της έντασης του αποσβεννύμενου πεδίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Μείωση του αποσβεννύμενου πεδίου συναρτήσει της απόστασης από την διεπιφάνεια στερεού/διηλεκτρικού (α) παρουσία και (β) απουσία του φιλμ χρυσού.

Το διάνυσμα διάδοσης (propagation vector) ή κυματοδιάνυσμα των επιφανειακών

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

πλασμονίων (wave-vector of the surface plasmons), k_{sp} , το οποίο οδεύει κατά μήκος του αγωγού και παράλληλα στη διεπιφάνεια με το υλικό χαμηλού δείκτη διάθλασης, μπορεί να περιγραφεί με την εξίσωση (20)

$$k_{sp} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \sqrt{\left[\frac{n_{Au}^2 n^2}{n_{Au}^2 + n^2}\right]} \quad (20)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο κενό και n_{Au}^2 , n^2 οι δείκτες διάθλασης της μεταλλικής επιφάνειας και του διηλεκτρικού εγγύς της μεταλλικής επιφάνειας (εντός του αποσβεννύμενου πεδίου, δηλαδή σε απόσταση <400 nm) αντίστοιχα. Επίσης, το διάνυσμα διάδοσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, k_x , το οποίο οδεύει παράλληλα του k_{sp} , ισούται με

$$k_x = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) n_1 \sin(\theta) \quad (21)$$

Για μια συγκεκριμένη τιμή του διανύσματος k_x (ή γωνία πρόσπτωσης $\theta = \theta_{sp}$), όπου $k_x = k_{sp}$, έχουμε το φαινόμενο συντονισμού των επιφανειακών πλασμονίων (μέγιστη απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας). Η γωνία θ_{sp} ονομάζεται **γωνία συντονισμού** και σε αυτή την γωνία η καμπύλη της έντασης της ανακλώμενης ακτινοβολίας ως προς την γωνία πρόσπτωσης, $R(\theta) = f(\theta)$, παρουσιάζει ελάχιστο. Η πλασμονική είναι μια αναδυόμενη περιοχή της επιστήμης και της τεχνολογίας, στην οποία η διάδοση του φωτός μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση δομών που λειτουργούν σε περιοχές μικρότερες του μήκους κύματος. Οι εφαρμογές εστίασης της πλασμονικής περιλαμβάνουν σκέδαση Raman ενισχυμένης επιφάνειας, αισθητήρες συντονισμού επιφανειακών πλασμονίων, και συστήματα φασματοσκοπίας επιφανειακών πλασμονίων. Διάφορα πεδία όπως η χημεία, η βιολογία, η φυσική και η επιστήμη των υλικών έχουν ευεργετηθεί σημαντικά από την πρόοδο της πλασμονικής.

Η βασική ιδιότητα από την οποία επωφελείται η πλασμονική, δηλ. ο περιορισμός των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε μικρότερες κλίμακες, την διαφοροποιεί από άλλες συμβατικές τεχνικές εστίασης, όπως είναι οι διηλεκτρικοί φακοί. Πολλές εφαρμογές υποστηρίζονται από αυτό το έμφυτο χαρακτηριστικό, καθώς διευκολύνει τη βελτίωση της συλλογής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (όπως για παράδειγμα στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές) και την καλύτερη απεικόνιση της χωρικής ανάλυσης, ιδιαίτερα σε μη γραμμικές συσκευές όπως τα λέιζερ. Επίσης, το φαινόμενο χρησιμοποιείται πλήρως σε εφαρμογές αισθητήρων στη βιοχημεία, σε διακόπτες ελέγχου, σε ενισχυτές σήματος και σε διαμορφωτές που βασίζονται σε SPPs.

Το 1942, η Bethe προέβλεψε ότι η ένταση μετάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διέρχονται από κυκλικά ανοίγματα μικρότερα του μήκους κύματος, σχεδιασμένα σε ένα οπτικώς παχύ μεταλλικό στρώμα, είναι ανάλογη προς $pd = \lambda/4$, όπου d είναι η διάμετρος των κυκλικών ανοιγμάτων και λ είναι το μήκος κύματος

του φωτός. Το 1957, ο R. H. Ritchie ανακάλυψε ότι τα ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια έχασαν την ενέργειά τους όταν διήλθαν μέσα από ένα λεπτό μεταλλικό φιλμ. Πρόβλεψε ότι αυτό μπορεί να οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες ταλαντώσεις που υπήρχαν στις μεταλλικές επιφάνειες. Αργότερα, ο Powel και ο Swan απέδειξαν τον ίδιο μηχανισμό μέσω πειραμάτων. Ο Raether διέκρινε επίσης τη μοναδική συμπεριφορά μετάλλων να έχουν εύκολα αναπτυσσόμενες συλλογικές διεγέρσεις ηλεκτρονίων. Χρόνια μετά από αυτές τις προβλέψεις, το 1998, ο Ebbesen διενήργησε εντατική έρευνα και διερεύνησε εξαιρετικές οπτικές μεταδόσεις σε περιοδικές συστοιχίες οπών, σε οπτικά παχύ μεταλλικό φιλμ. Ανακαλύφθηκε ασυνήθης μετάδοση του φωτός, η οποία ήταν τάξεις μεγέθους υψηλότερη από αυτή που θεωρητικά ανέμενε η Bethe στην κλασική θεωρία διαφράγματος. Μετά από αυτή την ανακάλυψη, πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμα πειράματα και θεωρητικές ερευνητικές προσπάθειες για τη διευκρίνιση αυτού του κρυμμένου φαινομένου, που είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές εξελίξεις στις πλασμονικές εφαρμογές .

Τα πολαριτόνια επιφανειακών πλασμονίων συνδέονται με μια ευρύτερη κατηγορία ηλεκτρομαγνητικών λύσεων, γενικά γνωστών ως κύματα Zenneck ή κύματα Sommerfeld , των οποίων ο περιορισμός είναι ασθενής στην επιφάνεια. Ωστόσο, τα SPPs διαδίδουν κύματα που εντοπίζουν πολύ το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια διέγερσης. Ανεξάρτητα από τις εξαιρετικές πλασμονικές τους ιδιότητες, του ισχυρότερου περιορισμού του πεδίου και της ενίσχυσης των μεταλλικών επιφανειών στις οπτικές συχνότητες , τα SPPs δεν μπορούν να διεγερθούν φυσικά σε χαμηλές συχνότητες σε ζώνες THz / MW, όπου ένα μέταλλο συμπεριφέρεται ως τέλειος ηλεκτρικός αγωγός (PEC) . Για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία και να αναπτυχθούν ισχυρά περιορισμένα SPPs σε περιοχές χαμηλότερων συχνοτήτων, έχουν προταθεί πολαριτόνια επιφανειακών πλασμονίων (SPPs) σε συνδυασμό με την ιδέα της χρήσης μεταϋλικών . Τα επιφανειακά ανάγλυφα συμπληρώνονται με χρήση αυλακώσεων, οπών, σχισμών και μπλοκ στις αγωγίμες επιφάνειες, σε κλίμακες μήκους κύματος μικρότερες αυτής που αντιστοιχούν στη συχνότητα λειτουργίας, για την υποστήριξη των SPPs σε περιοχές MW και THz. Αυτά τα πλασμονικά μεταϋλικά περιλαμβάνουν μια μονοδιάστατη συστοιχία από αυλακώσεις σε κλίμακες μήκους κύματος μικρότερες αυτών που αντιστοιχούν στη συχνότητα λειτουργίας , δισδιάστατες συστοιχίες από κοιλώματα ή λόφους , ή τρισδιάστατες περιοδικές συστοιχίες κυκλικών αυλακώσεων σε τέλεια αγωγήμα σύρματα . Μιμούνται τις εξωτικές ιδιότητες των φυσικών SPP και τα χαρακτηριστικά διασποράς και χωρικού περιορισμού μπορούν να σχεδιαστούν κατά βούληση, ρυθμίζοντας τις γεωμετρικές παραμέτρους . Ως εκ τούτου, έχουν προετοιμάσει ένα δρόμο για την υλοποίηση των SPPs σε χαμηλότερες συχνότητες, παρουσιάζοντας ιδιότητες παρόμοιες με τις φυσικές των SPPs στις οπτικές συχνότητες.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Με την ικανότητα να διεγείρουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε μια κλίμακα μήκους κύματος μικρότερου του φωτός, τα SPPs έχουν ευρέως προσαρμοστεί στις εφαρμογές σε συχνότητες THz. Ωστόσο, ήταν αρχικά αναμενόμενο ότι οι υψηλές αγωγιμότητες των μετάλλων θα μπορούσαν να αποτελέσουν εμπόδιο στην προσαρμογή των SPPs στην περιοχή των THz. Αντιθέτως, τα SPPs έχουν επιτυχώς εξαχθεί σε μέταλλο-διηλεκτρικές διεπαφές, χρησιμοποιώντας σύζευξη πρίσματος, σύζευξη παροδικού πεδίου και, μέσω δισδιάστατων συστοιχιών διάτρησης, σε μέταλλα. Έχει δημιουργηθεί ένας αριθμός πρακτικών εφαρμογών με την ικανοποιητική χρήση των SPPs στις συχνότητες THz, όπως στον τομέα της χημικής καθώς και της βιολογικής φασματοσκοπίας, σε επικοινωνίες υψηλής συχνότητας, ακριβείς αισθητήρες, οπτικές κεραίες, σύγχρονη τεχνολογία απεικόνισης, φωτοανιχνευτές, φασματοσκοπία απώλειας ενέργειας ηλεκτρονίων, καθοδική φωταύγεια, ασφάλεια και επιτήρηση, μη καταστροφική φασματοσκοπία, βιοαισθητήρες και πολλά άλλα. Ο ερευνητικός τομέας της πλασμονικής έχει δώσει πολλά ενδιαφέροντα ευρήματα κατά την τελευταία δεκαετία, και είναι πιθανό να οδηγήσει σε πολυάριθμες ελκυστικές προοπτικές εφαρμογών.[57]

3.1.2

Κβαντική πλασμονική (Quantum plasmonics)

Για αρκετά χρόνια, οι μελέτες που επικεντρώνονται στην κβαντική φύση των πλασμονίων εξελίσσονται ταχύτατα. Συγκεκριμένα το φωτεινό πεδίο αλληλεπιδρά με την ύλη σε νανομετρική κλίμακα και τα πλασμόνια παίζουν κάποιο ρόλο στον έλεγχο των αλληλεπιδράσεων ύλης-φωτός στο κβαντικό επίπεδο. Αυτό το νέο ερευνητικό πεδίο ονομάζεται «κβαντική πλασμονική». Η κβαντική πλασμονική έχει ανοίξει ένα νέο μέτωπο στη μελέτη της θεμελιώδους φυσικής των LSPs, ήτοι του διαχωρισμού κενού Rabi και του φαινομένου Fano και τώρα παρέχουν νέες δυναμικές εφαρμογές πλασμονίων, όπως πηγές ενός φωτονίου, πηγές συζευγμένων φωτονίων και συσκευές με κβαντική ρύθμιση στη νανομετρική κλίμακα

Η κβαντική νανοπλασμονική έχει γίνει ένα ταχέως αναπτυσσόμενο πεδίο νανοοπτικών, λόγω της μοναδικής ικανότητας των πλασμονικών συστημάτων να ενισχύουν σημαντικά τα οπτικά πεδία μικρότερα του μήκους κύματος λειτουργίας, διατηρώντας ταυτόχρονα τις κβαντικές τους ιδιότητες. Αυτή η πλασμονική ενίσχυση είναι η βάση για πολλές εφαρμογές νανοπλασμονικής. Υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη φασματοσκοπία κοντινού πεδίου στο μέσο της υπέρυθρης ακτινοβολίας, λόγω των διακριτών φασματικών υπογραφών σημαντικών μοριακών, βιολογικών συστημάτων και συμπυκνωμένης ύλης, συμπεριλαμβανομένων των

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

μακρομορίων και του γραφενίου. Για την περαιτέρω ανάπτυξη της πλασμονικής και της οπτικής κοντινού πεδίου και των εφαρμογών τους, είναι ζωτικής σημασίας να έχουμε μια συνεκτική πηγή έντονων τοπικών πεδίων στη νανοκλίμακα, ιδίως στο μέσο της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Τα εντοπισμένα επιφανειακά πλασμόνια (LSPs) εφαρμόζονται τώρα σε διάφορους τομείς, όπως οι βιοαισθητήρες, οι ηλιακές κυψέλες, η ενίσχυση του μοριακού φθορισμού και οι συσκευές που ελέγχονται με κβάντα σε νανομετρική κλίμακα

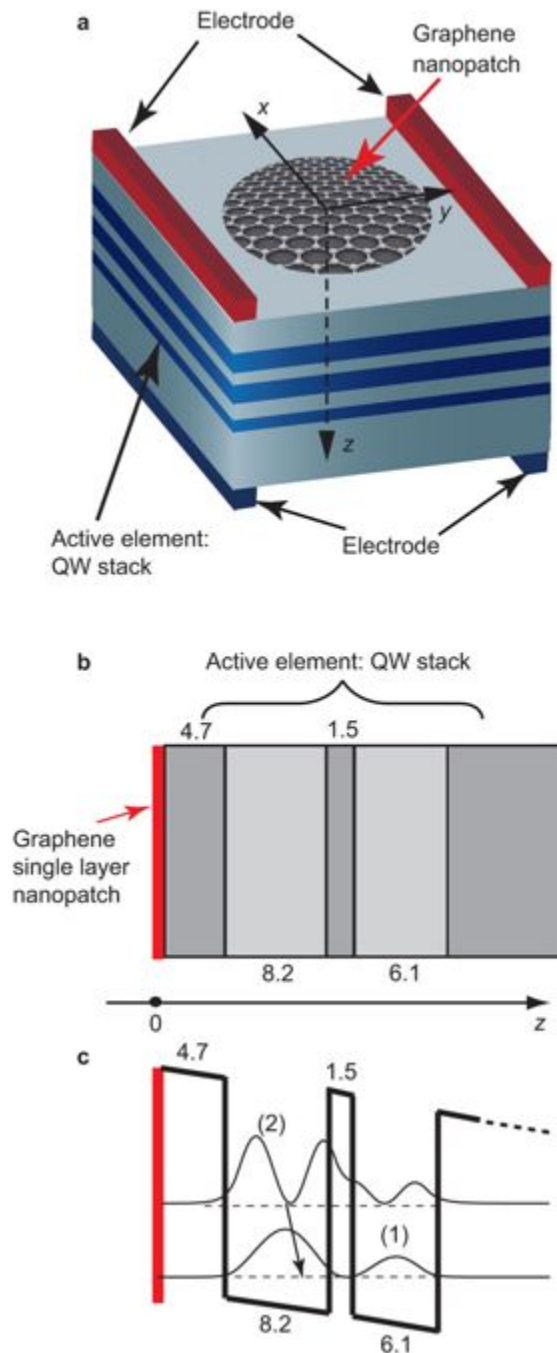
Όπως είναι γνωστό, ωστόσο, οι οπτικές αποκρίσεις των LSPs γενικά αναλύονται χρησιμοποιώντας κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό, παρά το γεγονός ότι οι LSPs είναι κβαντισμένες ταλαντώσεις πλάσματος. Αυτό συμβαίνει επειδή το φαινόμενο κεραίας LSP μπορεί να γίνει κατανοητό χωρίς την κβαντική φύση του πλασμονίου και μπορεί να εξηγηθεί απλά από τις εξισώσεις του Maxwell. Ωστόσο, η κβαντική πλασμονική απαιτεί μια κβαντομηχανική επεξεργασία των πλασμονίων, με άλλα λόγια, τον δεύτερο κβαντισμό των πλασμονίων. Συγκεκριμένα, η κατανόηση των κβαντικών ιδιοτήτων ενός μοναδικού LSP, δηλαδή της διπολικής ροπής και του ρυθμού χαλάρωσης του, απαιτείται για να γίνει κατανοητή η διάσπαση κενού Rabi σε αλληλεπίδραση LSP-ύλης, επειδή η ισχυρή σύζευξη πραγματοποιείται όταν ο σταθερός ρυθμός σύζευξης g της αλληλεπίδρασης LSP - ύλης είναι μεγαλύτερες από τα ποσοστά χαλάρωσης του LSP και της ύλης.

Στην [58] προτείνεται ένα απλό μοντέλο ενός ικανού να κορεστεί (saturable) LSP για μικρά μεταλλικά νανοσωματίδια, χρησιμοποιώντας μια αποτελεσματική προσέγγιση διπόλων. Η στρατηγική είναι να συγκριθεί άμεσα η κλασική γραμμική οπτική απόκριση ενός LSP, με εκείνη που λαμβάνεται από κβαντικό σύστημα δύο επιπέδων ένα ικανό να κορεστεί. Ο δεύτερος κβαντισμός εκτελείται με αντικατάσταση μιας κλασικής πολωσιμότητας του LSP με έναν κβαντικό τελεστή διπόλου, που περιγράφεται από το σύστημα δύο επιπέδων. Λαμβάνοντας ως παράδειγμα ένα ελλειψοειδές νανομέταλλο, εισάγεται μια λειτουργία οπτικής απόκρισης ενός LSP, με βάση τις οπτικές εξισώσεις Bloch, και επικυρώνεται η μέθοδος αναλύοντας λεπτομερώς την εξάρτηση μεγέθους της συχνότητας συντονισμού πλασμονίου και την ταχύτητα χαλάρωσης ενός μονού LSP. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η συχνότητα συντονισμού πλασμονίου και το φασματικό εύρος γραμμής μειώνονται καθώς η αναλογία διαστάσεων του ελλειψοειδούς νανομεταλλικού αυξάνει, η οποία είναι παρόμοια με την εξάρτηση μεγέθους που παρατηρήθηκε στα πρώιμα πειράματα.

Ένας SPASER (Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation- ενίσχυση επιφανειακών πλασμονίων με διέγερση εκπομπής ακτινοβολίας), που είναι το νανοπλασμονικό αντίστοιχο ενός λέιζερ, αποτελείται από πλασμονικά νανοσωματίδια συζευγμένα με ένα ενεργό μέσο (ενεργού κέρδους). Η διάσπαση

έχει ως αποτέλεσμα τη συνεπή παραγωγή επιφανειακών πλασμονίων, με νανοεντοπισμένα έντονα συνεκτικά οπτικά πεδία. Ένας από τους περιορισμούς στον SPASER επιβάλλεται από τον υψηλό ρυθμό απόσβεσης των διεγέρσεων επιφανειακών πλασμονίων στα πλασμονικά μέταλλα. Στην [59] προτείνεται ένας νέος NANOSPASER στο μέσο της υπέρυθρης ακτινοβολίας, που χρησιμοποιεί ένα nanopatch γραφενίου ως πλασμονικό πυρήνα του και μια αλληλουχία (cascade) κβαντικών πηγαδιών ως μέσο κέρδους του. Αυτός ο σχεδιασμός εκμεταλλεύεται τις χαμηλές οπτικές απώλειες του γραφενίου, λόγω της υψηλής κινητικότητάς των ηλεκτρονίων του. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σχέδια κβαντικών cascade laser (laser αλληλουχίας), που χρησιμοποίησαν πλασμονικούς κυματοδηγούς και ανιχνευτές μικρότερους του μήκους κύματος λειτουργίας, ο προτεινόμενος κβαντικός cascade spaser γραφενίου δημιουργεί οπτικά πεδία με πρωτοφανή υψηλό νανοεντοπισμό, ο οποίος είναι χαρακτηριστικό των πλασμονίων γραφενίου. Αυτός ο SPASER θα είναι μια αποτελεσματική νανοπηγή από έντονα και συνεκτικά πεδία hot-spot στη μεσαία υπέρυθρη φασματική περιοχή, με πιθανές εκτεταμένες εφαρμογές στη μέση υπέρυθρη νανοσκόπηση, τη νάνο-φασματοσκοπία, τη νανολιθογραφία και την οπτοηλεκτρονική επεξεργασία πληροφορίας.

Προτείνεται ένας νέος SPASER, ως μια συνεκτική κβαντική γεννήτρια επιφανειακών πλασμονίων σε νάνο-δομημένο γραφένιο. Ο πλασμονικός πυρήνας αυτού του spaser είναι ένα nanopatch με μονοστιβάδα από γραφένιο και το ενεργό στοιχείο του (gain) είναι ένας καταρράκτης (cascade) κβαντικού πηγαδιού, με σχεδίαση παρόμοια με εκείνη του ενεργού στοιχείου των κβαντικών cascade lasers.(σχήμα 3.7^α).



Σχήμα 3.7: Σχηματικό ενός cascade κβαντικού nanospaser γραφενίου. (α) Γεωμετρία του spaser: νανοκάλυψη μονοστιβάδα γραφενίου πάνω από μια στοίβα cascade κβαντικών πηγαδιών και ηλεκτρόδια για ηλεκτρική άντληση (το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα από τα ηλεκτρόδια). (β) Σχηματική της γεωμετρίας διατομής του κβαντικού cascade nanospaser. Οι αριθμοί (σε nm) είναι τα πλάτη των πηγαδιών ($\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$) και των φραγμών ($\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$). Αυτά τα πηγάδια και τα φράγματα εμφανίζονται με το φωτεινό και το σκούρο γκρι, αντίστοιχα. (γ) Διάγραμμα ενεργειακής ζώνης της ενεργού περιοχής μιας κβαντικής δομής cascade λέιζερ, κάτω από μια πόλωση ηλεκτρικού πεδίου. Παρουσιάζονται σχηματικά οι σχετικές κυματικές

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

συναρτήσεις των υποζωνών (1) και (2), καθώς και η οπτική μετάβαση που αντιστοιχεί στη δρόση του *spaser*.

Η παραγωγή υψηλών αρμονικών σε συστήματα συμπυκνωμένης ύλης είναι και πηγή θεμελιώδους κατανόησης της κβαντικής κίνησης των ηλεκτρονίων και υποσχόμενος υποψήφιος για να πραγματοποιήσει συμπαγείς υπεριώδεις και εξαιρετικά γρήγορες πηγές φωτός. Ενώ το γραφένιο αναμένεται να παράγει αποτελεσματικά αρμονικές υψηλής τάξης, λόγω της μη αρμονικής διασποράς του φορέα φορτίου, τα πειράματα που εκτελούνται σε εκτεταμένα δείγματα χρησιμοποιώντας φωτισμό THz έχουν αποκαλύψει μόνο ένα ασθενές αποτέλεσμα. Η κατάσταση περιπλέκεται περαιτέρω από τις τεράστιες εντάσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που απαιτούνται από αυτό το εξαιρετικά μη διαταραγμένο, μη γραμμικό, οπτικό φαινόμενο. Στην [60] υποστηρίζεται ότι η μεγάλη ένταση του φωτός που απαιτείται για την παραγωγή υψηλών αρμονικών μπορεί να επιτευχθεί με την εκμετάλλευση εντοπισμένων πλασμονίων σε ντοπαρισμένες νανοδομές γραφενίου. Παρουσιάζεται, μέσω αυστηρών προσομοιώσεων χρονικού πεδίου, ότι ο συνεργατικός συνδυασμός ισχυρής ενίσχυσης πλασμονικών στο κοντινό πεδίο και η έντονη εγγενής μη γραμμικότητα, καταλήγουν σε αποδοτική ευρυζωνική παραγωγή υψηλής αρμονικής σε ένα μόνο υλικό. Τα αποτελέσματα υποστηρίζουν την ισχυρή δυναμική του νάνο-δομημένου γραφενίου ως μιας ισχυρής, ηλεκτρικά ρυθμιζόμενης πλατφόρμας για παραγωγή υψηλών αρμονικών.

Όταν μεταδίδονται πλασμόνια συντονισμένα από οπτικά πεδία, οι συλλογικές ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων σε αγώγιμα μέσα συγκεντρώνουν την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σε όγκους με διαστάσεις εξαιρετικά μικρότερες του μήκους κύματος, δημιουργώντας έντονα τοπικά ηλεκτρικά πεδία, που είναι απαραίτητα για την ενεργοποίηση μη γραμμικών οπτικών φαινομένων. Στο γραφένιο τα πλασμόνια προσφέρουν έναν αποτελεσματικό τρόπο σύζευξης του ατομικώς λεπτού στρώματος άνθρακα με το φως της πρόσκρουσης, ενώ η σχετική τους ενίσχυση στο κοντινό πεδίο, σε συνδυασμό με την άκρως μη αρμονική απόκριση του γραφενίου, προβλέπεται να δημιουργήσει μεγάλες οπτικές μη γραμμικότητες. Είναι σημαντικό ότι αυτά τα πλασμόνια υπάρχουν μόνο σε γραφένιο υψηλής προσμείξεως, ενώ η συχνότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο ντοπαρίσματος. Η ηλεκτρική πύλη παρέχει έτσι έναν μηχανισμό για τον συντονισμό της παραγωγής αρμονικών σε γραφένιο, στην επιθυμητή περιοχή συχνοτήτων.

Εδώ προβλέπεται ότι η πολύ αποδοτική High Harmonic Generation HHG (παραγωγή υψηλών αρμονικών) λαμβάνει χώρα σε ντοπαρισμένες νανοδομές γραφενίου, όταν το προσπίπτον φως συντονίζεται με τα εντοπισμένα πλασμόνια τους. Συγκεκριμένα,

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

επιτυγχάνονται εντάσεις αρμονικών που είναι τάξεις μεγέθους υψηλότερες από ότι σε άλλα υλικά.

Η ενσωμάτωση σιδηρομαγνητικών προσμείξεων σε τρισδιάστατα λεπτά τοπολογικά μονωτικά φιλμ έχει οδηγήσει πρόσφατα στην πραγματοποίηση του κβαντικά ανώμαλου φαινομένου Hall. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς μπορούν να υποστηρίξουν ηλεκτρικά ρεύματα που ρέουν χωρίς αντίσταση, ακόμη και σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο. Μέχρι σήμερα, το κβαντικά ανώμαλο φαινόμενο Hall έχει διερευνηθεί χρησιμοποιώντας μετρήσεις μεταφοράς χαμηλής συχνότητας. Εντούτοις, τα αποτελέσματα μεταφοράς μπορεί να είναι δύσκολο να ερμηνευθούν, λόγω της παρουσίας παράλληλων αγωγίμων διαδρομών ή επειδή μπορεί να υπάρχουν επιπρόσθετα μη χειρομορφικά ακραία κανάλια.

Τα αποτελέσματά της [61] παρέχουν ένα μέτρο της ταχύτητας των ακραίων διεγέρσεων, χωρίς να έρθουν σε επαφή με το δείγμα και ανοίγουν το δρόμο για ένα στοιχείο κυκλώματος επί τσιπ πρακτικής σημασίας, τον κυκλοφορητή μικροκυμάτων μηδενικού πεδίου.

Γίνεται αντιληπτό επομένως ότι ο σιδηρομαγνητισμός, ανυψώνοντας τον εκφυλισμό της περιστροφής και σπάζοντας τη συμμετρία αναστροφής του χρόνου στο μηδενικό μαγνητικό πεδίο, μπορεί να μετατρέψει έναν τοπολογικό μονωτήρα (TI) σε μια νέα φάση της ύλης, που φιλοξενεί τις χειρομορφικές καταστάσεις άκρων. Η υπογραφή αυτής της φάσης είναι το κβαντικό ανώμαλο φαινόμενο Hall (QAH), στο οποίο η εγκάρσια αγωγιμότητα μιας μαγνητισμένης ράβδου Hall παραμένει ποσοτικοποιημένη σε μονάδες της κβαντικής αγωγιμότητας, ακόμη και σε απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Πειραματικά, αυτό έχει αποδειχθεί στο (Bi, Sb) 2Te_3 με τη χρήση χρωμίου και προσμείξεων βαναδίου. Δεδομένου ότι οι μαζικοί μονωτήρες και οι σιδηρομαγνήτες είναι συνηθισμένοι σε θερμοκρασία δωματίου, υπάρχει αισιοδοξία ότι το QAH μπορεί να μην περιορίζεται στα κρυογονικά καθεστώτα των σημερινών πειραμάτων. Μια QAH σε θερμοκρασία δωματίου, στην οποία οι καταστάσεις άκρων διαδίδονται χωρίς διάχυση, θα μπορούσε να έχει αντίκτυπο σε μερικές από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα υψηλής ταχύτητας, υψηλής τάσης.

Διερευνάται συγκεκριμένα η πλασμονική απόκριση μηδενικού πεδίου ενός μαγνητισμένου δίσκου, χωρίς επαφή του σιδηρομαγνητικού TI Cr- (Bi, Sb) 2Te_3 . Η κατασκευή και των δύο ράβδων Hall και των δομών συντονισμένου δίσκου επιτρέπει να γίνει μια σύγκριση ένα προς ένα, μεταξύ των δεδομένων μεταφοράς και του φάσματος διεγέρσεως μικροκυμάτων του υλικού. Με την εφαρμογή μιας τρισδιάστατης διάταξης κυκλοφορητή, δείχθηκε ότι η απόκριση πλασμονίου χαμηλής συχνότητας εμφανίζει μη αμοιβαία συμπεριφορά, η οποία είναι συνεπής με τα χειρόμορφα πλασμονικά άκρα. Η ύπαρξη τέτοιων πλασμονικών ρυθμών στο δίσκο και η αντιστοιχία τους με ένα ελάχιστο στην διαμήκη αντίσταση της ράβδου

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Hall, παρέχουν περαιτέρω πειστικές αποδείξεις ότι αυτό το σύστημα υποστηρίζει μια στιβαρή κατάσταση άκρου. Τέλος, εξετάζεται η εξάρτηση της κυκλοφορίας από την ισχύ διέγερσης και τη θερμοκρασία, υποδηλώνοντας ότι οι μετρήσεις μικροκυμάτων μπορούν να χρησιμεύσουν ως ένας ευαίσθητος ανιχνευτής των συνθηκών στην άκρη.

Οι πλασμονικοί ρυθμοί μπορούν να προσομοιωθούν κλασικά, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Drude και Maxwell. Τέτοιοι υπολογισμοί μπορούν να αποδώσουν ακριβείς πλασμονικούς ρυθμούς για συστήματα μέχρι τάξεις μεγέθους δεκάδων νανομέτρων. Ωστόσο, όταν τα μεγέθη του συστήματος συρρικνώνονται στην τάξη των νανομέτρων, η κλασική μέθοδος θα μπορούσε να αποτύχει λόγω της έλλειψης μη τοπικής απόκρισης στη διηλεκτρική λειτουργία και τις μεταβάσεις μεταξύ ζωνών. Σε τέτοια μικρά συστήματα οι κβαντομηχανικές περιγραφές, όπως η θεωρία γραμμικής απόκρισης, γίνονται απαραίτητες. Κβαντομηχανικά, οι πλασμονικοί ρυθμοί μπορούν να οριστούν από τους πόλους στο σύνθετο χώρο συχνότητας ω της αντίστροφης διηλεκτρικής συνάρτησης $\epsilon^{-1}(r_1, r_2, \omega)$. Ειδικά, ένας πλασμονικός ρυθμός $\nu(r, \omega_p)$ ικανοποιεί την εξίσωση

$$\epsilon^{-1}(r_1, r_2, \omega_p) \nu(r_1, \omega_p) dr_2 = 0. \quad (22)$$

Εδώ η συχνότητα πλασμονίου ω_p είναι ένας σύνθετος αριθμός, με το φανταστικό του μέρος να δείχνει τον χρόνο ζωής του πλασμονίου. Δυστυχώς, το $\epsilon^{-1}(r_1, r_2, \omega)$ δεν παρέχει εικόνα σε πραγματικό χρόνο των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του πλασμονίου και των θερμών φορέων. Υπάρχουν πολλές πρόσφατες θεωρητικές μελέτες σχετικά με τις γενεές θερμών φορέων που προκαλούνται από πλασμόνια, που δείχνουν ότι οι θερμοί φορείς μπορούν να διεγερθούν αποτελεσματικά από πλασμόνια. Ωστόσο, αυτές οι μελέτες επεξεργάστηκαν τα πλασμόνια κλασικά, ως ταλαντευόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και χρησιμοποίησαν τη θεωρία των διαταραχών (χρυσός κανόνας του Fermi), για τον υπολογισμό των παραγόμενων θερμών φορέων. Δεν περιγράφουν την ανατροφοδότηση των θερμών φορέων στα πλασμόνια, ούτε αντιπροσωπεύουν τις διεγέρσεις πλασμονίων και μονοσωματιδίων σε ένα ενοποιημένο κβαντικό μηχανικό πλαίσιο.

Η συναρτησιακή θεωρία της πυκνότητας real-time (rt) Time-Dependent Density Functional Theory (TDDFT) είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη των πλασμονικών διεργασιών. Η rt-TDDFT περιγράφει άμεσα τις αλληλεπιδράσεις Coulomb μεταξύ ηλεκτρονίων και η ικανότητά της να περιγράφει τα πλασμόνια έχει αποδειχθεί σε πολλές προηγούμενες δημοσιεύσεις. Η rt-TDDFT χρησιμοποιήθηκε για να μελετήσει μοντέλα jellium ή μικρά συστήματα, όπως μονοδιάστατες αλυσίδες ατόμων. Υπήρχαν επίσης προσομοιώσεις rt-TDDFT σε νάνο-συσσωρευτές μέχρι μερικές εκατοντάδες άτομα, χρησιμοποιώντας τοπική-τροχιακή βάση ή πλέγματα πραγματικού διαστήματος (χώρου). Ωστόσο, αυτές οι εργασίες

μελετούσαν μόνο το φάσμα οπτικής απορρόφησης, αντί των αλληλεπιδράσεων και των μεταφορών ενέργειας μεταξύ των πλασμονίων και των μονοσωματιδιακών διεγέρσεων. Για πολλά ενδιαφέροντα φυσικά προβλήματα, συμπεριλαμβανομένης της αποσύνθεσης των πλασμονίων, της παραγωγής θερμών φορέων και των μεταφορών φορέων, απαιτούνται μακροχρόνιες προσομοιώσεις (10-1.000 fs). Ο πρόσφατα αναπτυσσόμενος γρήγορος αλγόριθμος *rt-TDDFT31*, μας δίνει τη δυνατότητα να προσομοιώνουμε τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα με σύνολα βασισμένα σε επίπεδο κύματος.

Στην εργασία [62], χρησιμοποιείται η *rt-TDDFT* για να μελετηθεί η δυναμική των πλασμονίων σε ένα νανοκέλυφος Ag55 . Το νανοκέλυφος του Ag55 έχει συντεθεί πειραματικά και η ατομική δομή του είναι καλά προσδιορισμένη. Ένα πρόσφατο πείραμα μετρά τη συχνότητα των πλασμονίων 3,8 eV. Τέτοιοι μικροί νανοσυσσωρευτές μπορεί να έχουν μεγάλες δυνατότητες για φωτοκατάλυση, λόγω των υψηλών ποσοστών έγχυσης φορέα. Προτείνεται μια ξεκάθαρη προσέγγιση για να διακρίνουμε το πλασμόνιο από τις διεγέρσεις ενός μορίου σωματιδίων, με βάση τον μεταβατικό συντελεστή ζώνης-προς-ζώνη. Βρέθηκε ότι εάν οι διεγέρσεις μονοσωματιδίων *d-to-s* είναι συντονισμένες με τη συχνότητα πλασμονίου, η περισσότερη ενέργεια πλασμονίου θα μετατραπεί σε θερμούς φορείς, ενισχύοντας την παραγωγή θερμών φορέων. Ωστόσο, εάν οι συντονισμοί δεν υπάρχουν, το πλασμόνιο διασπάται αργά και μπορεί να εμφανίζει ταλαντώσεις *Rabi*. Προτείνεται ότι με την τροποποίηση των ηλεκτρονικών δομών των νανοσυσσωρευτών (για παράδειγμα, του αριθμού των ηλεκτρονίων, της συχνότητας των πλασμονίων, της ενέργειας ζ-ζωνών κ.λπ.), οι καταστροφές των πλασμονίων και η παραγωγή θερμών φορέων μπορούν να συντονιστούν. Οι αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων-φωτονίων παίζουν μικρό ρόλο κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης των πλασμονίων στο Ag55 .

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι το ενδιαφέρον για την έρευνα και την εφαρμογή των πλασμονίων στο κβαντικό επίπεδο είναι πολύ μεγάλο, καθώς αποτελούν ένα εργαλείο που μας οδηγεί με ασφάλεια, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο, στην κλίμακα των νανομέτρων. Παρατηρούμε ότι ακόμα δεν έχει επιτευχθεί η κατασκευή συσκευών υψηλής ολοκλήρωσης και τυποποίησης, καθώς η έρευνα παραμένει ακόμα σε βασικό στάδιο. Παρά ταύτα παρατηρούμε πολλές αναφορές σε επίπεδο εφαρμογής.

Συγκεκριμένα, νέες δυναμικές εφαρμογές πλασμονίων, όπως πηγές ενός φωτονίου, πηγές συζευγμένων φωτονίων και συσκευές με κβαντική ρύθμιση στη νανομετρική κλίμακα, βιοαισθητήρες, ηλιακές κυψέλες, η ενίσχυση του μοριακού φθορισμού και οι συσκευές που ελέγχονται με κβάντα σε νανομετρική κλίμακα, με πιθανές εκτεταμένες εφαρμογές στη μέση υπέρυθρη νανοσκόπηση, τη νανο-φασματοσκοπία, τη νανολιθογραφία και την οπτοηλεκτρονική επεξεργασία πληροφορίας.

3.1.3

Τεχνολογία αισθητήρων/Απεικόνιση (Sensing/Imaging)

Η πλασμονική προσφέρει ένα σταυροδρόμι μεταξύ της φωτονικής και της νανοηλεκτρονικής, συνδυάζοντας την ικανότητα της πρώτης για υψηλό εύρος ζώνης με την ικανότητα ολοκλήρωσης νανοκλίμακας της δεύτερης.

Στην [63] παρατηρήθηκαν εντοπισμένα συμβατικά επιφανειακά πλασμόνια στη μεταλλική φάση του VO₂, και η μετατόπιση του μονωτή μετάλλων που εξαρτάται από τη θερμοκρασία έχει χρησιμοποιηθεί για πλασμονική μεταγωγή και πλασμονικές εφαρμογές αισθητήρων. Ωστόσο, σε ισχυρά συσχετισμένες, μονωτικές φάσεις αυτών των υλικών (όπως στους μονωτήρες Mott), συσχετισμένες μορφές πλασμονίων κάτω από αλληλεπιδράσεις Coulomb μεγάλης εμβέλειας έχουν μόνο θεωρητικώς ερευνηθεί, αλλά δεν έχουν παρατηρηθεί πειραματικά.

Σε αυτή τη μελέτη, μελετώνται διάφορα φιλμ Sr_{1-x}NbO₃ + δ με μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε οξυγόνο, ηλεκτρική αγωγιμότητα (από μέταλλο σε μονωτικό) και πάχος μεμβράνης, με τη χρήση φασματοσκοπικής ελλειψομετρίας (SE), ηλεκτρονικής μικροσκοπίας μετάδοσης ατομικής ανάλυσης (TEM) και υποστηριζόμενες από θεωρητικούς υπολογισμούς, που βασίζονται σε μοντέλο συζευγμένων αρμονικών ταλαντωτών και λειτουργική θεωρία πυκνότητας. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια εκπληκτική παρατήρηση μιας νέας μορφής συσχετισμένων πλασμονίων στην ταινία που μοιάζει με μονωτήρα, η οποία επίσης αποκαλύφθηκε ότι είναι ένα ισχυρά συσχετισμένο μονωτικό τύπου Mott. Τα συσχετισμένα πλασμόνια έχουν ασυνήθιστα πολλαπλές συχνότητες πλασμονίου (~ 1,7, ~ 3,0 και ~ 4,0 eV) και χαμηλές απώλειες (αρκετές φορές χαμηλότερες από τον χρυσό) στην ορατή-υπεριώδη περιοχή. Θεωρητικοί υπολογισμοί υποστηρίζουν ότι αυτά τα συσχετισμένα πλασμόνια προκύπτουν από συλλογικές διεγέρσεις συσχετιζόμενων ηλεκτρονίων στην μεμβράνη, όπου ο περιορισμός των νανομετρικών επιπέδων και των επιπέδων επιπλέον οξυγόνου προκαλεί αυξημένες απωθήσεις Coulomb μεταξύ των ηλεκτρονίων. Τα συσχετισμένα πλασμόνια μπορούν να αναπαραχθούν και να ρυθμιστούν μειώνονται και τελικά εξαφανίζονται, καθώς η πυκνότητα του επιπέδου επιπλέον οξυγόνου ή το πάχος του φιλμ μειώνονται. Συγκεκριμένα, η μείωση της πυκνότητας επιπέδου επιπλέον οξυγόνου αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και, καθώς τα συσχετισμένα πλασμόνια εξαφανίζονται στις μεταλλικές μεμβράνες, η αυξημένη πυκνότητα ελεύθερης φόρτισης προκαλεί την εμφάνιση συμβατικού πλασμονίου στα ~ 1,9 eV.

Εν κατακλείδι, αποδεικνύεται ότι ανάλογα με την ισχύ της ηλεκτρονικής συσχέτισης, μπορούν να διεγερθούν διάφοροι τύποι πλασμονίων αναπαραγωγικά σε φιλμ $\text{Sr1-xNbO}_3 + \delta$. Στις ασθενώς συσχετισμένες μεταλλικές μεμβράνες κυριαρχούν τα συμβατικά πλασμόνια. Αντιθέτως, σε ισχυρώς συσχετισμένες μονωτικές μεμβράνες τύπου Mott, είναι δυνατό να διεγερθούν τα συσχετισμένα πλασμόνια με χαμηλές απώλειες, τα οποία έχουν θεμελιωδώς διαφορετικές ιδιότητες και προέλευση από τα συμβατικά πλασμόνια. Αυτά τα συσχετισμένα πλασμόνια προκύπτουν από τον, σε νανομετρικό επίπεδο, περιορισμό των επιπλέον επιπέδων οξυγόνου στο φιλμ και, γενικά, μπορούν να συντονιστούν μεταβάλλοντας την ισχύ της ηλεκτρονικής συσχέτισης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αλλαγή της επιπλέον πυκνότητας επιπέδου οξυγόνου, για παράδειγμα, με μεταβολή της πίεσης οξυγόνου κατά την εναπόθεση φιλμ και με αλλαγή του πάχους των φιλμ.

Στην [64] βλέπουμε ότι το φως μπορεί να συλληφθεί αποτελεσματικά και να περιοριστεί σε περιοχές νανοδιακένων με μήκος κύματος μικρότερο αυτού της λειτουργίας μεταξύ μεταλλικών νανοδομών, χρησιμοποιώντας συντονισμό πλασμονίου. Αυτό μπορεί να μεγαλώσει την ενίσχυση στο κοντινό πεδίο κατά αρκετές τάξεις μεγέθους και να ενισχύσει την οπτική διασπορά / απορρόφηση στο μακρινό πεδίο. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν πλασμονικούς αισθητήρες για την ανίχνευση των ιδιοτήτων των υλικών στην περιοχή του διακένου, με εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία. Από τη μια πλευρά, σε συνδυασμό με ειδικά μοριακά φασματικά δακτυλικά αποτυπώματα, η ενίσχυση στο κοντινό πεδίο σε πλασμονικούς αισθητήρες επιτρέπει την ανίχνευση μοριακών ειδών στην περιοχή του διακένου, μέχρι το επίπεδο μονού μορίου. Από την άλλη πλευρά, το φάσμα διασκορπισμού του μακρινού πεδίου από τις συζευγμένες νανοδομές εξαρτάται έντονα από την απόστασή του, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κυματοδηγός πλασμονίου που παρακολουθεί τις χωρικές μεταβολές στην περιοχή του διακένου, μετρώντας τις φασματικές μετατοπίσεις. Η διαφορική ευαισθησία, με βάση αυτόν τον μηχανισμό, έχει αποδειχθεί ότι είναι υψηλότερη από τον αντίστοιχο μηχανισμό που βασίζεται στη μεταφορά ενέργειας συντονισμού Förster μεταξύ μορίων. Έχει χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές, που περιλαμβάνουν την επίλυση μεταβολών διαστάσεων νανοκλίμακας, π.χ. παρακολούθηση της υβριδοποίησης του DNA, ανίχνευση της δυσκαμψίας του DNA, αισθητήρες αερίων και τρισδιάστατη μεταβολή μετατόπισης θέσης. Μέχρι στιγμής, οι υπάρχοντες κυβερνήτες (rulers) πλασμονίων έχουν επιδείξει διαφορική ανάλυση κλίμακας Ångström. Ωστόσο, θεωρήθηκε πρόσφατα ότι τα πλασμόνια κοιλότητας σε στενά διάκενα, θα μπορούσαν να είναι πιο ευαίσθητα στις αλλαγές διαστάσεων από τα πλασμόνια ακτινοβολούμενης κεραίας, που χρησιμοποιήθηκαν στους προηγούμενους κυλίνδρους πλασμονίων, αλλά αυτές οι θεωρητικές προβλέψεις δεν έχουν μέχρι στιγμής επιβεβαιωθεί πειραματικά.

Συμπερασματικά, τα ευρήματα δείχνουν πόσο υπερυψηλή είναι η ευαισθησία που προσφέρεται από τα πλασμόνια κοιλοτήτων για την παρακολούθηση των υλικών, περιβαλλοντικών και διαστασιακών αλλαγών, με πολύ υψηλές αναλύσεις. Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν προηγούμενες θεωρητικές προβλέψεις των δυνατοτήτων

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

υψηλής ανίχνευσης, στις δομές που βασίζονται σε κοιλότητες-πλασμονίων και υπογραμμίζουν ορισμένες πιθανές εφαρμογές ανίχνευσης.

Η παρατήρηση πολλαπλών συντονισμών σε σκοτεινούς S-LSPs, χωρίς την εισαγωγή επιπλέον φωτεινού συντονισμού σε κανονική / λοξή γωνία, θα μπορούσε να βρει περισσότερες πιθανές εφαρμογές σε αισθητήρες που βασίζονται σε μικροκύματα και terahertz, σε διατάξεις πλασμονικού συντονισμού και σε διατάξεις μεταλλικών.

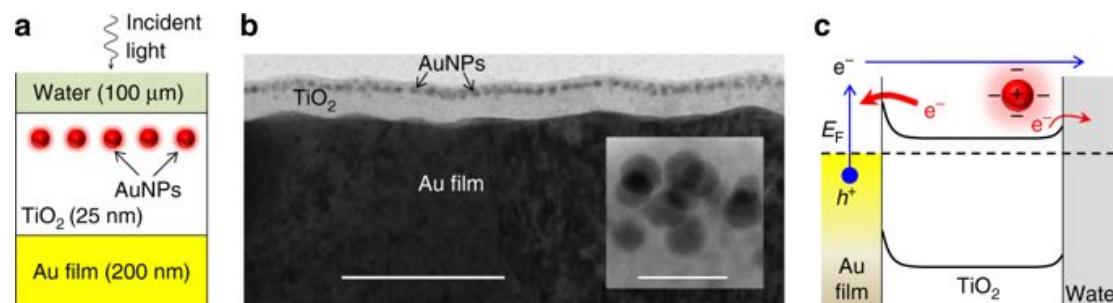
Μέχρι τώρα δεν υπάρχουν αναφορές σχετικά με τη διέγερση πολλαπλών ρυθμών σε μικροκυματικούς ανιχνευτές S-LSPs σκούρου σε ορθή/ πλάγια γωνία πρόσπτωσης, γεγονός που σίγουρα θα προσφέρει πλεονεκτήματα σχεδίασης και ευελιξία στις μελλοντικές εφαρμογές S-LSP των μικροκυμάτων, αξιοποιώντας την ιδιότητα του πολυπολικού συντονισμού των S- συντονιστών LSPs. Στην [65] μελετώνται οι πολυπολικοί ρυθμοί διέγερσης στον σκοτεινό συντονιστή S-LSP στη ζώνη X, στην περίπτωση κανονικής και λοξής πρόσπτωσης. Εισάγεται μια μονοπολική κεραία για την επαγωγή πολυπολικών ρυθμών στον ανιχνευτή S-LSPs κατά τη συχνότητα πρόσπτωσης και προτείνεται θεωρητικά μια επιλεκτική επιφανειακή συχνότητα μικροκυμάτων, που αποτελείται από σκοτεινούς συντονιστές S-LSPs σε κανονική / λοξή πρόσπτωση. Σε προηγούμενες εργασίες, παρατηρήθηκε μόνο η κατάσταση διπολικού, αντί των πολυπολικών ρυθμών, σε συντονιστές σκούρου S-LSPs terahertz, σε κάθετη γωνία πρόσπτωσης. Εδώ επεκτείνουμε τη σκοτεινή απόκριση S-LSPs από terahertz στη ζώνη X (8 GHz-12 GHz) και κατασκευάζουμε μια επιλεκτική, ως προς τη συχνότητα, επιφάνεια που αποτελείται από σφιχτά συζευγμένους συντονιστές S-LSPs (το μήκος σύζευξης $D = 0,03\text{nm}$). Μέσω της ισχυρής σύζευξης μεταξύ των παρακείμενων συντονιστών S-LSP στην επιφάνεια που είναι επιλεκτική ως προς τη συχνότητα, παρατηρούμε πρώτα φαινόμενα διέγερσης πολλαπλών ρυθμών στο σκοτεινό συντονιστή S-LSPs, χωρίς να εισάγουμε έξτρα φωτεινούς συντονιστές και να επιτύχουμε προφανείς μετατοπίσεις, που αντιστοιχούν σε ομοιόμορφους ρυθμούς συντονισμού (dipole, hexapole mode και decapole mode) στη ζώνη X, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και πολυπολικοί ρυθμοί θα μπορούσαν να διεγερθούν άμεσα σε αυτούς τους συμμετρικούς σκοτεινούς ανιχνευτές S-LSPs, σε κάθετη γωνία πρόσπτωσης. Στη συνέχεια διερευνώνται τα μοναδικά χαρακτηριστικά των διεγερμένων πολυπολικών ρυθμών στη ζώνη X, δια μεταβολής τριών παραμέτρων της επιλεκτικής επιφανείας, της περιοδικότητας (P) των μονάδων FSS, των αριθμών αυλακώσεων (N) και της ακτίνας (r) της εσωτερικής μεταλλικής ράβδου. Τέλος, αποκαλύπτουμε ότι οι μονοί ρυθμοί (quadrupole και octupole modes) διεγείρονται επίσης σε σκοτεινούς S-LSPs συντονιστές, αλλάζοντας την ορθή γωνία πρόσπτωσης σε πλάγια πρόσπτωση και επίσης εμφανίζονται φαινόμενα διαχωρισμού. Επιπλέον, η επιφάνεια που είναι επιλεκτική ως προς τη συχνότητα μπορεί να λειτουργήσει ως ένας επιλεκτικός ηλεκτρομαγνητικός διακόπτης σε ορισμένες ειδικές ζώνες συχνοτήτων, υπό ορθή ή πλάγια γωνία πρόσπτωσης. Αυτά τα ευρήματα της έκθεσης όχι μόνο προτείνουν μια

νέα μέθοδο για την άμεση διέγερση των πολυπολικών ρυθμών σε σκοτεινούς συντονιστές S-LSPs σε κανονική / λοξή γωνία πρόσπτωσης σε μικροκύματα, αλλά επίσης υπόσχονται νέες συμπληρωματικές εφαρμογές σε καθεστώς συχνότητας μικροκυμάτων και terahertz, βασισμένες σε συντονιστές S-LSPs, όπως σημείο προς σημείο ασφαλή επικοινωνία, μεταγωγή, διαμορφωτές και συσκευές μεταλλικών.

Η παραγωγή θερμών ηλεκτρονίων που επάγονται από πλασμόνια έχει πρόσφατα αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον και έχει μελετηθεί για την ανάπτυξη νέων εφαρμογών στην οπτοηλεκτρονική, στα φωτοβολταϊκά συστήματα και την πράσινη χημεία. Τέτοια θερμά ηλεκτρόνια τυπικά παράγονται είτε από εντοπισμένα πλασμόνια σε μεταλλικά νανοσωματίδια, είτε από πλασμόνια διάδοσης σε μορφοποιημένες μεταλλικές νανοδομές. Εδώ παράγουμε αυτά τα θερμά ηλεκτρόνια που προκαλούνται από ετερογενή πλασμόνια και ταυτόχρονα εκμεταλλευόμαστε την αλληλεπίδρασή τους σε μία μόνο συσκευή μεταλλικού ημιαγωγού, για να αποδείξουμε, για παράδειγμα, την φωτοαγωγιμότητα ελεγχόμενη από το μήκος κύματος, ικανή για μεταγωγή με βάση την πολικότητα. Η προσοχή των ερευνητών ως προς το συγκεκριμένο θέμα στρέφεται σε ένα ευρύ φάσμα τομέων όπως η μοριακή φασματοσκοπία, η βιοϊατρική ανίχνευση και η συλλογή της ηλιακής ενέργειας

Στο άρθρο [66] μελετώνται δύο τύποι γεννήσεως θερμών ηλεκτρονίων, που προκαλούνται από πλασμόνια σε μία μόνο διάταξη μεταλλικών ημιαγωγών και επιδεικνύεται η συνεταιριστική αλληλεπίδραση μεταξύ των θερμών ηλεκτρονίων που παράγονται από πλασμονικά NPs (εντοπισμένα πλασμόνια: LSPR) και από μια λεπτή μεταλλική μεμβράνη (πλασμόνια: SPPs)(σχήμα 3.8)

Η παρουσιαζόμενη συσκευή διπλού πλασμονίου μπορεί να επιτρέψει τη μικρογράψηση και τον απλοποιημένο έλεγχο τέτοιων δομών και να ενισχύσει την εφαρμογή και την προσβασιμότητα των οπτοηλεκτρονικών μεθόδων σε ερευνητικούς τομείς όπως η βιοχημεία και η φωτοχημεία.



Σχήμα 3.8: Σχήμα και αρχή λειτουργίας της συσκευής διπλού πλασμονίου. α) ένα σχήμα της συσκευής. β) Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μετάδοσης εγκάρσιας τομής (Transmission Electronic Microscopy-TEM) της συσκευής, ράβδος κλίμακας 100 nm. Το ένθετο δείχνει τα νανοσωματίδια Au (AuNPs) σε υψηλότερη μεγέθυνση, σε κλίμακα τάξης των

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

10 nm. c) Αρχή λειτουργίας της συσκευής υπό την οπτική διέγερση του εντοπισμένου συντονισμού επιφανειακού πλασμονίου (LSPR) των συσκευών AuNPs. Τα μπλε βέλη υποδηλώνουν τη μεταφορά καυτών ηλεκτρονίων που παράγονται από τυχαία πολαριτόνια επιφανειακών πλασμονίων (SPP) στην μεμβράνη Au και εν μέρει από τις ενδοζωνικές ή τις διαζωνικές μεταβάσεις της μεμβράνης Au στο υδατικό στρώμα. Τα κόκκινα βέλη υποδεικνύουν τη μεταφορά καυτών ηλεκτρονίων που παράγονται από τα AuNPs στο στρώμα Au και στο νερό. Ο πληθυσμός των καυτών ηλεκτρονίων που μεταφέρονται από τα AuNPs στην ταινία Au είναι μεγαλύτερος από εκείνον του υδατικού στρώματος, λόγω της απαίτησης της οξειδοαναγωγικής αντίδρασης, που υποδεικνύεται από διαφορετικά πάχη των κόκκινων βελών

Η παραγωγή, ο έλεγχος, ο χειρισμός και η χρήση του φωτός αποτελούν τον πυρήνα πολλών τεχνολογιών. Η σκέδαση του φωτός παίζει βασικούς ρόλους σε όλα αυτά. Φυσικά, η σκέδαση του φωτός από τα μικρά σωματίδια έχει μακρά ιστορία. Το κλειδί είναι η σημερινή εστίαση στην νανοκλίμακα και ιδιαίτερα στα φαινόμενα κοντινού πεδίου της νανοκλίμακας, ενώ μεγάλο μέρος της παλαιότερης κλασικής μελέτης ήταν προσανατολισμένη προς την τεχνολογικά προσβάσιμη συμπεριφορά του μακρινού πεδίου .

Στη [67] αναφέρεται ότι είναι αξιοσημείωτο ότι παρόλο που έχουν περάσει περισσότερα από 100 χρόνια από την εισαγωγή της γενικής θεωρίας του Mie σχετικά με τη σκέδαση του φωτός από μια σφαίρα, συνεχίζεται η διερεύνηση της νέας και συναρπαστικής φυσικής που σχετίζεται με τη σκέδαση του φωτός από μικρά σωματίδια. Στρεφόμενοι στη νανοτεχνολογία και τη νανοοπτική , υπάρχει μια αυξανόμενη εστίαση στον έλεγχο της οπτικής ενέργειας σε δομές μικρότερες του μήκους κύματος, ένα πεδίο που οδηγεί σε πολλές νέες ιδέες και αξιοσημείωτα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτές περιλαμβάνουν νανοφακούς και νανοκεραίες. Τα εντοπισμένα επιφανειακά πλασμόνια σε δομές σφαιρικού πυρήνα-κελύφους μπορούν να οδηγήσουν στους λεγόμενους spasers (Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation), (ενίσχυση επιφανειακών πλασμονίων με διέγερση εκπομπής ακτινοβολίας) με συντονισμένες συζευγμένες μεταβάσεις με διεγέρσεις από μόρια χρωστικής στο στρώμα του κελύφους. Η σύζευξη μεταξύ εντοπισμένων επιφανειακών πλασμονίων από στενά διαχωρισμένα μικρά σωματίδια έχει ως αποτέλεσμα ηλεκτρομαγνητικά θερμά σημεία. Η τεράστια σκέδαση του φωτός εντοπίζεται σε ανισότροπα σφαιρικά σωματίδια με ενεργό μηχανισμό. Αυτά τα αξιοσημείωτα αποτελέσματα, που βασίζονται στη σκέδαση του φωτός από τα μικρά σωματίδια, υποδεικνύουν πολλές πιθανές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας και των λέιζερ νανοκλίμακας.

Τώρα τα αποτελέσματα αυτά αξιοποιούνται για να αποδώσουν αξιοσημείωτα νέα φαινόμενα νανοκλίμακας και πιθανές εφαρμογές σε διάφορους τομείς της επιστήμης, όπως οπτική απεικόνιση υψηλής ανάλυσης, τεχνικές ανίχνευσης μικρής

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

κλίμακας, θεραπείες που ενεργοποιούνται με φωτισμό, αυξημένη απορρόφηση φωτός σε φωτοβολταϊκά και φωτοκατάλυση και σε πολυάριθμες βιοϊατρικές εφαρμογές. Αναμένουμε ότι θα αναπτυχθούν πολλές ακόμη εφαρμογές που θα εκμεταλλεύονται την οπτική σκέδαση από μικρά σωματίδια και ιδιαίτερα τις εφαρμογές της νανοφωτονικής που βασίζονται στις εφαρμογές στο κοντινό και στο μακρινό πεδίο, χρησιμοποιώντας γραμμικά και μη γραμμικά πλασμονικά φαινόμενα.

Στην [68] αναπτύσσεται μια προσέγγιση κβαντικής κύριας εξίσωσης (QME) για να διερευνήσουμε την ηλεκτροφωταύγεια (EL) μορίων που είναι περιορισμένα μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων και συζευγμένα με κβαντικούς πλασμονικούς ρυθμούς.

Αυτός ο πρωτοφανής έλεγχος καθιστά τα συστήματα STML(Scanning Tunneling Microscope Induced Luminescence) ιδανικά τόσο για την εξερεύνηση των θεμελιωδών πτυχών της ηλεκτρο-οπτικής απόκρισης των κβαντικών εκπομπών, όσο και για την ανάπτυξη της τεχνολογίας συσκευών κβαντικά ενισχυμένων, π.χ. αυτών που σχετίζονται με τη βιολογική ανίχνευση, τη μετατροπή της φωτοβολταϊκής ενέργειας ή τη μη κλασική παραγωγή φωτός.

Στην [69] παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος που επιτρέπει την επιλεκτική και αποκλειστική διέγερση των πολυπολικών πλασμονίων NPs. Δοκιμάζεται θεωρητικά ότι μια δέσμη οπτικών στροβίλων, που προσπίπτει κάθετα με συγκεκριμένο αζιμουθιακό τρόπο, μπορεί να προκαλέσει τη διέγερση πολλαπλών πλασμονίων. Οι λειτουργίες Laguerre-Gaussian (LG) χρησιμοποιούνται ως οπτικές δοκοί στροβίλων, επειδή σχηματίζουν μια πλήρη ορθοκανονική βάση για τις παρακεντρικές δέσμες φωτός σε κυλινδρικές συντεταγμένες και έτσι διευκολύνουν τη συστηματική κατανόηση. Χρησιμοποιείται ένα χρυσό νανοδισκίο ως πλασμονικό NP και διεγείρονται τα LSPRs χρησιμοποιώντας στενά εστιασμένες κυκλικά πολωμένες δέσμες στροβίλων (CPVBs). Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο επίκεντρο μιας συγκεκριμένης δέσμης εισόδου δείχνει μια διακριτή κατανομή γύρω από τον άξονα της δέσμης, που παρέχει μια καλή αντιστοιχία με τον αντίστοιχο συντονισμό πλασμονίου. Οι δέσμες που χρησιμοποιούνται εδώ μπορούν να ταξινομηθούν από τη γωνιακή τροχιακή ροπή τροχιάς και περιστροφής των φωτονίων. Συζητιέται επίσης η μεταβίβαση της γωνιακής ορμής από την προσπίπτουσα δομή στροβίλου στον προκύπτοντα συντονισμό πλασμονίου, όπου η ολική γωνιακή ορμή παίζει βασικό ρόλο στο υπό έρευνα πλασμονικό σύστημα.

Η πλατφόρμα ανίχνευσης με βάση την οπτική, που λειτουργεί κάτω από μη πολωμένο φωτισμό, έχει πρακτική σημασία στις εφαρμογές ανίχνευσης. Για το λόγο αυτό, οι πλατφόρμες ανίχνευσης που βασίζονται σε εντοπισμένα επιφανειακά

πλασμόνια προτιμώνται από τα αντίστοιχα ολοκληρωμένα οπτικά, για την απλή διέγερση και την ανέξοδη υλοποίησή της.

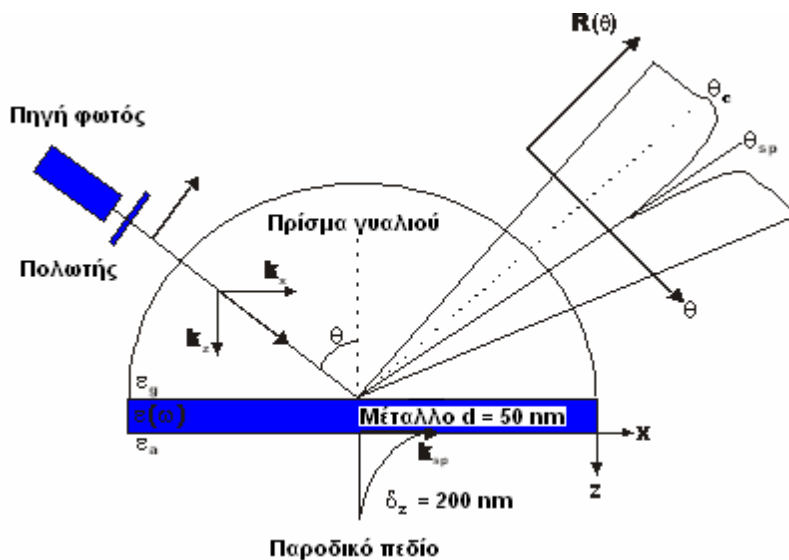
Επιδεικνύεται στην [70] ότι η εισαγωγή και η αύξηση της εσωτερικής περιστροφικής συμμετρίας θα οδηγούσε στην ενίσχυση της οπτικής αντίθεσης μέχρι $\sim 3x$ κάτω από τον μη πολωμένο φωτισμό. Τέλος, συγκρίνονται οι ανιχνεύσιμες επιδόσεις περιστροφικά συμμετρικών νανοδομών χρυσού με πιο αυστηρές μορφές αξιοπιστίας, με βάση την ευαισθησία, τον συντελεστή Q και τη φασματική αντίθεση

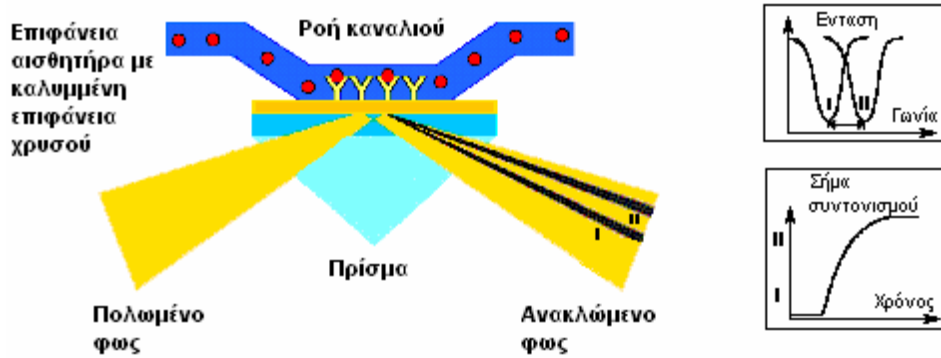
3.1.3.1

Παράδειγμα χρήσης συντονισμού επιφανειακών πλασμονίων

Ένα παράδειγμα της χρήσης επιφανειακών πλασμονίων σε εφαρμογές αισθητήρων παρουσιάζεται στην εργασία [71]. Η τεχνική βασίζεται στην ύπαρξη ενός **παροδικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου** πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου και στη μέτρηση της μεταβολής του **δείκτη διάθλασης** του διηλεκτρικού εγγύς της μεταλλικής επιφάνειας, λόγω π.χ της σύνδεσης ενός αντιγόνου με το ειδικό προς αυτό αντίσωμα, το οποίο βρίσκεται ακινητοποιημένο στη μεταλλική επιφάνεια

Σύμφωνα με την εξίσωση (20), η τιμή του k_{sp} εξαρτάται από τον n_2 , αφού ο n_{Au} είναι ένας σταθερός μιγαδικός αριθμός ($-10.92 + i 1.49$, $\lambda=620$ nm). Μεταβολή του n_2 , και κατ' επέκταση μεταβολή του k_{sp} παρατηρείται όταν στην επιφάνεια του διαλύματος (για ένα ρυθμιστικό διάλυμα $n \approx 1$) εισέλθει μια πρωτεΐνη ($n \approx 1,33$), ως αποτέλεσμα π.χ της σύνδεσης ενός αντιγόνου στο ειδικό αντίσωμα το οποίο έχει ακινητοποιηθεί στην επιφάνεια του χρυσού. Σε αυτή την περίπτωση (σχήμα 3.9), αλλάζει η γωνία συντονισμού και αυτή η μεταβολή ($\Delta\theta_{sp}$) χρησιμοποιείται ως μέτρο της συγκέντρωσης του αντιγόνου.





Σχήμα 3.9: Αρχή λειτουργίας του φαινομένου SPR και μεταβολή της γωνίας συντονισμού κατά την προσρόφηση του αντιγόνου στο ακινητοποιημένο αντίσωμα.

Παρακάτω αναφέρεται η αρχή λειτουργίας διαφόρων εμπορικών αναλυτών SPR και συγκεκριμένα ο μηχανισμός ελέγχου της γωνίας πρόσπτωσης.

1. Biacore (Pharmacia). Χρησιμοποιείται μια συγκλίνουσα ακτίνα φωτός, η οποία παράγει έναν μεγάλο αριθμό προσπίπτουσών και ανακλώμενων γωνιών και η γωνία συντονισμού εμφανίζεται στη φωτοδίοδο ως σκοτεινή κηλίδα. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δε χρειάζονται μηχανικά μέρη για τον έλεγχο της γωνίας πρόσπτωσης.

2. ESPRIT (Eco Chemie). Η γωνία πρόσπτωσης μεταβάλλεται χρησιμοποιώντας ένα δονούμενο καθρέπτη. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι σε σύντομο χρονικό διάστημα μπορεί να μετρηθεί ένα εύρος γωνιών περίπου 4° . (σχήμα 3.10)

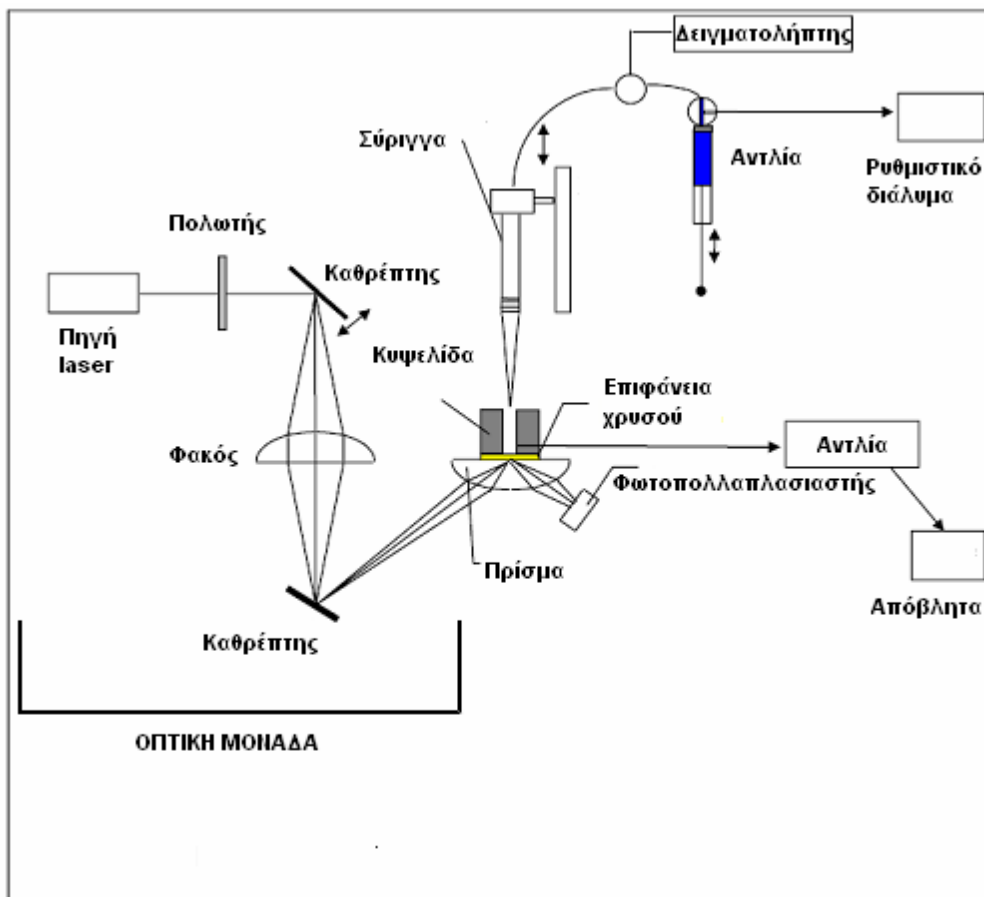
3. SURPLUS (μ -Analytical Systems). Η επιφάνεια χαλαζία/χρυσού τοποθετείται πάνω σε κινούμενη βάση. Όπως αναφέρεται παραπάνω, ο έλεγχος της γωνίας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με μηχανικά μέρη μειώνει σημαντικά την ανάλυση του δείκτη διάθλασης.

Τέλος σε αναλυτές οι οποίοι χρησιμοποιούν οπτικές ίνες, αντί της γωνίας πρόσπτωσης, μεταβάλλεται το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το φαινόμενο SPR παρατηρείται σε μέταλλα των οποίων τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται σαν αέριο ελεύθερων ηλεκτρονίων (plasma), εννοώντας ότι οι κινήσεις τους είναι ανεξάρτητες του φορτίου τους. Αυτό περιορίζει την επιλογή του μετάλλου σε υλικά όπως ο χρυσός, ο χαλκός, ο άργυρος, το παλλάδιο και το αλουμίνιο. Το πάχος του μεταλλικού στρώματος εξαρτάται από τις οπτικές σταθερές του υλικού και από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στους περισσότερους αναλυτές SPR το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι 670 nm και το βέλτιστο πάχος της μεταλλικής επιφάνειας περίπου 50 nm.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Υπάρχει μια γραμμική σχέση ανάμεσα στη ποσότητα της δεσμευμένης πρωτεΐνης και της μεταβολής στη γωνία συντονισμού. Η ευαισθησία της μεθόδου σε ένα συγκεκριμένο διαλύτη εξαρτάται από την ευαισθησία του οργάνου στον υπολογισμό της μεταβολής της γωνίας συντονισμού. Ενδεικτικά, η δέσμευση 1 ng πρωτεΐνης σε επιφάνεια 1 nm^2 χρυσού προκαλεί μεταβολή της γωνίας συντονισμού κατά 0.12 μοίρες ή αντίστοιχα μεταβολή του δείκτη διάθλασης του διαλύματος κατά 0.001.

Η διακριτική ικανότητα των περισσότερων εμπορικών αναλυτών είναι $0,05 \text{ m}^o$ και 5×10^{-7} αντίστοιχα. Η ευαισθησία της μεθόδου εξαρτάται επίσης από το μοριακό βάρος (όγκο) του αναλύτη. Αν το μοριακό βάρος του αναλύτη είναι μικρότερο από 5 kDa (Dalton-the atomic mass unit) τότε η αλλαγή στο δείκτη διάθλασης και κατ' επέκταση η μεταβολή της γωνίας συντονισμού είναι πολύ μικρή και δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια. Το βάθος διείδυσης του παροδικού κύματος 300-400 nm καθορίζει επίσης το μέγεθος των μορίων που μπορούν να μελετηθούν. Για μόρια μεγαλύτερα από 400 nm είναι δυνατή μόνο η ποιοτική παρακολούθηση της αλληλεπίδρασης με την επιφάνεια του αισθητήρα



Σχήμα 3.10: Σχηματική παράσταση του αναλύτη ESPRIT.

3.1.4

Γραφένιο (Graphene)

Το γραφένιο είναι ένα ατομικό μονόστρωμα που αποτελείται από άτομα άνθρακα σφικτά τοποθετημένα (συσκευασμένα) σε ένα δισδιάστατο πλέγμα σε σχήμα κυψέλης. Ως ένα πολλά υποσχόμενο υλικό που ανακαλύφθηκε πρόσφατα και συνδυάζει εξαιρετικές ηλεκτρονικές, φωτονικές και μηχανικές ιδιότητες, το γραφένιο έχει προσελκύσει πολύ μεγάλη προσοχή στην επιστημονική κοινότητα. Η επιδειχθείσα υψηλή κβαντική επάρκεια του για αλληλεπιδράσεις φωτός-ύλης, όπως επίσης η ισχυρή οπτική μη γραμμικότητα του, το υψηλό κατώφλι οπτικής καταστροφής του και πιο σημαντικά η ικανότητα του να ρυθμίζονται εύκολα οι οπτικές του ιδιότητες, είναι στοιχεία που αναδεικνύουν το γραφένιο ως έναν πολλά υποσχόμενο υποψήφιο για φωτονικές συσκευές.

Εκμεταλλούμενοι την ύπαρξη αργών ρυθμών μπορούμε να οδηγηθούμε στην πιθανότητα υλοποίησης ηλεκτρικά ρυθμιζόμενων πλασμονικών διακοπών και στοιχείων οπτικής μνήμης.

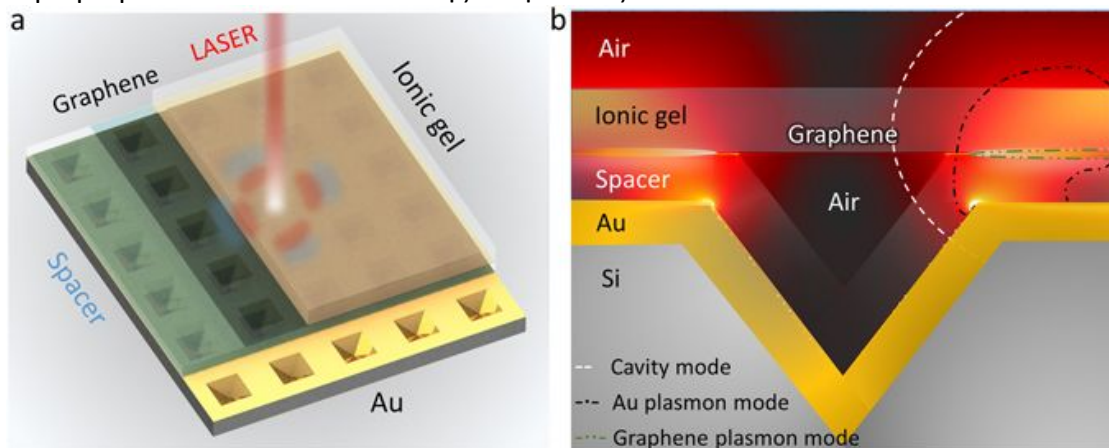
Παρά το ότι ο δείκτης οπτικής απορρόφησης του γραφενίου της τάξης του 2.3% είναι ένα εντυπωσιακό νούμερο για ένα ατομικό μονόστρωμα, δεν είναι αρκετό για πραγματικές εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλότερες τιμές απορρόφησης για επαρκή λειτουργία. Ενισχύοντας την απορρόφηση του φωτός στο γραφένιο, ενόσω διατηρούμε την ικανότητα να έχει ισχυρή και δυναμική μεταγωγή ή επαρκή διαμόρφωση της απορρόφησης, είναι καιρία για την εμπορευματοποίηση ενεργών φωτονικών συσκευών βασισμένων στο γραφένιο.

Εξαιρετική πρόοδος έχει γίνει προσφάτως για να επιτευχθεί ενισχυμένη απορρόφηση φωτός στο γραφένιο. Έχουν προταθεί τέλειοι απορροφητές από γραφένιο βασισμένοι σε δίσκους και ταινίες γραφενίου, τοποθετημένων σε μικρή απόσταση από μια μεταλλική γειωμένη πλάκα. Αυτές επωφελούνται από φαινόμενα παρεμβολής που προκύπτουν από τη αραιωμένη γεωμετρία (spacer geometry) που βοηθάει να διασκορπιστεί η εισερχόμενη ακτινοβολία. Επιπλέον μοτίβα από γραφένιο έχουν χρησιμοποιηθεί ως στοιχεία παγίδευσης φωτός, που μπορεί να ενισχύσει την οπτική απορρόφηση σε περιβάλλοντα απορροφητικά μέσα. Ενισχυτικές πολυστρωματικές διατάξεις ολικής ανάκλασης (πρίσματα/γραφένιο/χαλαζίας) έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για να ενισχυθεί σημαντικά η απορρόφηση φωτός στο γραφένιο, στις οπτικές συχνότητες. Σε τέτοιες συσκευές η συνεκτική απορρόφηση επιτυγχάνεται υλοποιώντας φαινόμενα παρεμβολής σε μια πολυστρωματική δομή, με μεγάλη αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη γεινίαση του στρώματος γραφενίου. Συσκευές ετεροδομών έχουν επίσης προταθεί θεωρητικά για να επιτευχθεί τέλεια απορρόφηση στην

περιοχή των THz, εκμεταλλευόμενοι τον ισχυρό εντοπισμό φωτονίων σε ένα εισαγόμενο στρώμα ατελειών γραφενίου.

Παρ' όλα αυτά, το να πετύχουμε ισχυρή οπτική απορρόφηση σε ένα μονόστρωμα γραφενίου, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα να ρυθμίζεται δυναμικά το μήκος κύματος της απορρόφησης κατά ένα μεγάλο φασματικό εύρος και ειδικά μακριά από τις μεσαίες υπέρυθρες και THz συχνότητες, παραμένει ένα δύσκολο αλλά πολύ επιθυμητό αποτέλεσμα. Στην εργασία των [72] παρουσιάζεται μια συσκευή ικανή να ξεπεράσει αυτούς τους περιορισμούς, παρέχοντας επαρκή ηλεκτρική διαμόρφωση και σχεδόν ολοκληρωτική οπτική απορρόφηση κατά ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος, καθώς επιτρέπει τη λειτουργία ακόμα και στις μεσαίες υπέρυθρες και σχεδόν οπτικές συχνότητες.

Το σχήμα 3.11α δείχνει τη διάταξη της συσκευής. Μία δισδιάστατη συστοιχία από αντεστραμμένους πυραμιδοειδής λάκκους σχηματίζει ένα περιθλαστικό κιγκλίδωμα που λειτουργεί ως ένα στοιχείο ταιριάσματος φάσης και συζευγνύει τα εισερχόμενα φωτόνια με πλασμόνια σε ένα συνεχές στρώμα γραφενίου. Σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες ένα συνεχές στρώμα γραφενίου, αντί μιας μικρό/νάνο μοτίβας γραφενίου, επιτρέπει την εξαγωγή διαδιδόμενων ρυθμών, αντί για εντοπισμένους ρυθμούς. Τέτοιοι διαδιδόμενοι ρυθμοί τυπικά έχουν υψηλότερο περιορισμό πεδίου στο επίπεδο της επιφάνειας.



Σχήμα 3.11: Συσκευή ικανή να παρέχει επαρκή ηλεκτρική διαμόρφωση, σε σχεδόν ολοκληρωτική οπτική απορρόφηση κατά ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος, καθώς επιτρέπει τη λειτουργία ακόμα και στις μεσαίες υπέρυθρες και σχεδόν οπτικές συχνότητες. (α) Σχήμα της διάταξης της συσκευής. (β) Καλλιτεχνική αναπαράσταση της λειτουργίας της συσκευής, που δείχνει τα διάφορα στοιχεία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε αυτήν.

Η οπτική απορρόφηση από το μονόστρωμα ενισχύεται περαιτέρω τοποθετώντας το γραφένιο σε κοντινή γειτονιά με ένα στρώμα χρυσού, που επίσης επιτρέπει την διάδοση πλασμονίων. Η δομή αποτελείται από ένα σύμμορφο διστρωματικό μανδύα μετάλλου-διηλεκτρικού, τοποθετημένο πάνω από το υποκείμενο περιθλαστικό κιγκλίδωμα. Ο ρόλος του διηλεκτρικού αραιωτή είναι να διαχωρίζει το στρώμα γραφενίου από το χρυσό πίσω ανακλαστήρα, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως πίσω πύλη για να διαμορφωθεί το χημικό δυναμικό του

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

γραφηνίου. Ένα ιονικό ζελέ τοποθετείται επιπλέον πάνω στο γραφένιο για να παρέχει υψηλής επάρκειας μέθοδο περίφραξης, ώστε να επιτευχθεί ισχυρό ηλεκτροστατικό ντοπάρισμα του ατομικού μονοστρώματος (υπάρχει μεγάλη ποικιλία ιονικών ζελέ που μπορούν να χρησιμοποιηθούν). Χρησιμοποιώντας ιονικό ζελέ ως το πρώτο διηλεκτρικό κάλυμμα σε ένα σύστημα περίφραξης, επιτρέπει ισχυρή διαμόρφωση του χημικού δυναμικού σε λειτουργία χαμηλής τάσης (από 0 eV μέχρι 0.8 eV με 3 V εφαρμοζόμενης τάσης) επιτρέποντας έτσι ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος για ρύθμιση των διεγέρσεων πλασμονίων στο στρώμα γραφηνίου. Το να περιλάβουμε το στρώμα αραιωτή και το στρώμα ζελέ ιόντων έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας ασθενούς μονοδιάστατης μικροκοιλότητας εγκάρσια στην επιφάνεια κικκλιδώματος, που είναι γνωστή και ως οθόνη Salisbury.

Η συσκευή που παρουσιάζεται δίνει τη δυνατότητα να κατασκευαστεί μια ποικιλία από ρυθμιζόμενες νανοφωτονικές συσκευές, περιλαμβάνοντας αισθητήρες, φωτονικές λογικές πύλες, οπτικές διασυνδέσεις και ηλεκτροοπτικές μνήμες.

Οι πλασμονικές διεγέρσεις μπορούν να καταργηθούν δυναμικά χαμηλώνοντας το χημικό δυναμικό και μετακινούμενες από την υπέρ-ζωνική στην ένδο-ζωνική περιοχή μεταφοράς. Η δυνατότητα να ρυθμίζονται ηλεκτρικά οι ιδιότητες των πλασμονίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπως η οπτική διαμόρφωση σε ολοκληρωμένο κύκλωμα, οι φωτονικές λογικές πύλες, οι οπτικές διασυνδέσεις και οι εφαρμογές αισθητήρων.

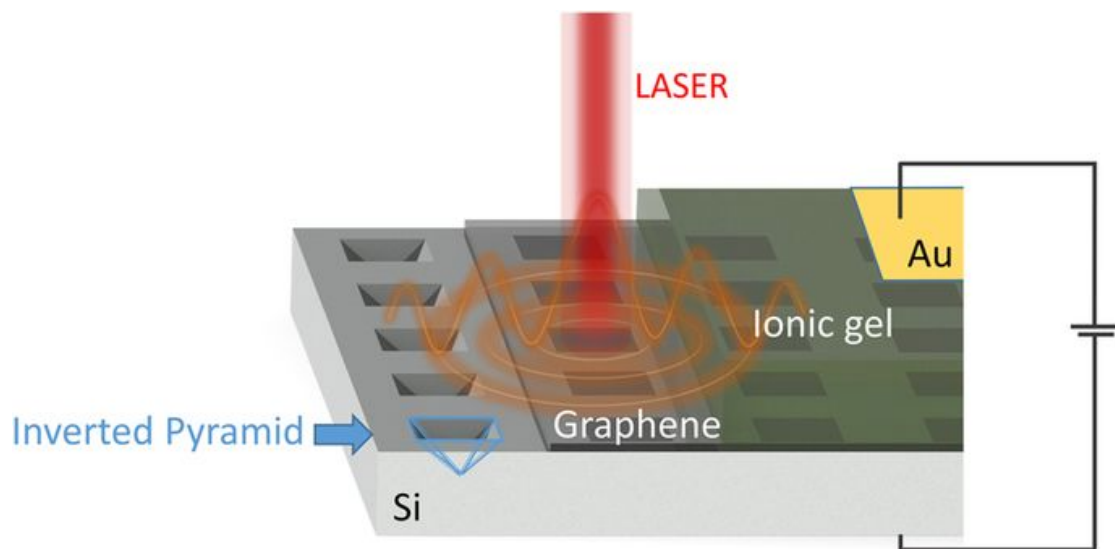
Ο λόγος που το γραφένιο έχει τραβήξει τόσο την προσοχή στην φωτονική έρευνα είναι η γραμμική διασπορά των ηλεκτρονίων Dirac σε συνδυασμό με την ικανότητα να διαφοροποιεί εντόνως τις ηλεκτρονικές και οπτικές ιδιότητές του, μέσω της δυναμικής ηλεκτροστατικής διαμόρφωσης του χημικού δυναμικού του με εφαρμογή τάσης πύλης.

Πολλές μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί με σκοπό να συζευχθούν και να ελεγχθούν δυναμικά τα πλασμόνια στο γραφένιο. Βασισμένα σε μονοδιάστατες αυλακώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί κικκλιδώματα περίθλασης ως στοιχεία ταιριάσματος φάσης, σε κυματοδιάνυσμα μεταξύ εισερχομένων φωτονίων και πλασμονίων στο γραφένιο. Αυτό παρέχει έλεγχο της συχνότητας πλασμονίων μέσω αλλαγής της ελαστικής σταθεράς του κικκλιδώματος ή εφαρμόζοντας μια τάση που διαφοροποιεί το χημικό δυναμικό του γραφηνίου. Μικροδομές και νανοδομές γραφηνίου έχουν επίσης μελετηθεί με σκοπό να συζευχθούν και να ελεγχθούν εντοπισμένα πλασμόνια. Ταινίες, δίσκοι και δομές δαχτυλιδιών έχουν διερευνηθεί, επιδεικνύοντας έλεγχο της συχνότητας πλασμονίων με ηλεκτροστατική περίφραξη και αλλαγή της γεωμετρίας ή του μεγέθους. Σε κάθε περίπτωση, το να μετατοπίσουμε τον συντονισμό του πλασμονίου κοντά στο υπέρυθρο εύρος ζώνης και κοντά στις οπτικές συχνότητες, έχει υπάρξει μια μεγάλη πρόκληση. Τα υψηλότερα μήκη κύματος σε διεγέρσεις πλασμονίων σε αυτό το φασματικό εύρος έχουν επιτευχθεί με την εισαγωγή υβριδικών δομών μετάλλου/γραφηνίου, τυπικών μεταλλικών, χρυσών νανοκεραιών, νανοράβδων και bowties (σε σχήμα παπιγιόν), σε απευθείας επαφή με ένα στρώμα γραφηνίου. Σε αυτή την περίπτωση τα πλασμόνια

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

διεγείρονται σε μεταλλικές νανοδομές και η ρύθμιση επιτυγχάνεται με ισχυρή ηλεκτρική σύζευξη με το γραφένιο.

Η επίτευξη ισχυρής σύζευξης και πολύ ρυθμιζόμενων πλασμονίων στο γραφένιο μέχρι κοντά σε υπέρυθρες και οπτικές συχνότητες, είναι ένα δύσκολο αλλά πολύ επιδιωκόμενο έργο. Στην δημοσίευση [73] προτείνεται για περιφραξη ένα περιθλαστικό κιγκλίδωμα που αποτελείται από μια συστοιχία αντεστραμμένων πυραμίδων με ένα ιοντικό ζελέ, ως μια επαρκής μέθοδος σύζευξης πλασμονίων στο γραφένιο. Μία δισδιάστατη συστοιχία από αντεστραμμένους πυραμιδοειδείς λάκκους σχηματίζει ένα περιθλαστικό κιγκλίδωμα, που λειτουργεί ως ένα στοιχείο ταιριάσματος φάσης που συζευγνύει τα εισερχόμενα φωτόνια με πλασμόνια σε ένα συνεχές στρώμα γραφενίου, τοποθετημένο πάνω από το περιθλαστικό κιγκλίδωμα ως το ενεργό πλασμονικό μέσο. Το ιοντικό ζελέ επιλέγεται ως το διηλεκτρικό περιφραξης χάρη στην διάφανη φύση του και τις υψηλές χωρητικότητες σε σύγκριση με τα συμβατικά διηλεκτρικά πύλης μεγάλης διηλεκτρικής σταθεράς ϵ . Η διαμόρφωση του χημικού δυναμικού του γραφενίου επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας μια μικρή τάση κατά μήκος του υποστρώματος ιοντικού ζελέ/πυριτίου. Η διάταξη φαίνεται στο σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Σχήμα της διάταξης της συσκευής που δείχνει το στρώμα γραφενίου ανάμεσα στο περιθλαστικό κιγκλίδωμα και το ιοντικό ζελέ, που χρησιμοποιείται ως διηλεκτρική περίφραξη. Όταν η συσκευή φωτοβολείται από μια δέσμη λέιζερ τα φωτόνια περιθλώνται στους λάκκους αντεστραμμένων πυραμίδων και τότε συζευγνύονται με τα πλασμόνια στο γραφένιο.

Πραγματοποιήθηκαν θεωρητικοί υπολογισμοί, όπως και αυστηρές προσομοιώσεις αναλύσεων συζευγμένων κυμάτων, επιδεικνύοντας διέγερση ενός πλασμονικού ρυθμού, με εξαιρετικό έλεγχο της ενέργειας πλασμονίου μέχρι κοντά στην περιοχή του υπέρυθρου, χρησιμοποιώντας ρεαλιστικές τιμές χημικών δυναμικών για το γραφένιο. Επιτεύχθηκε μια μετατόπιση της ενέργειας πλασμονίου από 0.65 eV έως 0.84 eV, όταν μεταβλήθηκε το χημικό δυναμικό του γραφενίου από 0.45 eV έως 0.6 eV.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Συνολικά η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έναν μεγάλο αριθμό πιθανών εφαρμογών, περιλαμβάνοντας αισθητήρες, φωτονικές λογικές πύλες, οπτικές διασυνδέσεις και διαμορφωτές.

Το δισδιάστατο (2D) γραφένιο αναδείχθηκε ως ένα εξαιρετικό υλικό για πλασμονικές και φωτονικές εφαρμογές, εξαιτίας της ρυθμισιμότητας της πυκνότητας φορτίων, της υψηλής κινητικότητας ηλεκτρονίων, της οπτικής διαφάνειας και της μηχανικής ευλυγισίας. Προσφάτως, πρωτότυπες μέθοδοι παρασκευής έχουν οδηγήσει στην υλοποίηση τρισδιάστατων (3D) νανοπορωδών διατάξεων υψηλής ποιότητας μονοστρωματικού γραφενίου, που παρέχει μια τρίτη διάσταση στο υλικό. Στην εργασία [74] ερευνάται η οπτική συμπεριφορά του νανοπορώδους γραφενίου με χρήση φασματοσκοπίας, σε συχνότητες υπερύθρων και terahertz. Παρουσιάζεται η ύπαρξη εσωτερικών 2D πλασμονίων Dirac σε 3D νανοπορώδες γραφένιο, που παρουσιάζουν ισχυρές πλασμονικές απορροφήσεις, ρυθμισιμες από τα terahertz μέχρι τις μεσαίες υπέρυθρες, μέσω ελεγχόμενων επιπέδων ντοπαρίσματος και αραιότητας του υλικού. Στο μακρινό πεδίο το φασματικό εύρος αυτών των απορροφήσεων είναι αρκετά μεγάλο για να καλύψει το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής αποτύπωσης των μεσαίων υπερύθρων συχνοτήτων, με μία μόνο διέγερση ηλεκτρονίων. Η ενισχυμένη επιφανειακή περιοχή των νανοπορωδών δομών, συνδυασμένη με την ευρυζωνική πλασμονική απορρόφηση, θα μπορούσε να στρώσει το δρόμο για πρωτότυπους και ανταγωνιστικούς πλασμονικούς αισθητήρες βασισμένους σε νανοπορώδες γραφένιο.

Τα πλασμόνια, οι συλλογικές ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων στα μέταλλα και στους ντοπαρισμένους ημιαγωγούς, επιδεικνύουν αξιοσημείωτες ιδιότητες, περιλαμβάνοντας μια ισχυρή αλληλεπίδραση με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, μειωμένου μήκους κύματος σε σύγκριση με αυτό του διεγερμένου φωτός, μια τεράστια ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου, αρκετές τάξεις μεγέθους πλάτους μεγαλύτερο από το εισερχόμενο πεδίο φωτός. Αυτές οι ιδιότητες είναι η βάση της επιφανειακά ενισχυμένης Raman και υπέρυθρης φασματοσκοπίας, οι οποίες πλέον χρησιμοποιούνται διαρκώς σε πολλές εφαρμογές βιοαισθητήρων. Ωστόσο, στην αναζήτηση για ρυθμιζόμενες και ενεργές συσκευές, η πλασμονική έχει υπάρξει επαναστατική από τη στιγμή που ανακαλύφθηκε το γραφένιο. Πράγματι, εξαιτίας των μοναδικών ιδιοτήτων αυτού του υλικού, συνδυάζοντας φερμιόνια Dirac που δεν έχουν μάζα, ρύθμιση της πυκνότητας φορτίων, υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων, οπτική διαφάνεια και μηχανική ευλυγισία, τα πλασμόνια γραφενίου αποτελούν ένα υποσχόμενο συστατικό για έξυπνες συσκευές με εφαρμογές σε πολλά πεδία, όπως η οπτοηλεκτρονική, οι φωτο-εντοπιστές και οι βιοαισθητήρες. Επιπλέον, οι μικρές διαστάσεις στις οποίες λειτουργεί το γραφένιο έχουν σαν αποτέλεσμα μια εξαιρετική συμπύκνωση των πλασμονίων, ειδικά στις μεσαίες υπέρυθρες και στις συχνότητες terahertz (THz), γεγονός που επιτρέπει την υλοποίησή τους σε κλίμακα νάνο, όπως έχει θεωρητικά προβλεφθεί και επιδειχθεί πειραματικά. Με κινητήρια δύναμη τα παραπάνω, πολλές μικρό- και νάνο-δομές γραφενίου έχουν προταθεί και υλοποιηθεί τα τελευταία χρόνια, συνδυάζοντας διαφορετικά σχήματα και μεγέθη, πολυστρωματικά συστήματα, διαφορετικά

υποστρώματα και υβριδικές συσκευές, περιλαμβάνοντας ενεργούς σχηματισμούς για πλασμονικό έλεγχο μέσω οπτικών και ηλεκτρικών παλμών.

Προσφάτως μια πρωτότυπη διαδικασία παρασκευής επέτρεψε στους ερευνητές να παράξουν μια τρισδιάστατη νανοπορώδη διάταξη υψηλής ποιότητας μονοστρωματικού γραφενίου, συνθεθειμένου από ένα τρισδιάστατο δίκτυο διασυνδεδεμένων μονοστρωμάτων γραφενίου με ασυνεχή πόρωση (αραιότητα της ύλης). Αυτή η νανοπωρώδης δομή παρέχει μια εξαιρετικά ενισχυμένη επαρκή περιοχή επιφάνειας και μια τρίτη διάσταση στο γραφένιο. Καθώς το νανοπορώδες γραφένιο είναι αντικείμενο τρεχουσών ερευνών, με σκοπό να εξερευνηθούν οι εφαρμογές του για ηλεκτρόδια που συλλέγουν ενέργεια υψηλής επάρκειας παραγωγής ατμού μέσω ηλιακού φωτισμού και μπαταρίες λιθίου-αέρα, πολύ λίγα είναι γνωστά για τις ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητές του. Στην εργασία [74] παρουσιάζεται για πρώτη φορά η οπτική συμπεριφορά του νανοπωρώδους γραφενίου με χρήση στις μεσαίες υπέρυθρες και terahertz (THz) συχνότητες φασματοσκοπίας. Τονίζεται η παρουσία εσωτερικών δισδιάστατων πλασμονίων Dirac σε τρισδιάστατο νανοπορώδες γραφένιο, αποκαλύπτοντας τη συμπεριφορά τους με χρήση ελεγχόμενων επιπέδων ντοπαρίσματος και ρυθμιζόμενης πορωσιμότητας (αραιότητας της ύλης). Λαμβάνοντας υπόψη την ενισχυμένη περιοχή επιφάνειας, η εργασία αυτή ανοίγει το δρόμο για καινοτόμους πλασμονικούς αισθητήρες, βασισμένους σε γραφένιο.

Τα επιφανειακά πλασμόνια σε νανοδομές γραφενίου συμπεριφέρονται με ευδιάκριτο τρόπο, εξαιτίας του φαινομένου πεπερασμένου μεγέθους. Η παρατήρηση σε πραγματικό χώρο των επιφανειακών πλασμονίων σε νανοταινίες και νανοκενά γραφενίου και η έρευνα των φαινομένων άκρων είναι θεμελιώδους σημασίας για την περεταίρω κατανόηση του φαινομένου πεπερασμένου μεγέθους, αλλά δεν έχει ακόμα επιδειχθεί. Η υπέρυθρη απεικόνιση αυτών των νανοδομών θα μπορούσε να αποκαλύψει τελειωτικά τα πλασμονικά φαινόμενα σε συστήματα περιορισμένα σε δύο διαστάσεις, διευκολύνοντας έτσι την παρασκευή πλασμονικών συσκευών μικροσκοπικών δισδιάστατων. Ωστόσο, η απεικόνιση πραγματικού χώρου των πλασμονικών ρυθμών σε γραφένιο νανοκλίμακας παραμένει μια πρόκληση, εξαιτίας της έλλειψης μια ώριμης τεχνικής παρασκευής ικανής να παράξει φρέσκες ακμές νανοδομών γραφενίου, σε μοτίβα με ακριβή έλεγχο του σχήματος και της ποιότητας. Επιπλέον η συμβατική λιθογραφία δεν μπορεί να παράξει νανοδομές γραφενίου σε μοτίβα με καλά καθορισμένες ακμές.

Στην εργασία [75] προσαρμόστηκε μια μέθοδος ανάπτυξης μέσω χάραξης σε μια διαδικασία εναπόθεσης χημικού ατμού, για να παραχθούν δομές νανοταινιών και νανοκενών σε μοτίβα με καλά καθορισμένες ακμές σε φιλμ γραφενίου και μονούς κρυστάλλους. Χρησιμοποιώντας τεχνολογία υπέρυθρης νανοαπεικόνισης, παρήχθησαν εικόνες οπτικού πλάτους των νανοταινιών και νανοκενών γραφενίου για πρώτη φορά. Οι ειδικά εντοπισμένοι πλασμονικοί ρυθμοί στη νανοταινία γραφενίου εξαρτιόνταν εμφανώς από το πλάτος της νανοταινίας, την γωνία κορυφής και το μήκος κύματος του εισερχόμενου φωτός. Επίσης παρατηρήθηκε η ενίσχυση παρεμβολής στο νανοκενό γραφενίου και αποδόθηκε αυτό το φαινόμενο στο μικρό μέγεθος του κενού, το οποίο δίνει τη δυνατότητα συσσώρευσης των

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

φερουσών στο κενό. Επιπλέον, διερευνήθηκε πειραματικά το φαινόμενο της χειρομορφίας (chirality) των ακμών γραφενίου στην πλασμονική ανάκλαση και παρεμβολή, επιβεβαιώνοντας τις θεωρητικά προβλεπόμενες διαδράσεις φωτονίων-πλασμονίων, που εξαρτώνται από την χειρομορφία. Τα ληφθέντα αποτελέσματα δύνανται να ανοίξουν το δρόμο για την ανάπτυξη ενεργών, πέρα του ορίου περίθλασης οπτικών, και μια πληθώρα νανοοπτοηλεκτρονικών συσκευών και λειτουργικοτήτων, όπως κυματοδηγών βασισμένων στο γραφένιο, συσκευών κβαντικών πληροφοριών, επεξεργασίας οπτικών σημάτων και εφαρμογών υπερευαίσθητων αισθητήρων.

3.1.5

Φωτονική (Photonics)

Τα πολαριτόνια επιφανειακών πλασμονίων (SPPs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επόμενη γενιά φωτονικών κυκλωμάτων. Παρόμοια με τα φωτόνια, μπορούν να μεταφέρουν πληροφορίες. Είναι κατευθυντικά και συνεκτικά και έχουν το πλεονέκτημα ότι καταλαμβάνουν ένα χώρο πολύ μικρότερο από το όριο περίθλασης του φωτός. Λόγω αυτού έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια για τον έλεγχο της κατευθυντικότητας των πολαριτονίων επιφανειακών πλασμονίων. Συγκεκριμένα, η έρευνα εστιάστηκε στη δημιουργία μικρών πλασμονικών συσκευών, που μπορούν να συνδυάσουν αποτελεσματικά το φως με τους SPP και να τις καθοδηγήσουν στις περιοχές ενδιαφέροντος

Υπάρχει μια πληθώρα ρυθμών επιφανειακών πλασμονίων, οι οποίοι μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες: εντοπισμένοι συντονισμοί επιφανειακού-πλασμονίου σε περιορισμένα νανοσωματίδια και διαδιδόμενα επιφανειακά πλασμόνια σε εκτεταμένους κυματοδηγούς. Δεδομένου του χαρακτήρα διάδοσης του, ο τελευταίος είναι ένας ιδανικός υποψήφιος για ελαφρύ χειρισμό επί της νανοκλίμακας σε ολοκληρωμένα οπτικά νανοκυκλώματα, τα οποία μπορούν να εκτελούν λειτουργίες όπως η επεξεργασία, η δρομολόγηση ή η διαμόρφωση υψηλής ταχύτητας.

Η επίτευξη της εξαιρετικά γρήγορης μετατροπής των ηλεκτρικών σε οπτικά σήματα σε νανοκλίμακα, με τη χρήση πλασμονικών, είναι ένας μακροχρόνιος στόχος, λόγω της δυνατότητάς του να φέρει επανάσταση στα ηλεκτρονικά και να επιτρέψει εξαιρετικά γρήγορη επικοινωνία και επεξεργασία σήματος. Δεδομένου του ισχυρού περιορισμού τους στο πεδίο, τα πλασμονικά συστήματα συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των υψηλών συχνοτήτων (10¹⁴-10¹⁵ THz) με τα πλεονεκτήματα των

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

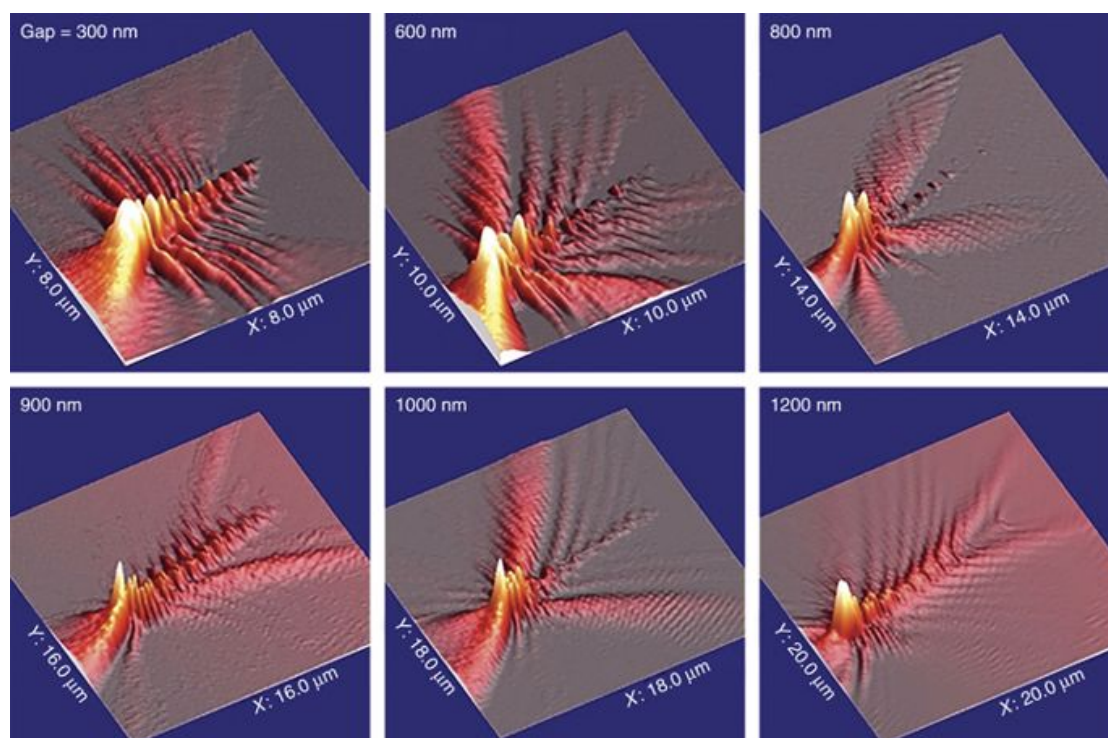
μικρών χωρικών ζυγών, αποφεύγοντας έτσι τον περιορισμό των συμβατικών φωτονικών συστημάτων

Η διάδοση επιφανειακών πλασμονίων στη διεπιφάνεια μεταξύ μεταλλικών μεμβρανών και διηλεκτρικών υλικών μπορεί να προσδιοριστεί με διαμόρφωση των μεμονωμένων επιφανειακών νανοδομών, ή μέσω του ελέγχου φάσεως μεμονωμένων στοιχείων σε μια σειρά τέτοιων δομών. Στην εργασία [76] επιδεικνύεται ο έλεγχος της διάδοσης επιφανειακών πλασμονίων μέσα σε μια γραμμική συστοιχία νανοδομών. Η γενική κατάσταση της μεταβολής της πλασμονικής επιφάνειας, η οποία είναι διαφορετική και στις δύο πλευρές μιας μεταλλικής μεμβράνης, παρέχει μια μοναδική ευκαιρία για έναν τέτοιο έλεγχο. Τα πλασμόνια που διαδίδονται στην πιο αργή πλευρά τροφοδοτούνται από την πλευρά με την ταχύτερη διάδοση, δημιουργώντας μια σταδιακή σειρά κεραιών που παρεμβαίνουν και ελέγχουν έτσι την κατευθυντικότητα των αναπτυσσόμενων πεδίων. Επιπλέον, δείχνεται ότι με τη διαμόρφωση των μεμονωμένων νανοκεραιών, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια ασύμμετρη γεωμετρία διάδοσης.

Το σχέδιό βασίζεται σε μια ζεύξη εξαρτώμενη από την πόλωση των νανοκοιλοτήτων, μέσω της διάδοσης πλασμονίων. Διεγείρεται μια μονάχα κοιλότητα και η ενέργεια μεταφέρεται από εκείνο το σημείο στις άλλες κεραιές από τους SPPs, μέσω ενός μονοδιάστατου πίνακα (συστοιχίας). Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, πρέπει να φωτιστεί μόνο μια πολύ μικρή δομή (spot) και μπορεί κανείς να συζευξει αποτελεσματικά το φως στα κατευθυντικά SPPs. Έτσι, η διέγερση μπορεί ακόμη να γίνει χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες. Επιπλέον, η κατεύθυνση των εξερχόμενων SPPs είναι ανεξάρτητη από τη γωνία φωτισμού, κάνοντας αυτή τη μέθοδο πολύ ισχυρή (robust).

Αναφέρεται η παρατήρηση των αναδυόμενων πλασμονικών πεδίων, που δημιουργούνται από την παρεμβολή δύο διαδιδόμενων πλασμονίων με διαφορετικές ταχύτητες (σχήμα 3.13). Το φαινόμενο παρατηρείται σε μια μεμβράνη χρυσού σε ένα γυάλινο υπόστρωμα και βασίζεται στους διάφορους αποτελεσματικούς δείκτες διάθλασης για το SPP, στην πλευρά του γυαλιού και στην πλευρά του αέρα της μεταλλικής μεμβράνης. Η σύζευξη μεταξύ των πάνω και των κάτω SPP, μέσω των οπών, δημιουργεί μια σειρά συγχρονισμένων κεραιών, που προκαλούν την εμφάνιση των αναδυόμενων πεδίων. Η διασπορά των κρούσεων δεν εξαρτάται από τη γωνία φωτισμού και, κατ' αρχήν, ο ίδιος μηχανισμός θα πρέπει να εφαρμόζεται κάθε φορά που παρεμβαίνουν δύο SPPs. Λόγω της ισχυρής εξάρτησης των φάσεων από το δείκτη διάθλασης του υποστρώματος, η ελεγχόμενη αλλαγή αυτού του δείκτη θα επιτρέψει τον έλεγχο της κατευθυνόμενης διάδοσης των αναδυόμενων πεδίων, τις επιλογές ανοίγματος για την κατεύθυνση, τη διάσπαση και τη δρομολόγηση επιφανειακών πλασμονίων. Προτείνεται μια μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του δείκτη διάθλασης του υποστρώματος με

υψηλή ακρίβεια. Πολλές προτάσεις για ελεγχόμενες αλλαγές στο δείκτη διάθλασης έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια και βρίσκονται σε εξέλιξη πειράματα για τη χρησιμοποίηση αυτών των προτάσεων.



Σχήμα 3.13: Επιδεικνύεται ο έλεγχος της διάδοσης επιφανειακών πλασμονίων μέσα σε μια γραμμική συστοιχία νανοδομών. Τα κοντινά πεδία πάνω από την μεμβράνη, μετρούμενα για διαφορετικά κενά όταν διεγείρεται μόνο η πρώτη κοιλότητα. Η διέγερση παράγεται χρησιμοποιώντας μια γραμμικά πολωμένη δέσμη He-Ne (632,8 nm) από την πλευρά του γυαλιού, με πόλωση κατά μήκος του μακριού άξονα συστοιχίας, για να εξασφαλιστεί η πλασμονική διάδοση κατά μήκος της συστοιχίας. Το κενό μεταξύ των κοιλοτήτων δίνεται σε κάθε περίπτωση.

Οι τοπολογικές οπτικές καταστάσεις παρουσιάζουν μοναδική ανοσία στις ατέλειες, καθιστώντας τα ιδανικά για φωτονικές εφαρμογές. Μια ισχυρή τάξη τέτοιων καταστάσεων βασίζεται στο σπάσιμο της συμμετρίας χρονικής αναστροφής της οπτικής απόκρισης. Ωστόσο, οι υπάρχουσες προτάσεις είτε περιλαμβάνουν εξελιγμένα και ογκώδη δομικά σχέδια, είτε μπορούν να λειτουργούν μόνο στο πλαίσιο της μικροκυματικής περιοχής. Στην [77] παρουσιάζεται μια θεωρητική επίδειξη για εξαιρετικά περιορισμένες τοπολογικά προστατευμένες οπτικές καταστάσεις, που θα πραγματοποιηθούν σε υπέρυθρες συχνότητες, σε μια απλή δισδιάστατη (2D) δομή υλικού - μία μονοστιβάδα με περιοδικό μοτίβο - υποκείμενη σε μαγνητικό πεδίο μόνο 2 Tesla. Αυτή η προσέγγιση είναι απλή και ισχυρή για την πραγματοποίηση τοπολογικά μη κοινότοπων οπτικών καταστάσεων σε 2D ατομικές στρώσεις και θα μπορούσε να ανοίξει το δρόμο για την κατασκευή

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

γρήγορων φωτονικών συσκευών επιπέδου νανοκλίμακας, μη ευαίσθητων σε ατέλειες.

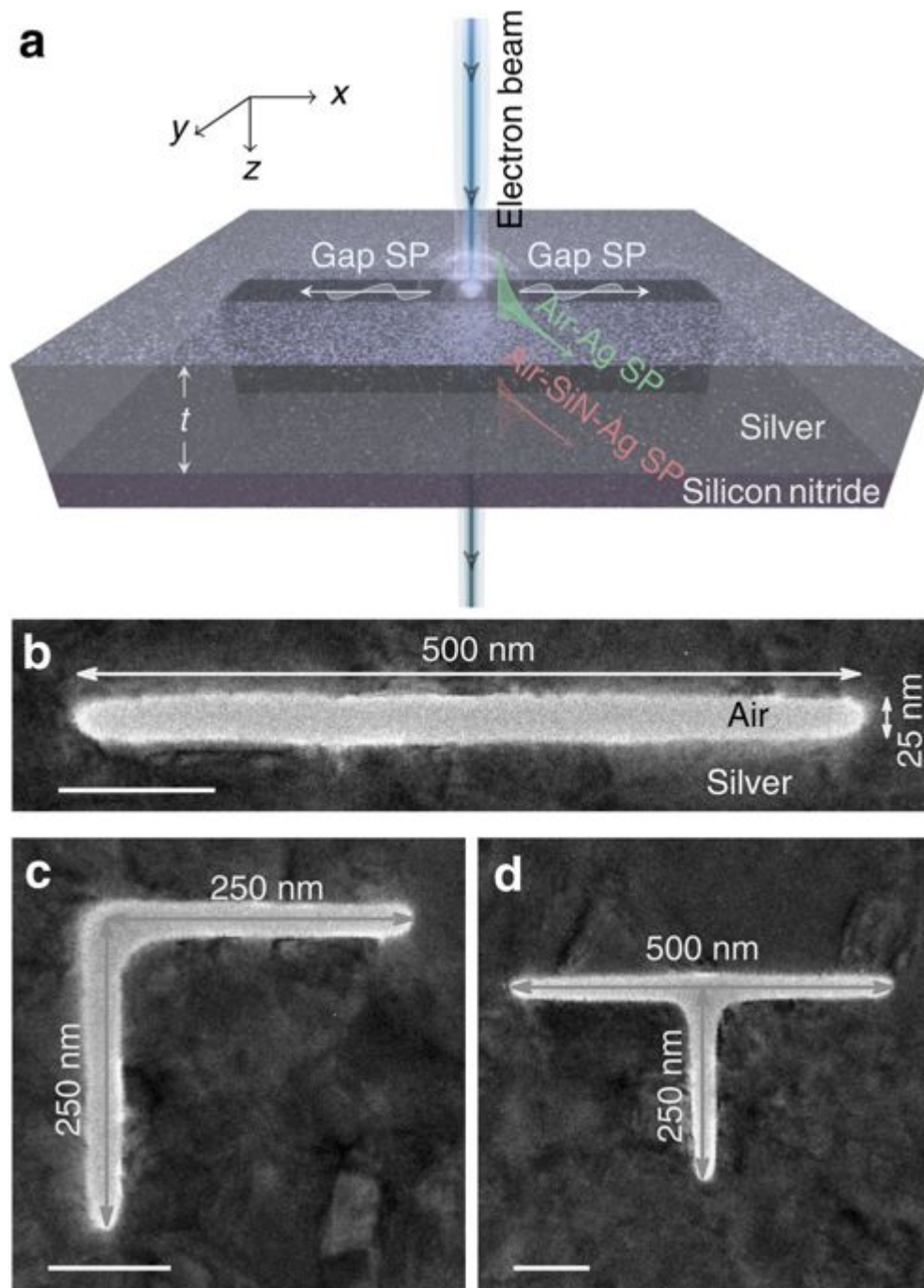
Θεωρητικά καταδεικνύεται ότι οι τοπολογικώς προστατευμένες πλασμονικές καταστάσεις μπορούν να υλοποιηθούν δυναμικά σε υπερπλέγματα DF (Dirac Fermion), που κατασκευάζονται από γραφένιο μονής στοιβάδας, χάρη στη γιγαντιαία μαγνητο-οπτική απόκριση αυτού του υλικού υπό έκθεση σε στατικά μαγνητικά πεδία μόνο λίγων Tesla. Το υπερπλέγμα είναι ένα κυψελοειδές δίκτυο που κατασκευάζεται από νανοταινίες γραφενίου. Το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί ασυμμετρία στους οδηγούμενους ρυθμούς πλασμονίου ταινίας, οδηγώντας τους έτσι σε κατευθυντική σύζευξη στους κόμβους της δομής. Δείχνεται ότι, ως άμεση συνέπεια αυτής της κατευθυνόμενης σύζευξης, σχηματίζονται εντοπισμένοι ρυθμοί μέσα στο υπερπλέγμα, καθώς και τοπολογικά προστατευμένες καταστάσεις άκρων στα όρια.

Ο σχεδιασμός αυτός παρέχει μια απλή, αλλά ισχυρή πλατφόρμα για μεγάλης ταχύτητας, εξαιρετικά συμπαγή, μη αμοιβαία οπτικά δίκτυα υπολογιστών, ανοίγοντας έτσι το δρόμο προς ρεαλιστικές εφαρμογές της τοπολογικής φωτονικής.

Παρά τον θεμελιώδη πλασμονικό συνδυασμό μεταξύ του περιορισμού του ρυθμού και του μήκους διάδοσης, τα επιφανειακά πλασμόνια διακένου (GSPs), τα οποία διαδίδονται σε ένα διηλεκτρικό μέσο ή σε διάκενο αέρος μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών, παρέχουν τα απαιτούμενα δυνατά σημεία εντοπισμού και μήκους διάδοσης σε επίπεδο μικρομέτρων, για ολοκληρωμένη οπτική.

Στην [78] χρησιμοποιείται το STEM-EELS για να χαρακτηριστεί ο ρυθμός επιφανειακών πλασμονίων διακένου, υποστηριζόμενο από τους ελεύθερους αιωρούμενους κυματοδηγούς υποδοχής και συντονισμού (επί του νιτριδίου του πυριτίου), που έχουν πλάτος μόνο 25 nm, οι οποίοι είναι αρκετά στενότεροι από τους υπερσύγχρονους κυματοδηγούς σχισμών. Μελετώνται τόσο οι ευθείς όσο και οι διακλαδισμένοι κυματοδηγοί συντονισμού και υποδοχής για εφαρμογές νανοκυκλωμάτων (Σχήμα 3.14). Εκτός από την παροχή πειραματικών στοιχείων για τις σημαντικές ιδιότητες ευρυζωνικής διάδοσης της υποδοχής GSP, δείχνεται επίσης ότι μπορεί να επιτευχθεί κάμψη 90° με αμελητέα αντίστροφη ανάκλαση, η οποία απαιτείται για τη δρομολόγηση φωτός σε νανοκλίμακα. Η διαμόρφωση φωτός συχνά απαιτεί τη διάσπαση και παρεμβολή πολλών δεσμών, οι οποίες και στις δύο περιπτώσεις συμβαίνουν σε διασταυρώσεις στο οπτικό κύκλωμα. Με την εξέταση διασταυρώσεων σχήματος σταυρού ή T στους κυματοδηγούς συντονισμού και υποδοχής, δείχνεται ότι η διάσπαση μπορεί επίσης να επιτευχθεί με την υποδοχή GSP. Σε άλλη σημείωση, οι φασματικές θέσεις των διεγερόμενων από το GSP διεγέρσεων του συντονιστή σχισμών εξαρτώνται έντονα από το μήκος οπτικής διαδρομής, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανίχνευση του δείκτη

διαθλάσεως. Στην πραγματικότητα δείχνεται ότι η ευαισθησία του ανιχνευτή νανοκλίμακας είναι συγκρίσιμη με τους πλέον σύγχρονους πλασμονικούς αισθητήρες παρόμοιων αποτυπώσεων. Η ευκολία κατασκευής και οι επιθυμητές οπτικές ιδιότητες καθιστούν την υποδοχή GSP θεμελιώδους και πρακτικού ενδιαφέροντος με μεγάλη ποικιλία πλασμονικών εφαρμογών.



Σχήμα 3.14: α) Καλλιτεχνική αποτύπωση μιας ταχείας δέσμης ηλεκτρονίων, που αλληλεπιδρά με μια ευθεία σχισμή πάχους t . Η δέσμη ηλεκτρονίων διεγείρει τα επιφανειακά πλασμόνια διακένου μέσα στην σχισμή και τα κανονικά επιφανειακά πλασμόνια στις διεπαφές κορυφής (αργύρου-αέρα) και πυθμένα (αζώτου-πυριτίου-νιτριδίου-αέρα). (b-d) Εικόνες TEM σχεδίου με ετικέτες μεγέθους

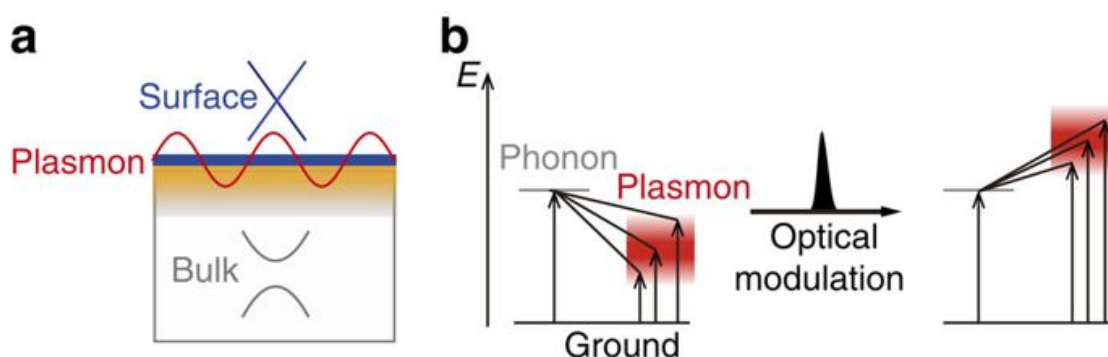
Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

μερικών κορδονιών από τις κατασκευασμένες γεωμετρίες, για παράδειγμα, (β) ευθεία, (γ) σχήμα L και (δ) διανομοιογενείς διαμορφώσεις μορφής T. Γραμμή κλίμακας, 100 nm.

Σε μια εννοιολογικά καινοτόμο ανακάλυψη άνω των 80 ετών, ο Čerenkov έδειξε πως τα φορτισμένα σωματίδια εκπέμπουν κύματα φωτός, όταν κινούνται ταχύτερα από την ταχύτητα φάσης του φωτός σε ένα μέσο. Στα σύγχρονα μάτια, το φαινόμενο Čerenkov προσφέρει ένα άμεσο και εξαιρετικά γρήγορο σχέδιο μετατροπής ενέργειας από τα σωματίδια φορτίου στα φωτόνια. Ωστόσο, η απαίτηση για σχετικιστικά σωματίδια καθιστά την εκπομπή του Čerenkov απρόσιτη για τις περισσότερες ηλεκτρονικές και φωτονικές συσκευές νανοκλίμακας. Στην [79] δείχνεται ότι τα πλασμόνια γραφενίου παρέχουν τα μέσα για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, μέσω της χαμηλής ταχύτητας φάσης τους και του υψηλού πεδίου περιορισμού.

Στην [80] δείχνεται ότι οι ταινίες γραφενίου υψηλής πρόσμιξης μπορούν να υποστηρίξουν επιφανειακά πλασμόνια σε συχνότητες κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία, όταν το πλάτος τους βρίσκεται στην περιοχή νανομέτρων, οδηγώντας σε σημαντικές μη τοπικές και πεπερασμένες διορθώσεις μεγέθους κβαντικού μεγέθους, όπως μεγάλες μετατοπίσεις προς το μπλε.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η απομάκρυνση μίας μόνο σειράς ατομικών δεσμών σε μια ταινία παράγει μια ισχυρή μετατόπιση συχνότητας πλασμονίου, ενώ η απομάκρυνση των δεσμών κατά μήκος μιας σειράς σειρών, που διαχωρίζονται από πολλά νανόμετρα σε ένα εκτεταμένο φύλλο, προκαλεί μια δραματική αύξηση στην απορρόφηση. Εκτός από το θεμελιώδες ενδιαφέρον αυτών των αποτελεσμάτων, η εργασία υποστηρίζει τη χρήση στενών ταινιών για την επίτευξη ηλεκτρο-οπτικής διαμόρφωσης στο εγγύς υπέρυθρο.



Σχήμα 3.15: Ταινίες γραφενίου υψηλής πρόσμιξης, που μπορούν να υποστηρίξουν επιφανειακά πλασμόνια σε συχνότητες κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία, όταν το πλάτος τους βρίσκεται στην περιοχή νανομέτρων α) Η συνύπαρξη μεταλλικών

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

επιφανειακών καταστάσεων που εμφανίζουν διάχυτη διασπορά Dirac (περιοχή με μπλε και διασπορά σχήματος X) και υποκείμενο κανονικό διαχωριστικό μονωτή (γκρίζα τετράγωνη και παραβολική διασπορά E-k) παρέχει μια νέα πλατφόρμα ενεργής διαμόρφωσης του επιφανειακού πλασμονίου (κόκκινο κύμα). Η κίτρινη σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει το τοπολογικώς ασήμαντο 2DEG, το οποίο επίσης συμβάλλει στη συλλογική ταλάντωση φόρτισης. (β) Διαγράμματα που περιγράφουν την οπτικά διαμορφωμένη παρεμβολή τύπου Fano μεταξύ της στενής κατάστασης φωτονίων και του σχετικά ευρέως τύπου πλασμονίου. Κατά την οπτική διέγερση η μετατόπιση του πλάσματος προκαλεί αλλαγή στις μεταβάσεις THz.

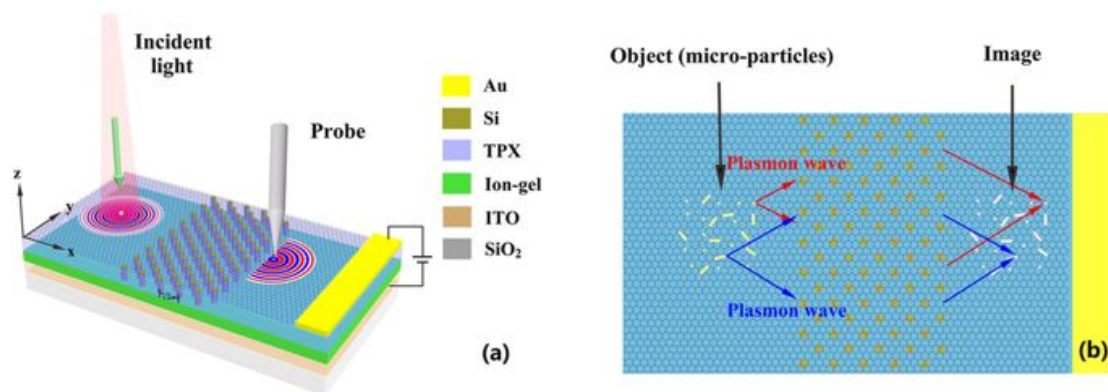
Στην εργασία [81] διερευνάται η εξαιρετικά γρήγορη οπτική διαμόρφωση των πλασμονίων σε μία διάταξη μικροταινίας του τοπολογικού απομονωτήρα (Topological Insulator) TI Bi₂Se₃ με τη χρήση φασματοσκοπίας οπτικής αντίδρασης THz-ανιχνευτή με χρονική ανάλυση. Κάτω από την έγχυση παλμού οπτικής διαμόρφωσης (βλέπε σχήμα 3.15β), η συχνότητα επιφανειακού πλασμονίου μετατοπίζεται πέρα από τη συχνότητα φωτονίων στην περιοχή THz, η οποία μεταβάλλει σημαντικά τα φάσματα εξαφάνισης. Ως αποτέλεσμα επιτυγχάνεται ένα πρωτοφανές, γιγαντιαίο βάθος διαμόρφωσης έως 2.400%, με πολύ χαμηλή ροή παλμού οπτικού ελέγχου (45 μJ cm⁻²). Οι θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι η μετατόπιση της συχνότητας πλασμονίου προκύπτει από τη φωτο-πρόσμιξη του μη τοπολογικού δισδιάστατου αερίου ηλεκτρονίων (2DEG), που σχηματίζεται λόγω της προς τα κάτω κάμψης των ογκωδών ζωνών κοντά στην επιφάνεια. Σε αντίθεση με τα συμβατικά πλασμονικά που βασίζονται σε ημιαγωγούς, διάφορα είδη κβαντικών καταστάσεων, όπως τα ηλεκτρόνια Dirac, ο μαζικός 2DEG και ο όγκος που μοιάζει με ημιαγωγό, τα οποία μαζί με την παρεμβολή πλασμονίων-φωτονίων οδηγούν σε δυναμική φασματική διαφοροποίηση σε TIs και παρέχουν μια νέα πλατφόρμα για τον έλεγχο πλασμονίων.

Εξετάζοντας το μέλλον, αυτό το ενεργό πλασμονικό σύστημα με βάση την TI μπορεί να ανοίξει μια νέα πορεία προς τους οπτικώς ελεγχόμενους πλασμονικούς διακόπτες εξαιρετικά υψηλής αντίθεσης. Κατά το σχεδιασμό των συσκευών είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτό το σύστημα είναι εξαιρετικά επιλεκτικό της συχνότητας. Επομένως, ανάλογα με τον τύπο των εφαρμογών, θα πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά η απόσταση μεταξύ μικροταινιών, η οποία καθορίζει τη βασική συχνότητα πλασμονίου.

Τα επιφανειακά πλασμόνια (SPs) είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται κατά μήκος της διασύνδεσης μετάλλου / διηλεκτρικού και μπορούν να καθοδηγούνται από μεταλλικές νανοδομές πέρα από το όριο περιθλάσεως. Κάθετα στη διασύνδεση, τα SPs μπορούν να περιορίζονται σε κλίμακα μικρότερη του μήκους κύματος. Αυτή η αξιοσημείωτη δυνατότητα έχει μοναδικές προοπτικές για το σχεδιασμό τεχνικών οπτικής απεικόνισης με ανάλυση σε νανοκλίμακα, φίλτρων,

αισθητήρων υψηλής ολοκλήρωσης, καθ'όλα οπτικής δίοδου, κλπ. Πρόσφατα, η αρνητική διάθλαση των SPs σε μεταλλικές νανοδομές έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή, επειδή είναι η βάση μιας ποικιλίας νέων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων και εφαρμογών, όπως η τεχνολογία υπερφακών, το αρνητικό φαινόμενο Doppler, καθώς και τα νέα φαινόμενα οδήγησης, εντοπισμού και μη γραμμικότητας. Οι πλασμονικοί υπερφακοί που βασίζονται στην αρνητική διάθλαση μπορούν να ενισχύσουν τα συστατικά της πηγής στο κοντινό πεδίο και να σχηματίσουν εικόνες υψηλής ανάλυσης πέραν του ορίου περίθλασης. Ωστόσο, οι προηγούμενοι πλασμονικοί υπερφακοί δεν λειτουργούν στην περιοχή terahertz (THz) και η επίδοσή τους στην εστίαση είναι γενικά δύσκολο να ρυθμιστεί.

Στην εργασία [82], δείχνεται ότι η αρνητική διάθλαση των πλασμονίων σε όλες τις γωνίες μπορεί να επιτευχθεί σε υβριδική δομή από γραφένιο / φωτονικό κρύσταλλο. Δείχνεται ότι η εστίαση πλασμονίου, βασισμένη στην αρνητική διάθλαση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη απεικόνισης πέραν του ορίου περίθλασης σε συχνότητες THz. Τα αποτελέσματά δείχνουν ότι η ανάλυση της εικόνας είναι σημαντικά μικρότερη από το μήκος κύματος του πλασμονίου γραφενίου. Επιπλέον, η απόδοση εστίασης της προτεινόμενης δομής μπορεί να διατηρηθεί για διαφορετικές συχνότητες, αλλάζοντας την ενέργεια Fermi του γραφενίου. (Σχήμα 3.16)



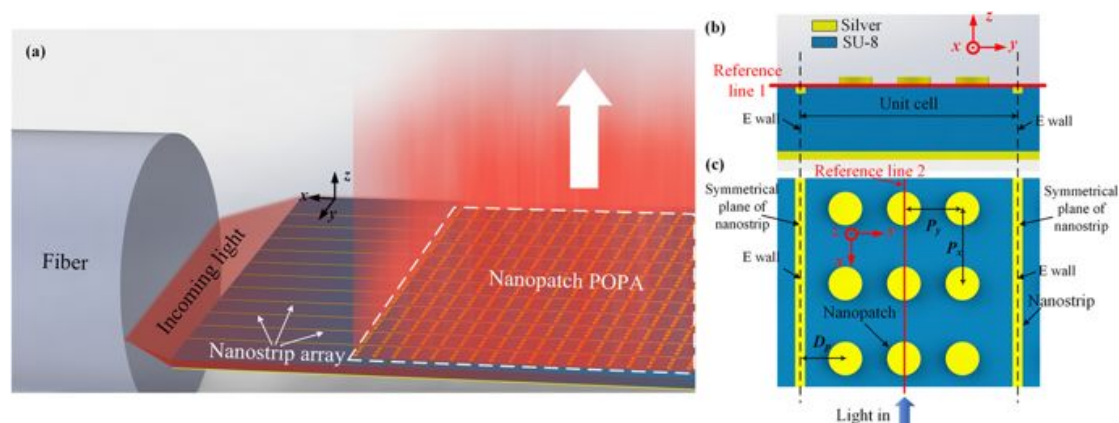
Σχήμα 3.16: Αρνητική διάθλαση των πλασμονίων σε όλες τις γωνίες, που επιτυγχάνεται σε υβριδική δομή από γραφένιο / φωτονικό κρύσταλλο. (α) Το πλασμόνιο γραφενίου διεγείρεται με φωτισμό του μεταλλικού μικροσωματιδίου και εστιάζεται από τη δομή γραφενίου / φωτονικού-κρυστάλλου. Ένας ανιχνευτής οπτικής μικροσκοπίας στο κοντινό πεδίο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των πληροφοριών πεδίου του εστιασμένου πλασμονίου. (β) Εικόνα του δείγματος (μεταλλικά μικροσωματίδια) μπορεί να ληφθεί με σάρωση της περιοχής απεικόνισης με τον ανιχνευτή.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν έναν αποτελεσματικό μηχανισμό για τον έλεγχο της διάδοσης του πλασμονίου γραφενίου και μπορούν να βρουν εφαρμογές σε υπέρ-συμπαγείς διαμορφωτές φωτός χωρικών κυμάτων.

Οι οπτικά συγχρονισμένες συστοιχίες (Optical phased arrays) (OPAs), στις οποίες χρησιμοποιείται η παρεμβολή των εκπομπών από μια σειρά νανοκεραιών, για να εστιάζουν και να κατευθύνουν το φως, έχουν αποδειχθεί ότι αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη προοπτική για εφαρμογές οπτικά ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (optical integrated chip) OIC, π.χ. οι 3-διαστάσεων (3D) οπτικές διασυνδέσεις, οι απεικονίσεις με χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, τα λέιζερ εκπομπής κάθετης επιφάνειας (vertical surface emitting lasers), οι επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας με χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και οι γεννήτριες δέσμης διανύσματος, για να αναφέρουμε μερικές μόνο.

Παρά τις ευοίωνες προβλέψεις των ερευνών για συστοιχίες με οπτικά συγχρονισμένες φάσεις, προς το παρόν, τα αναφερόμενα σχέδια σε συστοιχίες οπτικά συγχρονισμένων φάσεων βασίζονται στη φωτονική του πυριτίου, ενώ οι συστοιχίες οπτικά συγχρονισμένων φάσεων που βασίζονται στα πλασμόνια δεν έχουν ακόμη επιδειχθεί. Στην εργασία [83] προτείνεται μια παθητική πλασμονική συστοιχία οπτικά συγχρονισμένων φάσεων και παρουσιάζεται πειραματικά.

Η προτεινόμενη πλασμονική συστοιχία οπτικά συγχρονισμένων φάσεων (Plasmonic Optical Phased Array (POPA)) αποτελείται από χιλιάδες πλασμονικές κεραιές nanopatch και μια συστοιχία κυματοδηγών πλασμονικών νανολωρίδων, που ενεργεί ως το δίκτυο τροφοδοσίας που επιτρέπει την προσαρμογή φάσεων των στοιχείων nanopatch. Η γεωμετρία των προτεινόμενων POPA είναι πλήρως επίπεδη, με ένα υπομικρό προφίλ και το φως από μια ίνα μπορεί να συζευχθεί άμεσα στη συστοιχία κυματοδηγών πλασμονικών νανολωρίδων. Η δέσμη του προτεινόμενου POPA είναι κατευθυνόμενη και μπορεί να επιτευχθεί μια υψηλή κατευθυντικότητα στην περιοχή μακρινού πεδίου. (Σχ΄μα 3.17)

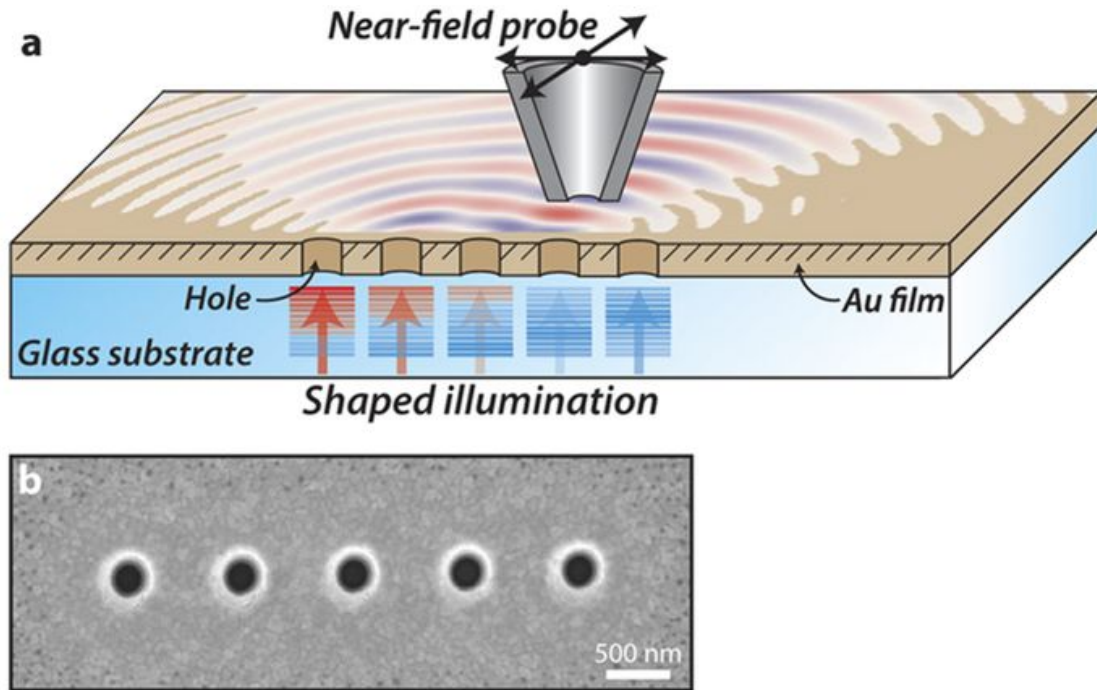


Σχήμα 3.17: Η προτεινόμενη πλασμονική συστοιχία οπτικά συγχρονισμένων φάσεων (Plasmonic Optical Phased Array (POPA)) α) Σχηματική παρουσίαση των μηχανισμών του προτεινόμενου POPA (όχι σε κλίμακα). Το φως από μια ίνα συνδέεται άμεσα με τα SPWs Nanostrip, τα οποία δρουν ως ηλεκτρονόμος ισχύος που μεσολαβεί στη μεταφορά ισχύος από την ίνα σε νανοκατασκευές. (b και c) Σχέδια που δείχνουν τη στρατηγική σχεδιασμού μονάδας μονάδας στο επίπεδο yz (b) και το επίπεδο xoy (c). P_x και P_y αντιπροσωπεύουν την περίοδο στις x και y κατευθύνσεις, αντίστοιχα, και D_p σε αυτό το σχήμα υποδηλώνει την απόσταση μεταξύ της νανολωρίδας και του γειτονικού nanopatch της.

Στην [84] βλέπουμε ότι για να επιτευχθεί η διέγερση SPPs πάνω στην μεταλλική επιφάνεια με ένα μικρό αποτύπωμα και με έλεγχο της κατευθυντικότητας, χρησιμοποιούνται σχάρες και συστοιχίες οπών δύο διαστάσεων. Έχει αποδειχθεί ότι ένας περιορισμένος αριθμός καλά τοποθετημένων οπών μπορεί να δώσει κατευθυντική εκπομπή SPP και ότι ακόμη και μία οπή δίνει ήδη ένα διπολικό πρότυπο ακτινοβολίας SPP. Οι στρατηγικές που βασίζονται σε πρότυπα οπών σε μεταλλικές μεμβράνες είναι ελπιδοφόρες, ωστόσο είναι στατικές στο σχεδιασμό, με αποτέλεσμα ένα σταθερό μοτίβο ακτινοβολίας.

Εδώ παρουσιάζεται μια μινιμαλιστική προσέγγιση, στην οποία ένας μικρός αριθμός οπών αντιμετωπίζονται μεμονωμένα και ελέγχονται σε φάση, επιτρέποντας την συντονισμένη κατευθυντική εκπομπή των SPPs σε ένα ανάλογο επιφανειακού πλασμονίου, μιας συστοιχίας κεραιών συγχρονισμένης φάσης. Η χρήση ενός μικροσκοπίου ευαίσθητου στη φάση στο κοντινό πεδίο επιτρέπει να πραγματοποιηθούν ακριβείς μετρήσεις της παρεμβολής SPP, η οποία μελετάται σε πραγματικό και αμοιβαίο χώρο. Με την προσέγγιση αυτή επιδεικνύεται μια σαφής πρόοδος για τον ενεργό έλεγχο της κατευθυνόμενης διέγερσης επιφανειακών πλασμονίων και καταδεικνύεται ότι απαιτείται ένας ελάχιστος αριθμός πηγών SPP, για να επιτευχθεί δυναμικός κατευθυντικός έλεγχος. (Σχήμα 3.18)

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες εργασίες στις μεγάλες συστοιχίες οπών, η συσκευή που χρησιμοποιείται είναι εξαιρετικά μικρή σε αποτύπωμα και διαθέτει χαμηλό αριθμό ανεξάρτητων διαύλων διαθέσιμων για έλεγχο, αλλά επιτρέπει δέσμες SPP που μπορούν να βελτιστοποιηθούν για να διαδοθούν σε οποιαδήποτε αυθαίρετη κατεύθυνση.



Σχήμα 3.18: Συσκευή στην οποία ένας μικρός αριθμός οπών αντιμετωπίζονται μεμονωμένα και ελέγχονται σε φάση, επιτρέποντας την συντονισμένη κατευθυντική εκπομπή των SPPs σε ένα ανάλογο μιας συστοιχίας κεραιών συγχρονισμένης φάσης, που δημιουργήθηκε με χρήση επιφανειακών πλασμονίων. α) Σχηματική απεικόνιση του υπό μελέτη συστήματος που περιέχει χρυσό φιλμ με 5 οπές που φωτίζονται από τον πυθμένα. Η κατάσταση πλάτους, φάσης και πολώσεως κάθε οπής ελέγχεται ανεξάρτητα. Το οπτικό σήμα στην άνω επιφάνεια μετράται χρησιμοποιώντας οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης κοντινού πεδίου. (b) Δείχνει μια μικρογραφία SEM 5 οπών σε μία μεμβράνη Au πάχους 250 nm.

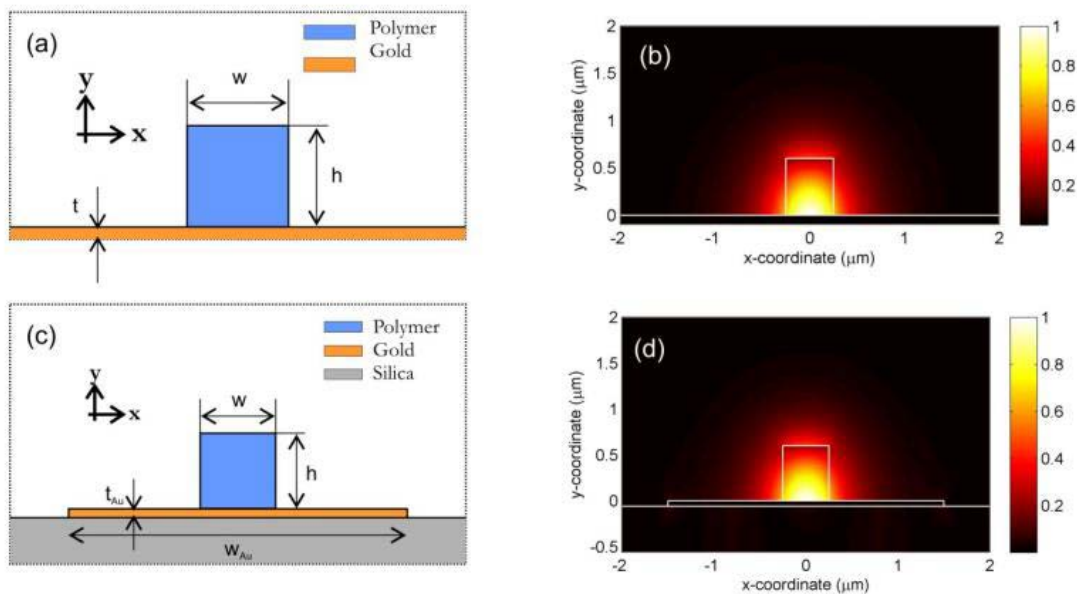
3.1.5.1

Ο κυματοδηγός DLSPP

Οι κυματοδηγοί DLSPP (Dielectric-Loaded Surface Plasmon Polariton Waveguide)[56], όπως δηλώνει και το όνομά τους, αποτελούνται από μία λωρίδα διηλεκτρικού υλικού τοποθετημένη πάνω σε ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο. Ο περιορισμός των συνιστωσών των SPP (ή των ρυθμών, όπως είναι γνωστές στην ορολογία των οπτικών ινών) γίνεται με δύο μεθόδους: στην κατεύθυνση κάθετα ως προς το μέταλλο ο περιορισμός επιτυγχάνεται χάρη στην εκθετική εξασθένηση του SPP, όπως προαναφέραμε, ενώ στην παράλληλη κατεύθυνση, χάρη στον δείκτη διάθλασης του διηλεκτρικού. Το φύλλο μετάλλου δεν χρησιμεύει απλά για τον περιορισμό των ρυθμών, αλλά και για την προστασία τους από το υπόστρωμα πάνω στο οποίο τοποθετούμε το φύλλο. Έτσι, κάθε υλικό με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από αυτόν του υπερστρώματος (και όχι αναγκαστικά μεγαλύτερο του υποστρώματος) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φτιάξουμε έναν DLSPPW.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα πολυμερή, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Κατ' αρχήν, ο τυπικός δείκτης διάθλασης των πολυμερών είναι αρκετά μεγάλος για να εξασφαλίζει ικανοποιητικά μικρές διαστάσεις κυματοδηγού, ακόμα και στις τηλεπικοινωνιακές συχνότητες. Αυτό επιτρέπει στους DLSPW να διασυνδέονται με ευκολία σε επικρατείς αρχιτεκτονικές κυκλωμάτων χαμηλών απωλειών, όπως κυματοδηγούς Silicon-On-Insulator (SOI). Επίσης, οι οπτικές ιδιότητες κάποιων πολυμερών χρησιμεύουν για την επίτευξη θερμο-οπτικού ελέγχου των διατάξεων DLSPW

Η εργασία [32] παρουσιάζει στοιχεία διακοπών που έχουν κατασκευαστεί από κυματοδηγούς DLSPW τοποθετημένους πάνω σε ένα λεπτό φύλλο χρυσού, ενώ το πολυμερές που επιλέχθηκε ήταν το *poly-methyl-methacrylate* ή *PMMA* (Σχήμα 3.19 και πίνακας 3.1). Το PMMA είναι ένα διαφανές θερμοπλαστικό υλικό που χρησιμοποιείται συχνά ως εναλλακτική ανθεκτική λύση του γυαλιού. Το υλικό αυτό αναπτύχθηκε το 1928 σε διάφορα εργαστήρια και παρουσιάστηκε στην αγορά το 1933 από την Rohm & Haas Company. Το PMMA είναι μαλακότερο από το γυαλί και παρουσιάζει πυκνότητα περίπου $\rho = 1.190 \text{ kg} / \text{m}^3$. Ο χρυσός επιλέχθηκε λόγω των πολύ καλών θερμο-οπτικών του ιδιοτήτων, που μας δίνει δυνητικά την δυνατότητα να κάνουμε τα στοιχεία *ρυθμιζόμενα* (tunable) μέσω αυξομείωσης της θερμοκρασίας.

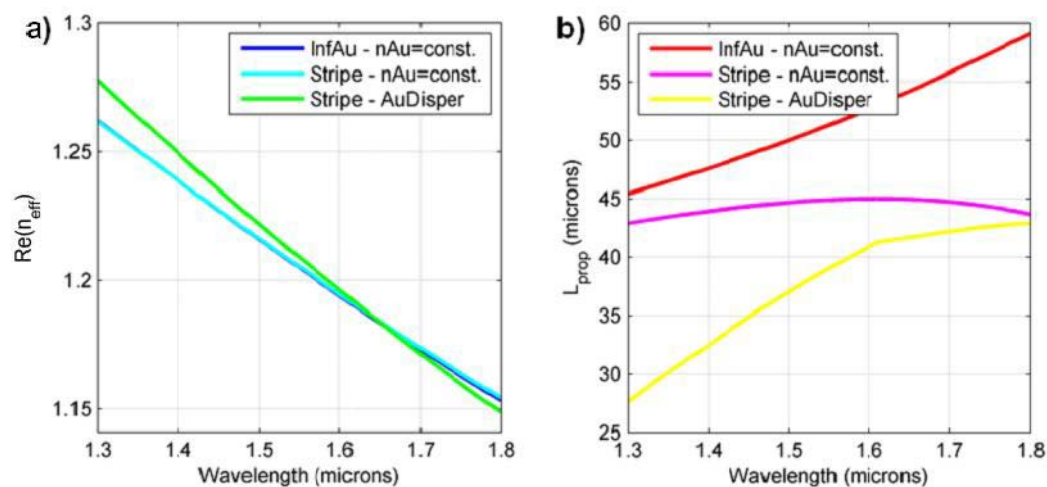


Σχήμα 3.19: Διατομή κυματοδηγού DLSPW πάνω σε φύλλο χρυσού και προφίλ ρυθμών στα 1550 nm

Parameter	Value	Comments
Polymer Width (w)	500nm	<i>Ensures optimum effective mode width</i>
Polymer Height (h)	600nm	
Polymer Material	PMMA	
Polymer Index (n_p)	1.493	<i>At room temperature</i>
Thermo-optic coefficient (TOC)	-1.05×10^{-4}	
Gold Film Width (w_{Au})	3 μ m	<i>Or infinite (un-patterned)</i>
Gold Film Height (t)	60nm	<i>Gold (Au)</i>
Gold Refractive Index (n_{Au})	0.55-j11.5	<i>At 1550nm [Ref: Palik]</i>
Substrate refractive index	1.45	<i>SiO₂</i>

Πίνακας 3.1: Υλικές προδιαγραφές και διαστάσεις των κυματοδηγών DLSP

Παρακάτω παρατηρούμε το πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης και το μήκος διάδοσης συναρτήσει του μήκους κύματος (Σχήμα 3.20). Οι περιπτώσεις που αναφέρονται ξεχωρίζουν ως προς το αν το υπόστρωμα χρυσού θεωρείται πεπερασμένου ή απείρου πλάτους και ποιός είναι ο ενεργός δείκτης διάθλασης του χρυσού σε κάθε περίπτωση



Σχήμα 3.20: Δείκτης διάθλασης και απώλειες διάδοσης ως προς το μήκος κύματος

Από το δεύτερο γράφημα διαπιστώνουμε ξεκάθαρα πόσο μεγάλες είναι οι απώλειες διάδοσης που αντιμετωπίζουν τα surface plasmons, όταν η απόσταση διάδοσης δεν ξεπερνά τα 100 μ m σε τηλεπικοινωνιακές συχνότητες

Συγκεντρωτικά αξίζει να αναφέρουμε ότι στον τομέα της φωτονικής παρατηρείται πληθώρα εφαρμογών και συγκεκριμένα στα οπτικά δίκτυα υπολογιστών, στην ολοκληρωμένη οπτική, στα ολοκληρωμένα οπτικά νανοκυκλώματα, τα οποία μπορούν να εκτελούν λειτουργίες όπως η επεξεργασία, η δρομολόγηση ή η

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

διαμόρφωση υψηλής ταχύτητας, στην επίτευξη ηλεκτρο-οπτικής διαμόρφωσης στο εγγύς υπέρυθρο, σε οπτικώς ελεγχόμενους πλασμονικούς διακόπτες εξαιρετικά υψηλής αντίθεσης, στον σχεδιασμό τεχνικών οπτικής απεικόνισης με ανάλυση σε νανοκλίμακα, σε φίλτρα, σε αισθητήρες υψηλής ολοκλήρωσης καθ'όλα οπτικής δίοδου. Επιπλέον εφαρμόζεται σε μια ποικιλία νέων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων και εφαρμογών, όπως η τεχνολογία υπερφακών, το αρνητικό φαινόμενο Doppler, καθώς και σε νέα φαινόμενα οδήγησης, εντοπισμού και μη γραμμικότητας, σε εφαρμογές οπτικά ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (optical integrated chip) OIC, π.χ. 3-διαστάσεων (3D) σε οπτικές διασυνδέσεις, απεικονίσεις με χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, τα λέιζερ εκπομπής κάθετης επιφάνειας (vertical surface emitting lasers), σε επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας με χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και σε γεννήτριες δέσμης διανύσματος.

3.1.6

Εγγύς υπέρυθρο (Near-Infrared)

Αφιερώνουμε μια μικρή ενότητα για να τονίσουμε μια από τις πολύ βασικές έννοιες που μας ενδιαφέρουν στην έρευνα για τα πλασμόνια και αυτή είναι η επέκταση των φωτονικών εφαρμογών, αλλά και των τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών γενικότερα στις υπέρυθρες και στις THz συχνότητες.

Πολύ πρόσφατα το μαύρο φωσφορένιο (BP), ένας πολυεπίπεδος ημιαγωγός με μια δισδιάστατη "αυλακωτή" εξαγωνική δομή σε κάθε μονοστιβάδα (γνωστή ως φωσφορένιο), έχει κερδίσει την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας ως δυνητικός υποψήφιος για μελέτη των επιφανειακών πλασμονικών πολαριτονίων. Τα θεωρητικά και τα προσομοιωτικά αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι οι ιδιότητες των μαύρων επιφανειακών πλασμονίων φωσφορενίου περιλαμβάνουν την εξάρτηση της πόλωσης όταν εκτίθεται σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, την εξάρτηση από το μέγεθος της μονοστιβάδας, ένα κβαντισμένο μαγνητικό πεδίο που υποδεικνύεται από τα διακριτοποιημένα ανισότροπα μαγνητοαντικείμενα, τις ατέλειες του σημείου απόσβεσης και την πιθανότητα για διαταραχή μεγάλης εμβέλειας. Αυτά τα χαρακτηριστικά αποδίδονται στην υψηλή κινητικότητα του και στην εξαιρετικά συντονισμένη, εξαρτώμενη από το στρώμα, άμεση ζώνη (0,3 eV χύμα έως 2 eV σε μία μονοστιβάδα), καθώς και στις εξαιρετικά ανισότροπες ηλεκτρονικές και οπτικές ιδιότητες του σε επίπεδο. Επιπρόσθετα, αυτές οι επιθυμητές ιδιότητες καθιστούν το BP κατάλληλο για άλλες εφαρμογές οπτικού υλικού, όπως η υπερφασματική απεικόνιση, η θερμική απεικόνιση, οι φωτοανιχνευτές στη φωτονική του πυριτίου και τα τρανζίστορ terahertz. Μέχρι

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

σήμερα αυτές οι οπτο-ηλεκτρονικές ιδιότητες του έχουν περιοριστεί σε λιγότερες εφαρμογές, λόγω της αστάθειας του BP σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Στην [85] διερευνάται το BP ως εναλλακτικό δισδιάστατο υλικό για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τα μέταλλα και το γραφένιο, αναφορικά με αποκρίσεις συντονισμού επιφανειακών πλασμονίων στο προσπίπτον φως, στη φασματική περιοχή μέσης έως υψηλής υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Συνοπτικά, ερευνήθηκαν οι ιδιότητες των διαδιδόμενων επιφανειακών πλασμονίων του μαύρου φωσφορούχου φύλλου και του ακραίου περιορισμού σε περιβάλλουσες διηλεκτρικές δομές, για ενισχυμένη συντονισμένη απορρόφηση.

Τα ερευνητικά επιτεύγματα αποκαλύπτουν ένα ελπιδοφόρο μέλλον για το μαύρο φωσφορένιο ως πλασμονικό υλικό, με ιδιότητες που μπορούν να δώσουν μια βιώσιμη πλατφόρμα σε οπτοηλεκτρονικές συσκευές που διαμορφώνονται με πλασμόνια, σε όλη την υπέρυθρη περιοχή του φάσματος.

Όπως βλέπουμε στην εργασία [86] οι οπτικές δυνάμεις παίζουν σημαντικό ρόλο στις αλληλεπιδράσεις ύλης-φωτός στη μεσοκλίμακα. Σε ορατές και σχεδόν υπέρυθρες περιοχές, μελετήθηκαν ισχυρές δυνάμεις κοντά στο πεδίο με τη βοήθεια φωτός σε διάφορες μεταλλικές πλασμονικές δομές. Η ικανότητα των μεταλλικών νανοδομών να ελέγχουν το φως στην κλίμακα πέραν του ορίου περίθλασης έχει αξιοποιηθεί για να σχεδιάσουν πλασμονικά νανοοπτικά tweezers, που μπορούν να πραγματοποιήσουν οπτική παγίδευση μέχρι την κλίμακα νανομέτρων. Πολύ πρόσφατα, έχουν διερευνηθεί οι οπτικές μεταβαλλόμενες δυνάμεις που ενισχύονται από τα πλασμόνια του γραφενίου. Μελετώνται οι δυνάμεις οπτικού διαφορικού στις πλασμονικές δομές του γραφενίου και τις αξιοποιούμε για τη νανοοπτική παγίδευση στη μέση υπέρυθρη ακτινοβολία. Δείχνεται αριθμητικά ότι μπορούν να δημιουργηθούν ισχυρές οπτικές δυνάμεις στο κοντινό πεδίο, κάτω από τον φωτισμό του μέσου υπέρυθρου φωτός, όταν τα διηλεκτρικά νανοσωματίδια βρίσκονται κοντά σε μια νανοδομημένη μεμβράνη γραφενίου. Αυτή η δύναμη κοντινού πεδίου συνδέεται με τη διέγερση του πλασμονικού ρυθμού του γραφενίου. Οι οπτικές δυνάμεις μπορούν να παράγουν ένα αποτελεσματικό δυναμικό οπτικής παγίδευσης, για ένα διηλεκτρικό σωματίδιο διαμέτρου 10 nm.

Η μονόχρωμη φασματοσκοπία απώλειας ενέργειας ηλεκτρονίων (EELS) [87] είναι μία από τις κορυφαίες τεχνικές μελέτης των ιδιοτήτων των υλικών που αντιστοιχούν σε χαμηλές (<5 eV) απώλειες ενέργειας (δηλ. χάσματα-ζώνης, πλασμόνια και εξιτόνια), με χωρική ανάλυση νανοκλίμακας. Πρόσφατα έχει δημιουργηθεί μια νέα γενιά μονοχρωμάτων, επιτρέποντας τη μελέτη νέων περιοχών και το ξεκλείδωμα διεγέρσεων που προηγουμένως δεν ήταν δυνατό να παρατηρηθούν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Οι δυνατότητες αυτών των νέων εργαλείων διερευνώνται και εδώ μελετάται η επίδραση της μονοχρωμίας σε διάφορες πτυχές της ανάλυσης EELS στην υπέρυθρη (<1 eV) περιοχή. Εξετάζουμε την επίδραση διαφορετικών

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

επιπέδων μονοχρωμίας στην ενεργειακή ανάλυση, τη μείωση της ουράς με μηδενικές απώλειες (ZLP), τη μορφή της ουράς ZLP, την αναλογία σήματος προς θόρυβο και τη χωρική ανάλυση. Από αυτά τα πειράματα οι νέες δυνατότητες της μονόχρωμης EELS αποδεικνύονται εξαιρετικά ελπιδοφόρες για το μέλλον της εντοπισμένης φασματοσκοπικής ανάλυσης.

Έχει δειχθεί ότι οι μεταλλικές συστοιχίες σχισμών που λειτουργούν πέρα του ορίου περίθλασης, παρουσιάζουν εξαιρετική οπτική μετάδοση, όπου τα επιφανειακά πλασμαονικά κύματα σήραγγας παρεμβάλλουν εποικοδομητικά στην ισχυρή διάδοση του φωτός. Η περίπλοκη εξισορρόπηση που απαιτείται για να συμβεί αυτή η παρεμβολή επιτρέπει στη συντονισμένη εκπομπή να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις αλλαγές στο περιβάλλον. Στην [88] αποδεικνύεται ότι ο εξαιρετικός συντονισμός της οπτικής μετάδοσης μπορεί να συζευχθεί με ηλεκτροστατικά ρυθμιζόμενες πλασμαονικές ταινίες από γραφένιο, για να δημιουργηθεί ηλεκτροστατική διαμόρφωση του μέσου υπέρυθρου φωτός.

Τα τελευταία 5 χρόνια έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για τη δημιουργία οπτικών διαμορφωτών βασισμένων σε πλασμόνια γραφενίου, που λειτουργούν από τις THz έως τις μέσες υπέρυθρες συχνότητες

Τυπικά, αυτές οι συσκευές βασίστηκαν σε γεωμετρίες οι οποίες χρησιμοποιούν συντονισμένη απορρόφηση σε νανοδομές γραφενίου, που έχουν σχεδιαστεί για να περιορίσουν τους πλασμαονικούς ρυθμούς οι οποίοι μπορούν να συντονιστούν ηλεκτροστατικά για τον έλεγχο της έντασης και της συχνότητας, είτε της οπτικής απορρόφησης είτε της εκπομπής. Ωστόσο, το μονοστρωματικό ατομικό πάχος και η χαμηλή ελεύθερη πυκνότητα φερουσών του γραφενίου έχουν περιορίσει την αποτελεσματικότητα τέτοιων διαμορφωτών, ειδικά στις μέσες υπέρυθρες συχνότητες, όπου η ισχύς των ταλαντωτών των πλασμαονικών ρυθμών του γραφενίου είναι χαμηλή. Έχουν υιοθετηθεί κάποιες στρατηγικές για να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ιοντικού ζελέ ή χημικού ντοπαρίσματος, για την αύξηση της πυκνότητας φορέα του φύλλου γραφενίου ή για τον προσεκτικό έλεγχο του υποστρώματος, ώστε να περιλαμβάνει ένα μεταλλικό ανακλαστήρα πίσω και οπτικούς συντονισμούς που ενισχύουν τις εντάσεις του πεδίου στις πλασμαονικές κορδέλες (GPRs) του γραφενίου (GPRs), ενισχύοντας έτσι την απορρόφηση. Ενώ αυτές οι τεχνικές μπορούν να έχουν θεωρητική απόδοση διαμόρφωσης 100%, η χρήση ιοντικών ζελέ θέτει σημαντικούς περιορισμούς στην εφαρμοσιμότητα, τις ταχύτητες μεταγωγής και την ανθεκτικότητα τέτοιων συσκευών και η χρήση μεταλλικών ανακλαστήρων ωθεί αυτές τις συσκευές να χρησιμοποιηθούν σε γεωμετρίες ανάκλασης. Σε αντίθεση με τους διαμορφωτές πλασμαονικής διαμόρφωσης γραφενίου ανακλαστικού τύπου, δεν έχει ακόμη αναφερθεί, εξ όσων γνωρίζουμε, μια στρατηγική χρήσης ηλεκτροστατικά ρυθμιζόμενων πλασμαονίων γραφενίου, για τη ρύθμιση του μεταδιδόμενου φωτός με απόδοση κοντά στην μονάδα (with near-unity efficiency). Η δημιουργία μιας τέτοιας συσκευής θα έχει εκτεταμένες εφαρμογές σε οπτοηλεκτρονικές συσκευές,

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

όπως σε διαμορφωτές φωτός μεσαίας υπέρυθρης ακτινοβολίας ή στην γραμμική επεξεργασία σήματος.

Στο άρθρο [88] αναφέρεται μια προσέγγιση για τη χρήση πλασμονικών ρυθμών γραφενίου για ελαφριά διαμόρφωση, σε μια γεωμετρία μετάδοσης που ικανοποιεί τις παραπάνω συνθήκες - υψηλή αποδοτικότητα διαμόρφωσης και προσβασιμότητα σε πυκνότητες φέρουσας με ηλεκτροστατική πύλη. Ο σχεδιασμός του διαμορφωτή βασίζεται σε μια τριπλή συντονιστική δομή, όπου οι πλασμονικοί συντονισμοί στο GPR ταιριάζουν με ένα συντονισμό Fabry-Perot με διηλεκτρικό υπόστρωμα και επίσης με τους οπτικούς συντονισμούς σε μια σειρά μεταλλικών σχισμών πέρα του ορίου περίθλασης, η οποία έχει σχεδιαστεί για να παρουσιάζει εξαιρετική οπτική μετάδοση στη μέση υπέρυθρη ακτινοβολία.

Σε αυτές λοιπόν τις συχνότητες εντοπίζονται πολλές εφαρμογές οπτικού υλικού όπως η υπερφασματική απεικόνιση, η θερμική απεικόνιση, οι φωτοανιχνευτές στη φωτονική του πυριτίου και τα τρανζίστορ terahertz, πλατφόρμες σε οπτοηλεκτρονικές συσκευές που διαμορφώνονται με πλασμόνια σε όλη την υπέρυθρη περιοχή του φάσματος και πλασμονικά νανοοπτικά tweezers, εντοπισμένης φασματοσκοπικής ανάλυσης. Επιπρόσθετα γίνεται προσπάθεια για δημιουργία οπτικών διαμορφωτών βασισμένων σε πλασμόνια γραφενίου που λειτουργούν από τις THz έως τις μέσες υπέρυθρες συχνότητες, εφαρμογές σε οπτοηλεκτρονικές συσκευές, όπως διαμορφωτές φωτός μεσαίας υπέρυθρης ακτινοβολίας και γραμμική επεξεργασία σήματος.

3.1.7 Συμπεράσματα για τα πλασμόνια.

Η διέγερση των επιφανειακών πλασμονίων έφερε μεγάλο ενθουσιασμό στην επιστημονική κοινότητα, καθώς οδηγεί στη δημιουργία διαδιδόμενων ρυθμών με μήκη κύματος μικρότερα του ορίου περίθλασης, ανοίγοντας το δρόμο για τη δημιουργία υποκυματικής απεικόνισης. Ταυτόχρονα οι ρυθμοί αυτοί που διεγείρονται έφεραν στην επιφάνεια πολλές νέες ιδιότητες, που καλούμαστε να εντάξουμε στη φωτονική και τις τηλεπικοινωνίες γενικότερα. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του μεγέθους των δομών στις οποίες παράγονται τα επιφανειακά πλασμόνια. Όπως πολλάκις έχει αναφερθεί, τα πλασμόνια καταφέρνουν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρονικής (μικρό μέγεθος, μεγάλος βαθμός ολοκλήρωσης) και της φωτονικής (μεγάλες ταχύτητες, χαμηλές απώλειες).

Για να καταφέρουμε να φτάσουμε όμως σε αυτό το σημείο απαιτούνται πολλά βήματα. Η έρευνα καταδεικνύει την ύπαρξη πολλών εμποδίων και περιορισμών, που σταδιακά καλούμαστε να ξεπεράσουμε. Αυτή τη στιγμή η παραγωγή, ο έλεγχος της διάδοσης και ο περιορισμός των απωλειών των ρυθμών επιφανειακών πλασμονίων αποτελεί ακόμα ένα από τα θεμελιώδη ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ανάπτυξη της πλασμονικής. Καθώς αυτά προχωράνε, εντείνονται και οι προσπάθειες υλοποίησης, αρχικά πλασμονικών κυματοδηγών και της διασύνδεσής τους σε ολοκληρωμένα φωτονικά

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

κυκλώματα, και στη συνέχεια περαιτέρω φωτονικών συσκευών, που απαιτούν επιπλέον έλεγχο, όπως μεταγωγείς, πολυπλέκτες, συζεύκτες, διαμορφωτές, κλπ.

Μεγάλη δυσκολία παρουσιάζεται ιδιαίτερα στο θέμα της διασύνδεσης των πλασμονικών στοιχείων που λειτουργούν σε υψηλές THz συχνότητες με μεγάλη ταχύτητα και σε μικρό χώρο με άλλα συμβατικά κυκλωματικά στοιχεία που λειτουργούν καλύτερα στις μικροκυματικές συχνότητες.

Είναι μεγάλο το ενδιαφέρον που προκύπτει από τις εφαρμογές των πλασμονίων αναφορικά με την απεικόνιση και τις τεχνολογίες αισθητήρων. Γενικότερα, οι τεχνολογίες αισθητήρων συχνά είναι αρκετά απλοϊκές στη σύλληψή τους και στην υλοποίησή τους και ως εκ τούτου, προκύπτουν αρκετά γρήγορα διάφορες εφαρμογές, όπως είδαμε ιδίως στον τομέα της ιατρικής και της βιοϊατρικής ανίχνευσης, καθώς οι μεταβολές των πεδίων εύκολα συσχετίζονται με την αλλαγή της σύστασης ενός υλικού, λόγω της παρουσίας κάποιας ουσίας ή ακόμα και ενός απλού μορίου.

Γενικότερα στον τομέα της απεικόνισης, χάρη στην ιδιότητά τους να έχουν ανάλυση πέραν του ορίου περίθλασης, τα πλασμόνια προσφέρουν νέες δυνατότητες, ιδίως στην εξερεύνηση του κόσμου σε επίπεδο νανοκλίμακας.

Η έρευνα πάνω στα πλασμόνια παραμένει σε μεγάλο βαθμό ακόμα πειραματική, καθώς οι πρακτικές εφαρμογές που έχουν προκύψει και εξαχθεί προς την παραγωγή, είναι μάλλον περιορισμένες. Οι ερευνητές επικεντρώνονται ακόμα στη μελέτη των διαφόρων δομών και διατάξεων, προσπαθώντας να εξαγάγουν χρήσιμα συμπεράσματα, να βελτιώσουν διάφορες παραμέτρους, να εξετάσουν τα υλικά τα οποία αλληλεπιδρούν καλύτερα με τα πλασμόνια και να προάγουν τη λειτουργία τους και τη χρησιμότητά τους. Ταυτόχρονα φαίνεται πως ακόμα υπάρχει ένα κενό στη θεωρητική προσέγγιση και μοντελοποίηση του νανόκοσμου και του κβαντικού κόσμου, γεγονός που οδηγεί πολλούς ερευνητές σε πιο θεωρητικές μελέτες, με σκοπό την δημιουργία κατάλληλων εργαλείων, μοντέλων, προσομοιώσεων για τη μελέτη των φαινομένων που παρατηρούνται σε αυτό το επίπεδο. Είναι πιο πιθανό σταδιακά να δούμε να εμφανίζονται συσκευές που να κάνουν μερική χρήση των πλασμονίων, παρά για τη δημιουργία μιας ευρείας γκάμας ολοκληρώσιμων και συμπαγών καθαρά πλασμονικών συσκευών και κυκλωμάτων, μια εξέλιξη για την οποία επιφυλασσόμαστε για το μέλλον.

Σε κάθε περίπτωση η έρευνα πάνω στα πλασμόνια συνεχίζεται με εντατικούς ρυθμούς και σίγουρα στο μέλλον θα προκύψουν ποικίλες καινοτόμες ιδέες, εργασίες και εφαρμογές.

Βιβλιογραφία

- [1] Veselago, V.G. "The electrodynamics of the substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Sov phys uspekhi*, 1968, 10 (4), pp. 509–514
- [2] Pendry, J.B. (1994) Photonic Band Structures, *Journal of Modern Optics*, **41**:2, 209-229, DOI: [10.1080/09500349414550281](https://doi.org/10.1080/09500349414550281)
- [3] Pendry, J.B. Calculating photonic band structure *Journal of Physics: Condensed Matter*, Volume **8**, Number 9, (1996)
- [4] Κωστώρας, Ε., Δ.: ΜΕΤΑΪΛΙΚΑ-Κατηγορίες, Κατασκευή, Ιδιότητες και Εφαρμογές. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2010
- [5] Pendry, J. B. "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", *Physical Review Letters*, **85**, 18 (2000) pp. 3966-3969
- [6] Freire, M.J. and Marques, R. A planar magnetoinductive lens for 3D subwavelength imaging. *Applied Physics Letters* **86** 18, 2005 DOI: 10.1063/1.1922074
- [7] Linden *et al.* Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz, *Science* **306** (2004), p. 1351
- [8] Silveirinha, M., Belov, P., Simovski, C.: Sub-wavelength imaging at infrared frequencies using an array of metallic nanorods. *Phys. Rev. B* **75**, 035108 (2007)
- [9] Fang, N., Lee, H., Sun, C., Zhang, X.: Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens. *Science* **308**, 534–537 (2005)
- [10] Ziolkowski, R.W., Erentok, A.: Metamaterial-based efficient electrically small antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **AP-54**(7), 2113–2130 (2006)
- [11] Bilotti, E., Alu, A., Vegni, L.: Design of miniaturized patch antennas with μ -negative loading. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **AP-56**(6), 1640–1647 (2008)
- [12] Alu, A., Bilotti, E., Engheta, N., Vegni, L.: Sub-wavelength, compact, resonant patch antennas loaded with metamaterials. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **AP-55**(1), 13–25 (2007)

- [13]Alu, A., Bilotti, E., Engheta, N., Vegni, L.: A conformal omni-directional sub-wavelength metamaterial leaky-wave antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **AP-55**(6), 1698–1708 (2007)
- [14]Alu, A., Engheta, N.: Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings. *Phys. Rev. E* **72**, 016623 (2005)
- [15]Milton, G.W., Nicorovici, N.P.: On the cloaking effects associated with anomalous localized resonance. *Proc. R. Soc. A* **462**, 3027–3059 (2006)
- [16]Leonhardt, U.: Optical conformal mapping. *Science* **312**, 1777–1780 (2006)
- [17]Pendry, J.B., Schurig, D., Smith, D.R.: Controlling electromagnetic fields. *Science* **312**, 1780–1782 (2006)
- [18]Greenleaf, A., Lassas, M., Uhlmann, G.: On non-uniqueness for Calderón's inverse problem. *Math. Res. Lett.* **10**, 685–693 (2003)
- [19]Greenleaf, A., Lassas, M., Uhlmann, G.: Anisotropic conductivities that cannot be detected by EIT. *Physiol. Meas.* **24**, 413–419 (2003)
- [20]Cummer, S.A., Popa, B.-I., Schurig, D., Smith, D.R., Pendry, J.: Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures. *Phys. Rev. E* **74**, 036621 (2006)
- [21]Schurig, D., Mock, J.J., Justice, B.J., Cummer, S.A., Pendry, J.B., Starr, A.F.S., Smith, D.R.: Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science* **314**, 977–980 (2006)
- [22]Liang, Z., Yao, P., Sun, X., Jiang, X.: The physical picture and the essential elements of the dynamical process for dispersive cloaking structures. *Appl. Phys. Lett.* **92**, 131118 (2008)
- [23]Lee, H.-J., Yook, J.-G.: Biosensing using split-ring resonators at microwave regime. *Appl. Phys. Lett.* **92**, 254103 (2008)
- [24]O'Hara, J.F., Singh, R., Brener, I., Smirnova, E., Han, J., Taylor, A.J., Zhang, W.: Thin-film sensing with planar terahertz metamaterials: sensitivity and limitations. *Opt. Express* **16**, 1786–1795 (2008)
- [25]Li J., Huang Y. (2013) Introduction to Metamaterials. In: Time-Domain Finite Element Methods for Maxwell's Equations in Metamaterials. Springer Series in Computational Mathematics, vol 43. Springer, Berlin, Heidelberg, DOI https://doi.org/10.1007/978-3-642-33789-5_1

[26] Joannopoulos, J. D. and John D. Photonic crystals molding the flow of light. ISBN 0691037442, Princeton University Press, 1995, pp.4-5

[27] Eleftheriades, G.V. Balmain, K.G. Negative-refraction metamaterials : fundamental principles and applications, Hoboken, NJ. : J. Wiley, 2005, pp 7, 271-312

[28] Kazuaki Sakoda, Optical Properties of Photonic Crystals. ISBN 354041992, Berlin, Springer 2001, pp. 2-4

[29] Lourtioz J.-M. et al. Photonic crystals : towards nanoscale photonic devices. ISBN 9783540244318, Berlin, Springer, 2005, pp. IX-XI

[30] Kimble, H.J. The quantum internet. *Nature* volume **453**, pages 1023–1030 ,2008

[31] Witmer, J. D. *et al.* High-Q photonic resonators and electro-optic coupling using silicon-on-lithium-niobate. *Sci. Rep.* **7**, 46313; doi: 10.1038/srep46313 (2017).

[32] Schröder, T. *et al.* Scalable focused ion beam creation of nearly lifetime-limited single quantum emitters in diamond nanostructures. *Nat. Commun.* **8**, 15376 doi: 10.1038/ncomms15376 (2017).

[33] Calic, M. *et al.* Deterministic radiative coupling of two semiconductor quantum dots to the optical mode of a photonic crystal nanocavity. *Sci. Rep.* **7**, 4100; doi: 10.1038/srep4100 (2017).

[34] Pina-Hernandez, C. *et al.* Nanoimprinted High-Refractive Index Active Photonic Nanostructures Based on Quantum Dots for Visible Light. *Sci. Rep.* **7**, 17645; doi: 10.1038/srep17645 (2017).

[35] Konopsky, V.N. *et al.* Phase-matched third-harmonic generation via doubly resonant optical surface modes in 1D photonic crystals. *Light: Science & Applications* **5**, 16168; doi: 10.1038/lisa16168 (2016).

[36] Gan, X.-T. *et al.* Microwatts continuous-wave pumped second harmonic generation in few- and mono-layer GaSe. *Light: Science & Applications* **7**, 17126; doi: 10.1038/lisa17126 (2018).

[37] Lu, R. *et al.* Analytical investigation of nonreciprocal response in 1D nonlinear photonic crystals. *Sci. Rep.* **7**, 6579; doi: 10.1038/srep6579 (2017).

[38] Yuan, J. *et al.* Deep-ultraviolet second-harmonic generation by combined degenerate four-wave mixing and surface nonlinearity polarization in photonic crystal fiber. *Sci. Rep.* **7**, 9224 ; doi: 10.1038/srep9224 (2017).

- [39] Shi, J. *et al.* Photonic crystal and quasi-crystals providing simultaneous light coupling and beam splitting within a low refractive-index slab waveguide. *Sci. Rep.* **7**, 1812; doi: 10.1038/srep1812 (2017).
- [40] Estrada-Wiese, D. *et al.* Stochastic optimization of broadband reflecting photonic structures. *Sci. Rep.* **8**, 1193; doi: 10.1038/srep1193 (2018).
- [41] Govdeli, A. *et al.* Integrated Optical Modulator Based on Transition between Photonic Bands. *Sci. Rep.* **8**, 1619; doi: 10.1038/srep1619 (2018).
- [42] Zhang Y.-n. *et al.* A review for optical sensors based on photonic crystal cavities. *Sensors and Actuators A* **233** (2015) 374–389
- [43] Chen, X. *et al.* High-finesse Fabry–Perot cavities with bidimensional Si₃N₄ photonic-crystal slabs. *Light: Science & Applications* **6**, 16190; doi: 10.1038/lsa16190, (2017)
- [44] Czystanowski, T. *et al.* Subwavelength grating as both emission mirror and electrical contact for VCSELs in any material system. *Sci. Rep.* **7**, 40348; doi: 10.1038/srep40348 (2017).
- [45] Zhu, Y. *et al.* Two-dimensional photonic crystal Bragg lasers with triangular lattice for monolithic coherent beam combining. *Sci. Rep.* **7**, 10610; doi: 10.1038/srep10610 (2017).
- [46] Cumming, B.P. *et al.* Bragg-mirror-like circular dichroism in bio-inspired quadruple-gyroid 4srs nanostructures. *Light: Science & Applications* **6**, 16192; doi: 10.1038/lsa16192 (2017).
- [47] Rahman, SK. S.-U. *et al.* Tunable Bragg polaritons and nonlinear emission from a hybrid metal-unfolded ZnSe-based microcavity. *Sci. Rep.* **7**, 767; doi: 10.1038/srep767 (2017).
- [48] Kim, K.-H. *et al.* Direct observation of exceptional points in coupled photonic-crystal lasers with asymmetric optical gains. *Nat. Commun.* **7**, 13893 doi: 10.1038/ncomms13893 (2016).
- [49] Lee, W.-J. *et al.* Ultracompact bottom-up photonic crystal lasers on silicon-on-insulator. *Sci. Rep.* **7**, 9543; doi: 10.1038/srep9543(2017).
- [50] Noda *et al.*: Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers: Review and Introduction of Modulated-Photonic Crystals 4900107 IEEE journal of selected topics in quantum electronics, vol. **23**, no. 6,(2017)
- [51] Hayran, Z. *et all* Rainbow trapping in a chirped three-dimensional photonic crystal. *Scientific Reports* **volume 7**, Article number: 3046 (2017)

- [52] Frey, B. J. *et al.* Effectively infinite optical path-length created using a simple cubic photonic crystal for extreme light trapping. *Sci. Rep.* **7**, 4171; doi: 10.1038/srep4171 (2017).
- [53] Liu, J.-T. *et al.* Greatly enhanced light emission of MoS₂ using photonic crystal heterojunction. *Sci. Rep.* **7**, 16391; doi: 10.1038/srep16391 (2017).
- [54] Zhou, W. *et al.* Ultraviolet optomechanical crystal cavities with ultras-small modal mass and high optomechanical coupling rate. *Sci. Rep.* **6**, 37134; doi: 10.1038/srep37134 (2016).
- [55] Ritchie, R. H. Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films. *Phys. Rev.* **106**, 874 ,1957
- [56] Λύρας, Φ. Δ. Μεταγωγείς πλασμονικής τεχνολογίας για ευρυζωνικές διασυνδέσεις υπολογιστικών συστημάτων. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2015
- [57] Anwar, R.S. *et al.*, Recent advancements in surface plasmon polaritons-plasmonics in subwavelength structures in microwave and terahertz regimes, Digital Communications and Networks (2017), <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2017.08.004>
- [58] Oka, H. *et al.* Simple model of saturable localised surface Plasmon. *Sci. Rep.* **8**, 2643 doi: 10.1038/srep2643 (2017).
- [59] Apalkov, V. *et al.* Proposed graphene nanospaser. *Light: Science & Applications* **3**, e191 doi: 10.1038/lisa191 (2014).
- [60] Cox, J. D. *et al.* Plasmon-assisted high-harmonic generation in graphene. *Nat. Commun.* **8**, 14380 doi: 10.1038/ncomms14380 (2017).
- [61] Mahoney, A. C. *et al.* Zero-field edge plasmons in a magnetic topological insulator. *Nat. Commun.* **8**, 1836 doi: 10.1038/ncomms1836 (2017).
- [62] Ma, J. *et al.* Interplay between plasmon and single-particle excitations in a metal nanocluster. *Nat. Commun.* **6**:10107 doi: 10.1038/ncomms10107 (2015).
- [63] Asmara, T. C. *et al.* Tunable and low-loss correlated plasmons in Mott-like insulating oxides. *Nat. Commun.* **8**, 15271 doi: 10.1038/ncomms15271 (2017).
- [64] Chen, W. *et al.* Probing of sub-picometer vertical differential resolutions using cavity plasmons. *Nat. Commun.* **9**, 801 doi: 10.1038/ncomms801 (2018).
- [65] Lan, Y. *et al.* Multipole Modes Excitation of uncoupled dark Plasmons Resonators based on Frequency Selective Surface at X-band Frequency Regime. *Sci. Rep.* **7**, 9492 doi: 10.1038/srep9492 (2017).

- [66] Hoang, C. V. *et al.* Interplay of hot electrons from localized and propagating plasmons. *Nat. Commun.* **8**, 771 doi: 10.1038/ncomms771 (2017).
- [67] Fan, X. *et al.* Light scattering and surface plasmons on small spherical particles. *Light: Science & Applications* **3**, e179 doi: 10.1038/lisa179 (2014).
- [68] Bergfield, J. P. *et al.* Signatures of Plexitonic States in Molecular Electroluminescence. *Sci. Rep.* **8**, 2314 doi: 10.1038/srep2314 (2018).
- [69] Sakai, K. *et al.* Excitation of Multipole Plasmons by Optical Vortex Beams. *Sci. Rep.* **5**, 8431 doi: 10.1038/srep8431 (2015).
- [70] Tobing, L. Y. M. *et al.* Polarization invariant plasmonic nanostructures for sensing applications. *Sci. Rep.* **7**, 7539 doi: 10.1038/srep7539 (2017).
- [71] Προδρομίδης, Μ. Ι. Συντονισμός επιφανειακών πλασμονίων-Μικροζυγός κρυστάλλου χαλαζία, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2008
- [72] Matthaiakakis, N. *et al.* Tuneable strong optical absorption in a graphene-insulator-metal hybrid plasmonic device. *Sci. Rep.* **7**, 7303 doi: 10.1038/srep7303 (2017).
- [73] Matthaiakakis, N. *et al.* Strong modulation of plasmons in Graphene with the use of an Inverted pyramid array diffraction grating. *Sci. Rep.* **6**, 27550; doi: 10.1038/srep27550 (2016).
- [74] D'Apuzzo, F. *et al.* Terahertz and mid-infrared plasmons in three-dimensional nanoporous graphene. *Nat. Commun.* **8**, 14885 doi: 10.1038/ncomms14885 (2017).
- [75] Xu, Q. *et al.* Effects of edge on graphene plasmons as revealed by infrared nanoimaging. *Light: Science & Applications* **6**, e16204 doi: 10.1038/lisa16204 (2017).
- [76] Sain, B. *et al.* Phase-controlled propagation of surface plasmons. *Light: Science & Applications* **6**, e17072 doi: 10.1038/lisa17072 (2017).
- [77] Pan, D. *et al.* Topologically protected Dirac plasmons in a graphene superlattice. *Nat. Commun.* **8**, 1243 doi: 10.1038/ncomms1243 (2017).
- [78] Raza, S. *et al.* Electron energy-loss spectroscopy of branched gap plasmon resonators. *Nat. Commun.* **7**, 13790 doi: 10.1038/ncomms13790 (2016).
- [79] Kaminer, I. *et al.* Efficient plasmonic emission by the quantum Čerenkov effect from hot carriers in graphene. *Nat. Commun.* **7**, 11880 doi: 10.1038/ncomms11880 (2016).

- [80] Silveiro, I. *et al.* Quantum nonlocal effects in individual and interacting graphene nanoribbons. *Light: Science & Applications* **4**, e241 doi: 10.1038/lisa241 (2015).
- [81] Sim, S. *et al.* Ultra-high modulation depth exceeding 2,400% in optically controlled topological surface plasmons. *Nat. Commun.* **6**:8814 doi: 10.1038/ncomms9814 (2015).
- [82] Zhong, S. *et al.* Tunable plasmon lensing in graphene-based structure exhibiting negative refraction. *Sci. Rep.* **7**, 41788; doi: 10.1038/srep41788 (2017).
- [83] Zeng, Y.-S. *et al.* All-plasmonic Optical Phased Array Integrated on a Thin-film Platform. *Sci. Rep.* **7**, 9959 doi: 10.1038/srep9959 (2017).
- [84] Dikken, D. J. W. *et al.* A phased antenna array for surface plasmons. *Sci. Rep.* **6**, 25037; doi: 10.1038/srep25037 (2016).
- [85] Debu, D. T. *et al.* Tuning Infrared Plasmon Resonance of Black Phosphorene Nanoribbon with a Dielectric Interface. *Sci. Rep.* **8**, 3224 doi: 10.1038/srep3224 (2018).
- [86] Zhang, J. *et al.* Towards nano-optical tweezers with graphene plasmons: Numerical investigation of trapping 10-nm particles with mid-infrared light. *Sci. Rep.* **6**, 38086; doi: 10.1038/srep38086 (2016).
- [87] Hachtel, J. A. *et al.* Exploring the capabilities of monochromated electron energy loss spectroscopy in the infrared regime. *Sci. Rep.* **8**, 5637 doi: 10.1038/srep5637 (2018).
- [88] Kim, S. *et al.* Electronically tunable extraordinary optical transmission in graphene plasmonic ribbons coupled to subwavelength metallic slit arrays. *Nat. Commun.* **7**:12323 doi: 10.1038/ncomms12323 (2016).

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.

Φωτονικοί κρύσταλλοι και πλασμόνια.