



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΥΛΙΚΩΝ

**ΝΑΝΟΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ
ΤΑΣΕΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ανδρέα Τ. Χατζηαφράτη

Επιβλέπων: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Θ. ΔΕΡΒΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΥΛΙΚΩΝ

ΝΑΝΟΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΟΝΩΣΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του

Ανδρέα Τ. Χατζηαφράτη

Επιβλέπων: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Θ. ΔΕΡΒΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16^η Ιουνίου 2012.

.....
Κ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Βασιλείου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2012

.....
Ανδρέας Τ. Χατζηαφράτης

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

© 2012 – All rights reserved

Copyright © Ανδρέας Τ. Χατζηαφράτης

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.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κ. Δέρβο για την εμπιστοσύνη που έχει δείξει στο πρόσωπό μου καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου με ένα πραγματικά τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η αίσθηση επικοινωνίας, στήριξης και συνεργασίας ήταν καθοριστική για την πορεία της εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Θ. Αργυρόπουλο για την προθυμία του να με βοηθήσει κάθε φορά που υπήρχε ανάγκη.

Βεβαίως, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, που με στήριζε συνεχώς, ηθικά και υλικά, κατά την διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και χωρίς την βοήθεια της οποίας δεν θα είχα καταφέρει να υλοποιήσω όσα έχω μέχρι σήμερα επιτύχει.

Τέλος, ευχαριστώ όλους τους στενούς φίλους μου και τα άτομα εμπιστοσύνης μου για την αδιάκοπη συμπαράσταση και εμπύχωση που μου παρείχαν σε κάθε στάδιο της πορείας μου.

Περίληψη

Η Νανοτεχνολογία είναι ο επιστημονικός κλάδος, ο οποίος ασχολείται με την κατανόηση των φαινομένων και την ανάπτυξη υλικών, δομών και συσκευών στη νανομετρική κλίμακα. Η ανάπτυξη υλικών και δομών στη νανομετρική κλίμακα οδήγησε στην ταυτόχρονη ανάπτυξη ειδικού εξοπλισμού για την παρατήρηση αλλά και το χειρισμό των υλικών και των δομών αυτών (π.χ., μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων, μικροσκόπιο μετάδοσης ηλεκτρονίων, οπτικές λαβίδες, κ.τ.λ.). Οι κύριες κατηγορίες νανοϋλικών που αναπτύχθηκαν είναι τα νανοσωματίδια, οι νανοσωλήνες, τα νανοστρώματα και οι νανοπόροι, ενώ οι κύριες μέθοδοι κατασκευής τους μπορούν να συνοψιστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τη Bottom-up και τη Top-down τεχνική. Η Νανοτεχνολογία βρίσκει πολλές εφαρμογές σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας στους τομείς της Ηλεκτρονικής (π.χ. συσκευές στερεάς κατάστασης), της Ιατρικής (π.χ. διαγνωστική και θεραπευτική ιατρική) και της Ενέργειας (π.χ. παραγωγή, μετατροπή, αποθήκευση, εξοικονόμηση ενέργειας). Μία πολύ σημαντική εφαρμογή της Νανοτεχνολογίας αποτελεί η ηλεκτρική μόνωση υψηλών τάσεων, για την οποία πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η ανάπτυξη των σωματιδίων στη νανομετρική κλίμακα. Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια να μελετηθούν τα νανοςύνθετα υλικά, τα οποία αποτελούν τα δομικά στοιχεία για την ανάπτυξη των νανοδιηλεκτρικών υλικών. Τα νανοδιηλεκτρικά υλικά, τα οποία έχουν αναπτυχθεί για την ηλεκτρική μόνωση υψηλών τάσεων, χωρίζονται στη συγκεκριμένη εργασία σε δύο κατηγορίες, τα πολυμέρη νανοςύνθετα διηλεκτρικά και τα διηλεκτρικά νανορευστά. Τέλος, γίνεται μία αναφορά στους κινδύνους και στα ζητήματα ηθικής που ανακύπτουν με τις ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της Νανοτεχνολογίας.

Λέξεις Κλειδιά

Νανοτεχνολογία, τεχνική Bottom-up, τεχνική Top-down, νανοηλεκτρονική, νανοϊατρική, ενεργειακές εφαρμογές, νανοσωματίδια, νανοςύνθετα, πολυμερή νανοδιηλεκτρικά, υλικό πλήρωσης, νανορευστά..

Abstract

Nanotechnology is the scientific field that deals with the understanding of behavior of particles whose size is less than a few nanometers, and also studies and develops materials, structures and devices that are also measured in the nanoscale. The development of these materials and structures led simultaneously to the development of special equipment for their observation and also handling (i.e. scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, optical tweezers). The nanomaterials that are most commonly used in several applications are nanoparticles, nanotubes, nanolayers and nanoporous, and the various methodologies of their construction can be divided in two main categories, Bottom-up and Top-down techniques. Nanotechnology can be applied in many fields of human activity. Illustrative examples are the applications of Nanotechnology in Electronics (i.e. solid state devices), Medicine (diagnostics and therapeutics medicine), Energy (i.e. production, conversion, storage, and saving of energyv etc). A very important use of Nanotechnology is the electrical insulation of high voltages. Crucial part in the field of commercial applications and applications that concern the electrical insulation of high voltages has the development of nanoparticles. In this thesis the nanocomposites that constitute the fundamental elements for the development of nanomaterials, are thoroughly presented. The nanodielectrics that are needed in the the electrical insulation of high voltages are demonstrated in two categories, the dielectric nanocomposite polymers and dielectric nanofluids. Finally, the risks and ethic issues that arise due to the rapid progress in the field of Nanotechnology are briefly mentioned.

Keywords

Nanotechnology, Bottom-Up and Top-Down techniques, nanoelectronics, nanomedicine, energy applications, nanoparticles, nanocomposites, polymer nanodielectrics, filler, nanofluids.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iii
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	3
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	5
2.3 ΕΙΔΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	6
2.3.1 Μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων.....	7
2.3.2 Μικροσκόπιο μετάδοσης ηλεκτρονίων.....	8
2.3.3 Μικροσκόπιο ατομικής ισχύος.....	9
2.3.4 Μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας.....	10
2.3.5 Οπτικές λαβίδες.....	11
2.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ	12
2.4.1 Τεχνική Bottom-Up	12
2.4.2 Τεχνική Top-Down.....	14
2.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΝΑΝΟΎΛΙΚΩΝ.....	15
2.5.1 Νανοσωματίδια	16
2.5.2 Νανοκαλώδια και νανοσωλήνες.....	18
2.5.3 Νανοστρώματα.....	19
2.5.4 Νανοπόροι.....	19
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	20
3.1 ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ.....	20
3.1.1 Συσκευές στερεάς κατάστασης.....	21
3.1.2 Μοριακές ηλεκτρονικές συσκευές.....	24
3.2 Η ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ	26
3.2.1 Διαγνωστική Ιατρική	26
3.2.2 Θεραπευτική Ιατρική	27
3.2.3 Νανοχειρουργική.....	28
3.2.4 Άλλες εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στην Ιατρική.....	28
3.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	29
3.3.1 Παραγωγή ενέργειας.....	30
3.3.2 Μετατροπή της ενέργειας.....	32
3.3.3 Αποθήκευση της ενέργειας.....	34
3.3.4 Μεταφορά της ενέργειας.....	35
3.3.5 Εξοικονόμηση της ενέργειας.....	36
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	39
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	39
4.2 ΔΙΑΜΟΡΙΑΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	40
4.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗ ΝΑΝΟΚΛΙΜΑΚΑ	42
4.4 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	44
4.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	46
4.6 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	47

5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΝΑΝΟΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	48
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ.....	48
5.2	ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	50
5.3	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	53
5.4	ΣΥΝΘΕΣΗ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	56
5.5	ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	57
5.6	ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΝΑΝΟΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	61
	5.6.1 <i>Αντοχή της γραμμής μεταφοράς</i>	63
	5.6.2 <i>Απόδοση μερικής εκφόρτισης</i>	64
5.7	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΒΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	65
	5.7.1 <i>Σιλικόνη</i>	65
	5.7.2 <i>Εποξειδικά υλικά</i>	67
5.8	ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	68
	5.8.1 <i>Υλικά ανόργανων οξειδίων</i>	68
	5.8.2 <i>Ανθρακούχα υλικά</i>	70
	5.8.3 <i>Μεταλλικά υλικά</i>	71
	5.8.4 <i>Οργανικά υλικά</i>	71
5.9	ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΝΑΝΟΡΕΥΣΤΑ.....	71
	5.9.1 <i>Ηλεκτροδυναμική ανάλυση των διηλεκτρικών νανορευστών</i>	73
	5.9.2 <i>Μέθοδοι παρασκευής των νανορευστών</i>	77
	5.9.3 <i>Η σταθερότητα των νανορευστών</i>	79
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
6.1	ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΗΘΙΚΗΣ ΣΤΗ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.....	83
6.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	88

Σχήματα

Σχήμα 2.1: Το σχηματικό διάγραμμα του μικροσκοπίου σάρωσης ηλεκτρονίων.....	8
Σχήμα 2.2: Το σχηματικό διάγραμμα του μικροσκοπίου ατομικής ισχύος.....	10
Σχήμα 2.3: Το σχηματικό διάγραμμα του μικροσκοπίου σάρωσης σήραγγας.....	11
Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση ενός φουλερένιου που αποτελείται από 60 άτομα άνθρακα (C – 60).....	17
Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού δενδριμερούς με τις διακριτές περιοχές του.....	18
Σχήμα 2.6: Διάφοροι τύποι νανοσωλήνων άνθρακα	18
Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση μίας μήμης με τη δομή της διασταυρούμενης ράβδου	25
Σχήμα 3.2: Μία ευαισθητοποιημένη μέσω βαφής ηλιακή κυψέλη	31
Σχήμα 3.3: Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου.....	33
Σχήμα 3.4: Το σχηματικό διάγραμμα ενός ηλεκτροχημικού πυκνωτή.....	35
Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση της τυπικής δομής μίας οργανικής διόδου εκπομπής φωτός.....	37
Σχήμα 4.1: Διαφορετικές παραλλαγές της επιφάνειας ενός νανοσωματιδίου.....	46
Σχήμα 4.2: Διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης των νανοσωματιδίων για να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές εφαρμογές	47
Σχήμα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση των νανοσωματιδίων σε μία πολυμερή μήτρα. Η περιοχή τοπικής αγωγιμότητα σχηματίζεται γύρω από τα νανοσωματίδια που επικαλύπτονται μερικώς	52
Σχήμα 5.2: Απεικόνιση του μοντέλου πολλαπλού πυρήνα	55
Σχήμα 5.3: Το απλοποιημένο διάγραμμα ενός πολυμερούς νανوسύνθετου υλικού.....	61
Σχήμα 5.4: Αναπαράσταση της χημικής δομής της πολυδιμεθισιλοξάνης	65
Σχήμα 5.5: Η μοντελοποίηση ενός νανοσωματιδίου σε ένα μονωτικό έλαιο	74
Σχήμα 5.6: (α) Στερική σταθεροποίηση νανοσωματιδίου, (β) ηλεκτροστατική σταθεροποίηση νανοσωματιδίου	80

Κεφάλαιο 1

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η Νανοτεχνολογία αφορά τη μελέτη των φαινομένων και την ανάπτυξη δομών στη νανομετρική κλίμακα. Στη νανομετρική κλίμακα, οι ιδιότητες των υλικών είναι διαφορετικές εξαιτίας των κβαντικών, κυρίως, φαινομένων που λαμβάνουν χώρα εκεί. Οι νανοδομές που αναπτύσσονται βρίσκουν εφαρμογές τόσο σε εμπορικούς όσο και στους τομείς της βιομηχανίας. Σημαντικός τομέας μελέτης της Νανοτεχνολογίας είναι η ανάπτυξη νανοσωματιδίων και νανοσύνθετων υλικών, τα οποία θα διαθέτουν εξειδικευμένες ιδιότητες ανάλογα με την εφαρμογή που πρόκειται να εφαρμοστούν.

1.2 Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των νανοδιηλεκτρικών στις ηλεκτρικές μονώσεις υψηλών τάσεων και η εισαγωγική επισκόπηση των βασικών εννοιών και εφαρμογών της Νανοτεχνολογίας.

Πιο συγκεκριμένα, στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η έννοια της Νανοτεχνολογίας και γίνεται μία μικρή ιστορική αναδρομή στους σημαντικότερους σταθμούς που οδήγησαν στη ραγδαία εξέλιξη της επιστήμης αυτής. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο ειδικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μελέτη και τον έλεγχο των δομών στη νανομετρική κλίμακα. Παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία των μικροσκοπίων σάρωσης και μετάδοσης ηλεκτρονίων καθώς και των μικροσκοπίων ατομικής ισχύος και σάρωσης σήραγγας και η λειτουργία των οπτικών λαβίδων. Περαιτέρω αναλύονται οι τεχνικές παραγωγής των νανοϋλικών και γίνεται μία προσπάθεια κατηγοριοποίησής τους.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τρεις από τις σημαντικότερους τομείς που βρίσκουν εφαρμογή οι δομές της Νανοτεχνολογίας. Αρχικά, περιγράφονται οι εφαρμογές στον τομέα της Ηλεκτρονικής, κατηγοριοποιώντας τις νανοσυσκευές, στις

συσκευές στερεάς κατάστασης και στις μοριακές ηλεκτρονικές συσκευές. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι εφαρμογές σε διάφορους τομείς της Ιατρικής, όπως είναι η διαγνωστική ιατρική, η νανοχειρουργική, κ.τ.λ. Τέλος, γίνεται μία εκτενής αναφορά στις ενεργειακές εφαρμογές της, από το στάδιο της παραγωγής ενέργειας μέχρι και την τελική κατανάλωση και εξοικονόμησή της.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα νανოსωματίδια. Τα νανოსωματίδια αποτελούν σημαντικά δομικά στοιχεία για την ανάπτυξη των νανοδιηλεκτρικών υλικών, που μελετώνται στο επόμενο κεφάλαιο. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι διαμοριακές δυνάμεις που αναπτύσσονται μέσα σε ένα σωματίδιο καθώς επίσης και οι ιδιότητες τους στη νανομετρική κλίμακα. Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των μοναδικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τα νανοςωματίδια παίζει η δυνατότητα μεταβολής της επιφάνειας και ο ξεχωριστός τρόπος σύνδεσής τους, που παρουσιάζονται σε επόμενες παραγράφους.

Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στερεά και τα ρευστά νανοδιηλεκτρικά υλικά. Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στην έννοια των νανοσύνθετων υλικών και μελετάται η σύνθεσή τους. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε δύο είδη νανοδιηλεκτρικών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές της ηλεκτρικής μόνωσης υψηλών τάσεων. Τα πολυμερή νανοδιηλεκτρικά και τα διηλεκτρικά νανορευστά.

Κεφάλαιο 2

2 NANOTEΧΝΟΛΟΓΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος *νανοτεχνολογία* αναφέρεται σε κάθε τεχνολογία στο επίπεδο της νανοκλίμακας, η οποία βρίσκει εφαρμογές σε πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής. Πιο συγκεκριμένα, η νανοτεχνολογία περιλαμβάνει την έρευνα και την ανάπτυξη τεχνολογιών σε ατομικό, μοριακό ή μακρομοριακό επίπεδο σε κλίμακα από 1 – 100 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Ακόμη, περιλαμβάνει τη δημιουργία και τη χρήση διαφόρων δομών, συσκευών και συστημάτων, οι οποίες διαθέτουν ξεχωριστές ιδιότητες και λειτουργίες εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους τους. Επίσης, περιλαμβάνει την ικανότητα ελέγχου και χειρισμού των διαφόρων υλικών και συσκευών σε ατομικό και μοριακό επίπεδο [1].

Οι συνεχείς εξελίξεις στον τομέα της νανοτεχνολογίας οδηγούν στην ανάπτυξη νέων πειραματικών και υπολογιστικών εργαλείων. Η ανακάλυψη νέων υλικών, διαδικασιών και φαινομένων στη νανοκλίμακα, καθώς επίσης και η ανάπτυξη καινούργιων θεωρητικών και πειραματικών τεχνικών οδηγούν στην κατασκευή καινοτόμων νανοσυστημάτων και νανοϋλικών. Οι ιδιότητες των υλικών στη νανοκλίμακα μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές από τις ιδιότητες των ίδιων υλικών στη συμβατική κλίμακα. Καθώς η διάσταση κάποιου υλικού μειώνεται σταδιακά, αρχικά οι ιδιότητες του παραμένουν οι ίδιες. Στη συνέχεια, καθώς μικραίνει ολοένα και περισσότερο η διάσταση του, παρατηρούνται μικρές αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού. Τέλος, όταν μία από τις διαστάσεις του υλικού γίνει μικρότερη από 100 nm τότε συνήθως παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού. Οι ιδιότητες της ύλης στη νανοκλίμακα είναι κβαντικής φύσεως, διαφέρουν γι' αυτόν το λόγο από τις ιδιότητες των μεγεθών που συναντώνται στο μακρόκοσμο. Εάν μία μόνο από τις διαστάσεις μίας δομής βρίσκεται στη νανοκλίμακα, τότε η δομή αυτή αναφέρεται ως κβαντικό πηγάδι (quantum well). Παρομοίως, εάν δύο από τις διαστάσεις μίας δομής βρίσκονται στη νανοκλίμακα, τότε η δομή αυτή αναφέρεται ως κβαντικό καλώδιο (quantum wire). Τέλος, εάν και οι τρεις διαστάσεις της δομής βρίσκονται στη νανοκλίμακα τότε η δομή αυτή αναφέρεται ως κβαντική τελεία (quantum dot).

Ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες των νανοϋλικών και των νανοδομών που κατασκευάζονται συναντώνται σε αρκετές δομές του φυσικού κόσμου. Παραδείγματα τέτοιων χαρακτηριστικών, που διαθέτουν ορισμένες πολύ απλές φυσικές δομές, είναι η δυνατότητα αντιγραφής και μεταφοράς της πληροφορίας και η δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας με το περιβάλλον. Γι' αυτόν το λόγο, οι επιστήμονες που ασχολούνται με τη νανοτεχνολογία ανατρέχουν συχνά στη μελέτη των δομών του φυσικού κόσμου, έτσι ώστε να κατανοήσουν τους μηχανισμούς δημιουργίας και επιβίωσης των διαφόρων οργανισμών που υπάρχουν σε αυτόν.

Στη συνέχεια αναφέρονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα δομών που λειτουργούν αποτελεσματικά στη νανοκλίμακα και βρίσκονται στο φυσικό κόσμο. Το κύτταρο, το οποίο αποτελεί τη στοιχειώδη δομική μονάδα της ζωής, λειτουργεί με τη βοήθεια εξειδικευμένων οργανικών μορίων και κυτταρικών οργανιδίων. Τα μιτοχόνδρια, για παράδειγμα, είναι τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας των κυττάρων. Στη νανοτεχνολογία μελετώνται οι μηχανισμοί με τους οποίους τα μιτοχόνδρια μετατρέπουν την ενέργεια που λαμβάνεται διαμέσου της τροφής σε κυτταρική ενέργεια. Γι' αυτόν το λόγο αναζητώνται τρόποι παραγωγής ενέργειας με νανοκυψέλες, οι οποίες θα διαθέτουν μηχανισμούς παρόμοιους με αυτούς των μιτοχονδρίων. Ένα ακόμη φυσικό παράδειγμα μίας νανομηχανής είναι τα ριβοσώματα, τα οποία είναι υπεύθυνα για την παραγωγή των πρωτεϊνών που υπάρχουν στους έμβιους οργανισμούς. Ακόμη, τα ένζυμα, τα οποία είναι πρωτεϊνικά μόρια, επιτελούν διάφορες μηχανικές λειτουργίες στα κύτταρα των οργανισμών. Ορισμένες από αυτές τις λειτουργίες είναι η μεταφορά θρεπτικών συστατικών, η αποδόμηση διαφόρων επιβλαβών ουσιών για τον οργανισμό, ο τεμαχισμός και η συγκόλληση των μορίων σε συγκεκριμένες θέσεις. Μία από τις πλέον εξελιγμένες τεχνικές παραγωγής ενέργειας είναι η φωτοσύνθεση. Αναλύοντας τους μηχανισμούς με τους οποίους παράγεται η ενέργεια αυτή, χρησιμοποιώντας την ηλιακή ενέργεια και τη χλωροφύλλη των φυτών για να διασπάσει ανόργανες ουσίες, όπως είναι το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα, οι επιστήμονες μπορούν να καταφέρουν να κατασκευάσουν ένα μηχανισμό σε νανομετρική κλίμακα για φθηνή παραγωγή ενέργειας. Μία ακόμη φυσική διεργασία, η οποία μελετάται από τους επιστήμονες για την ανάπτυξη καινούργιων τεχνικών σύνθεσης νανοϋλικών, είναι η βιοανοργανοποίηση (biomineralization). Με τη βοήθεια της διαδικασίας αυτής οι ζωντανοί οργανισμοί παράγουν ανόργανα άλατα και ορυκτά, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως στις δομικές λειτουργίες των ιστών. Η ελεγχόμενη αυτή

παραγωγή υλικών σε νανομετρική κλίμακα φαίνεται να παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών τεχνικών σύνθεσης νανοϋλικών [2].

Η κατασκευή νέων υλικών και μηχανισμών στο επίπεδο της νανοκλίμακας μπορεί να επιτευχθεί με το συνδυασμό διαφόρων επιστημονικών πεδίων, όπως είναι η χημεία, η βιολογία, η πληροφορική, η κβαντική φυσική, κ.τ.λ. Οι εξελίξεις στον τομέα της νανοτεχνολογίας βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλους τομείς της καθημερινότητας, όπως είναι η παραγωγή ενέργειας, η επικοινωνία, η ιατρική, η προστασία του περιβάλλοντος, κ.τ.λ. Η νανοτεχνολογία βελτιώνει τις μεθόδους συσκευασίας, τα συστήματα καθαρισμού του νερού, τα ενεργειακά συστήματα, την υπερφυσική ενίσχυση του ανθρώπινου οργανισμού, τη νανοϊατρική, τις μεθόδους παραγωγής τροφίμων κ.τ.λ. Το μικρό μέγεθος των νανοδομών επιτρέπει την αυτοματοποίηση εργασιών, που ήταν προηγουμένως αδύνατη λόγω μεγέθους και κατά συνέπεια περιορίζει το μόχθο, τη χρήση εδάφους και τις απαιτήσεις συντήρησης. Δεν πρέπει, βέβαια, σε καμία περίπτωση να αγνοηθούν οι κίνδυνοι και τα ηθικά ζητήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην καθημερινή ζωή.

2.2 Ιστορική αναδρομή

Η νανοτεχνολογία είναι ένας σχετικά νέος επιστημονικός τομέας αν και η σύλληψη των βασικών ιδεών της έγινε πριν από αρκετά χρόνια. Η έννοια της νανοτεχνολογίας εισήχθη κατά τη διάρκεια μίας διάλεξης στην Αμερικανική Φυσική Εταιρεία (American Physical Society) από τον Richard Feynman [3]. Στη διάλεξη αυτή διατυπώθηκε η ιδέα ελέγχου των υλικών σε ατομικό επίπεδο με σκοπό την κατασκευή συσκευών αρκετά μικρών σε μέγεθος, οι οποίες θα είχαν τη δυνατότητα να παράγουν και να αποθηκεύουν ενέργεια. Ακόμη, θα μπορούσε να επιτευχθεί η αποθήκευση τεράστιων ποσοτήτων πληροφορίας σε πολύ μικρό χώρο [3].

Ο όρος νανοτεχνολογία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον καθηγητή Norio Taniguchi το 1974, ο οποίος αναφέρθηκε σε αυτόν για να περιγράψει τη διαδικασία κατεργασίας των υλικών σε ατομικές διαστάσεις. Το 1981 εφευρίσκεται από τους Benning και Rohrer το μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας (scanning tunneling microscope), το οποίο είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τη μετέπειτα εξέλιξη της νανοτεχνολογίας, καθώς επέτρεπε την απεικόνιση μεμονωμένων ατομών ενός υλικού [4]. Την ίδια χρονιά ο Eric Drexler διατύπωσε τις βασικές αρχές του μοριακού σχεδιασμού και της νανομηχανικής [5].

Λίγο αργότερα, το 1986 εφευρίσκεται ακόμη ένα σημαντικό εργαλείο, που βοήθησε στη ραγδαία ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας, το μικροσκόπιο ατομικής ισχύος (atomic force microscope) από τους Binning, Quate και Gerber. Το μικροσκόπιο ατομικής ισχύος διαθέτει την ικανότητα να απεικονίζει και να διαχειρίζεται υλικά που το μέγεθός τους φτάνουν το 1 nm [4]. Την ίδια χρονιά ο Eric Drexler χρησιμοποιεί τον όρο νανοτεχνολογία στο βιβλίο του «Οι Μηχανές της Δημιουργίας» (“Engines of Creation”) για να περιγράψει την κατασκευή συσκευών στο επίπεδο της νανοκλίμακας [5].

Στις αρχές της δεκαετίας του '90 αρχίζουν να λειτουργούν οι πρώτες εταιρείες νανοτεχνολογίας. Ενώ το 1991 ανακαλύπτεται από τον Iijima ο νανοσωλήνας άνθρακα, ο οποίος παρουσιάζει εξαιρετικές ιδιότητες όσον αφορά την αντοχή του και τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα του. Το 1993 ο Bawendi ανακάλυψε μία μέθοδο για την ελεγχόμενη σύνθεση των νανοκρυστάλλων (κβαντικές τελείες), ανοίγοντας το δρόμο για εφαρμογές, όπως είναι τα υψηλής απόδοσης φωτοβολταϊκά συστήματα και τα συστήματα φωτισμού.

Στις αρχές της δεκαετίας του '00 εμφανίστηκαν οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές της νανοτεχνολογίας, αν και ήταν περιορισμένες στον τομέα των νανοϋλικών κυρίως. Μερικές από τις εμπορικές εφαρμογές των νανοϋλικών είναι η χρήση νανοσωματιδίων αργύρου για αντιβακτηριακούς σκοπούς, διαφανείς αντηλιακές μεμβράνες για την προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία και καρβονικοί νανοσωλήνες για τη χρήση τους σε υφάσματα που δε λερώνονται.

Τα πρώτα νανοϋλικά, βέβαια, κάνουν την εμφανισή τους από το Μεσαίωνα. Την εποχή εκείνη, οι τεχνίτες επεξεργάζονταν το χρυσό και άλλα υλικά. Ακολουθώντας μία εμπειρική διαδικασία κατάφερναν με τη βοήθεια της φωτιάς να παράγουν υλικά, τα οποία διέθεταν ξεχωριστές για την εποχή ιδιότητες. Για παράδειγμα, τα βιτρό των Βικτοριανών και Μεσαιωνικών εκκλησιών είναι διακοσμημένα με χρυσές νανοκουκκίδες [4].

2.3 Ειδικός εξοπλισμός

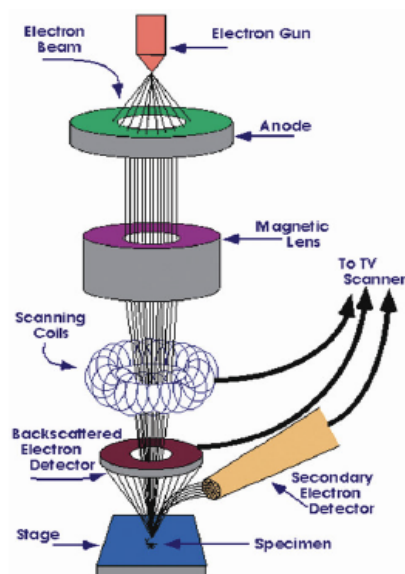
Η ραγδαία εξέλιξη στον τομέα της νανοτεχνολογίας οφείλεται κατά κύριο λόγο στις ιδιότητες που παρουσιάζουν τα υλικά όταν οι διαστάσεις τους βρίσκονται στη νανοκλίμακα. Ο έλεγχος και η παρατήρηση των νανοϋλικών και των νανοσωματιδίων στις διαστάσεις αυτές δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση. Γι' αυτόν το λόγο εμφανίζεται

η ανάγκη για την ανάπτυξη ειδικών εργαλείων, τα οποία επιτρέπουν στους επιστήμονες να παρατηρούν με ακρίβεια, να ελέγχουν και να κατασκευάζουν υλικά και δομές στο επίπεδο της νανοκλίμακας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας ορισμένων τέτοιων εργαλείων, όπως είναι το μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων, το μικροσκόπιο μετάδοσης ηλεκτρονίων, κ.τ.λ.

2.3.1 Μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων

Το μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων (Scanning Electron Microscope, SEM) είναι ένα μικροσκόπιο ηλεκτρονίων. Η απεικόνιση ενός δείγματος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μία υψηλής ενέργειας δέσμης ηλεκτρονίων, η οποία σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος.

Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του βασίζεται στην αλληλεπίδραση της δέσμης των ηλεκτρονίων με τα άτομα του δείγματος. Από την αλληλεπίδραση αυτή παράγονται διάφορα σήματα με τη μορφή δευτερογενής μορφής ηλεκτρονίων, σκεδασμένων ηλεκτρονίων ή χαρακτηριστικών ακτίνων X, τα οποία περιέχουν πληροφορίες που αφορούν τη μορφολογία της επιφάνειας του δείγματος, τη σύνθεση και το μέγεθός του. Αρχικά, η δέσμη των ηλεκτρονίων περνάει από πηνία σάρωσης ή πλάκες εκτροπής. Οι μηχανισμοί αυτοί εκτρέπουν τη δέσμη των ηλεκτρονίων οριζόντια και κάθετα, ώστε να δημιουργηθεί ένα πλέγμα ηλεκτρονίων το οποίο θα σαρώσει την επιφάνεια του δείγματος. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες ανιχνεύουν και ενισχύουν τα σήματα που παράγονται. Τα σήματα αυτά απεικονίζονται σε μία οθόνη καθοδικού σωλήνα δίνοντας με ακρίβεια και λεπτομέρεια το ανάγλυφο του εξεταζόμενου δείγματος.



Σχήμα 2.1: Το σχηματικό διάγραμμα του μικροσκοπίου σάρωσης ηλεκτρονίων [6].

Για την ορθή λειτουργία του μικροσκοπίου σάρωσης ηλεκτρονίων τα δείγματα που εξετάζονται θα πρέπει να είναι αγωγίμα, ώστε η δέσμη των ηλεκτρονίων να μπορέσει με επιτυχία να σαρώσει την επιφάνειά τους. Στην περίπτωση, που εξετάζεται κάποιο μη αγωγίμο υλικό τότε συνήθως η επιφάνειά του επικαλύπτεται με ένα στρώμα από ένα αγωγίμο υλικό. Ένας άλλος τρόπος για να εξεταστούν τέτοιου είδους δείγματα είναι η χρήση του περιβαλλοντικού μικροσκοπίου σάρωσης ηλεκτρονίων (Environmental SEM, ESEM).

Οι εικόνες που λαμβάνονται με το μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων είναι ασπρόμαυρες καθώς δε χρησιμοποιούνται κύματα φωτός. Όμως, παρουσιάζουν εξαιρετική λεπτομέρεια και ακρίβεια συγκρινόμενες με αυτές που προκύπτουν από το παραδοσιακό μικροσκόπιο φωτός. Το μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων βρίσκεται εφαρμογή κυρίως στη μελέτη της επιφάνειας των νανοσύνθετων πολυμερών, των νανοϊνών, διαφόρων νανοσωματιδίων, κ.τ.λ. [7].

2.3.2 Μικροσκόπιο μετάδοσης ηλεκτρονίων

Η αρχή λειτουργίας του μικροσκοπίου μετάδοσης ηλεκτρονίων (Transmission Electron Microscope, TEM) διαφέρει ελαφρώς από αυτήν του μικροσκοπίου σάρωσης ηλεκτρονίων. Γενικά, μία δέσμη ηλεκτρονίων διαπερνά το πολύ λεπτό εξεταζόμενο δείγμα και αλληλεπιδρά με τα άτομα του καθώς διέρχεται από αυτό. Η εικόνα σχηματίζεται από τα ηλεκτρόνια, τα οποία εκπέμπονται από την αλληλεπίδραση αυτή.

Στη συνέχεια ενισχύεται από αντικειμενικούς φακούς και προβάλλεται στην οθόνη μίας απεικονιστικής συσκευής.

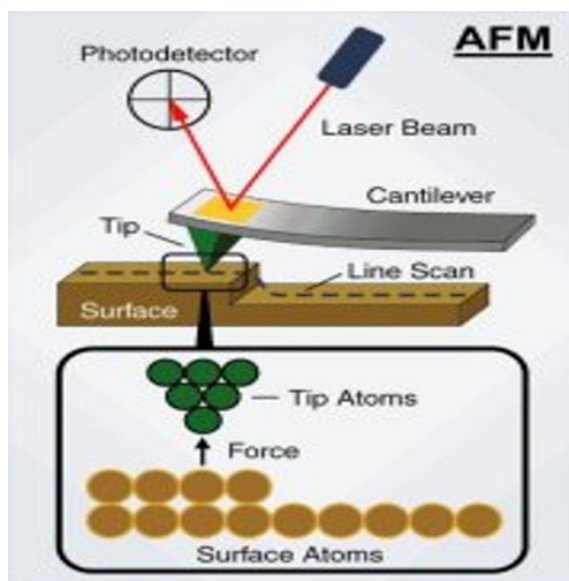
Στο μικροσκόπιο μετάδοσης ηλεκτρονίων η δέσμη των ηλεκτρονίων διαδίδεται μέσα στο εξεταζόμενο δείγμα με αποτέλεσμα να παρατηρούνται οι αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων (π.χ., διάδοση, σκέδαση, απορρόφηση) με την ύλη. Χρησιμοποιείται μία πηγή φωτός, η οποία εκπέμπει τη δέσμη των ηλεκτρονίων και με τη βοήθεια μαγνητικών φακών η δέσμη αυτή κατευθύνεται κατάλληλα προς το εξεταζόμενο δείγμα. Σε συγκεκριμένες θέσεις του δείγματος τοποθετούνται βαριά άτομα (π.χ., μόλυβδος) έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη σκέδαση των ηλεκτρονίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη ανάλυση της παραγόμενης εικόνας. Τα ηλεκτρόνια που παραμένουν στη δέσμη απεικονίζονται σε μία οθόνη φθορισμού ενώ αυτά που σκεδάζονται εμφανίζουν σκοτεινές περιοχές στην οθόνη. Εάν κάποιο από τα ηλεκτρόνια συναντήσει κάποιο σκεδαστή τότε το πιθανότερο είναι να μην καταφέρει να διασχίσει το εξεταζόμενο δείγμα. Σε αντίθετη περίπτωση τα ηλεκτρόνια που περνούν έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να διασχίσουν το εξεταζόμενο δείγμα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ένταση της εικόνας που παράγεται από τη συσκευή αυτή. Μία κύρια απαίτηση για την ορθή λειτουργία του μικροσκοπίου μετάδοσης ηλεκτρονίων είναι το εξεταζόμενο δείγμα να έχει πολύ μικρό πάχος έτσι ώστε να μεγιστοποιείται το πλήθος των ηλεκτρονίων που θα το διαπεράσουν [8].

2.3.3 Μικροσκόπιο ατομικής ισχύος

Το μικροσκόπιο ατομικής ισχύος χρησιμοποιείται συνήθως για τη λεπτομερή απεικόνιση της επιφάνειας που σαρώνεται σε ατομικό επίπεδο. Ένα κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα του μικροσκοπίου ατομικής ισχύος είναι ότι διαθέτει υψηλής ποιότητας τριασδιάστατη χωρική ανάλυση.

Το μικροσκόπιο ατομικής ισχύος αποτελείται από μία ακίδα, η οποία είναι τοποθετημένη κοντά στο ελεύθερο άκρο ενός είδους εύκαμπτης γέφυρας. Για τη σάρωση του εξεταζόμενου δείγματος χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί σαρωτές. Καθώς η ακίδα εφαρμόζεται στο εξεταζόμενο δείγμα αναπτύσσονται ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις μεταξύ τους. Οι δυνάμεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα τη μερική παραμόρφωση της γέφυρας. Η παραμόρφωση αυτή ανιχνεύεται με τη βοήθεια ενός οπτικού συστήματος ανίχνευσης στο οποίο μία ακτίνα λέιζερ ανακλάται στο πίσω μέρος της γέφυρας. Κατά τη διάρκεια της σάρωσης, η εικόνα που παράγεται προκύπτει

από το σύστημα ανάδρασης που δημιουργείται μεταξύ του οπτικού συστήματος ανίχνευσης και των πιεζοηλεκτρικών σαρωτών [7].



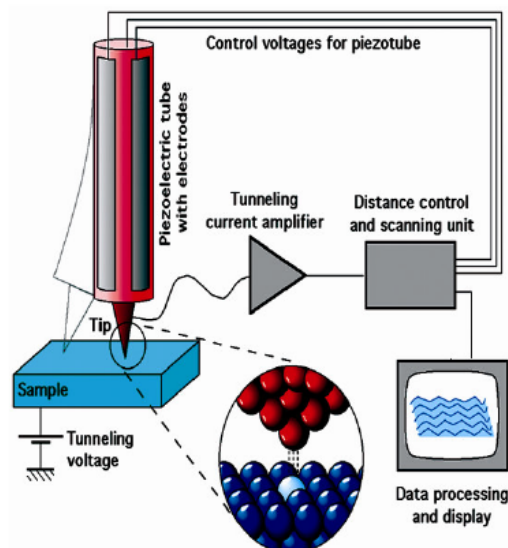
Σχήμα 2.2: Το σχηματικό διάγραμμα του μικροσκοπίου ατομικής ισχύος [9].

2.3.4 Μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας

Το μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας (Scanning Tunneling Microscopy, SEM) είναι ένα όργανο απεικόνισης των νανοδομών που παράγει εικόνες εγκάρσιας ανάλυσης σε ατομικό επίπεδο. Παρόμοια με το μικροσκόπιο ατομικής ισχύος στο μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας μία ακίδα χρησιμοποιείται για να σαρώσει την επιφάνεια ενός αγωγίμου δείγματος. Η σάρωση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου χωρίς το δείγμα να έρχεται σε επαφή με την ακίδα.

Η βασική αρχή λειτουργίας του μικροσκοπίου σάρωσης σήραγγας βασίζεται στο κβαντικό φαινόμενο σήραγγας. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, όταν η αγώγιμη ακίδα φτάσει σε πολύ μικρή απόσταση από μία αγώγιμη ή ημιαγώγιμη επιφάνεια τότε δημιουργείται ένα ρεύμα σήραγγας (ροή ηλεκτρονίων) στο κενό που υπάρχει μεταξύ τους. Οι μεταβολές των τιμών της έντασης του ρεύματος αυτού απεικονίζονται στην παραγόμενη εικόνα. Με αυτόν τον τρόπο σαρώνεται όλη η επιφάνεια του δείγματος. Η μορφολογία της επιφάνειας προκύπτει σαν συνάρτηση της απόστασης της ακίδας από το δείγμα και της εγκάρσιας θέσης καθόλη τη διάρκεια της σάρωσης. Εκτός από την απεικόνιση της επιφάνειας ενός δείγματος, το μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την τοποθέτηση μορίων και ατόμων σε συγκεκριμένες θέσεις του δείγματος, ώστε να δημιουργηθεί κάποια επιθυμητή δομή. Το μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατάστασεις κενού, αέρα ή κάποιου

υγρού ή αερίου. Επίσης, μπορεί να λειτουργήσει σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών περιβάλλοντος. Για την ορθή λειτουργία του μικροσκοπίου σάρωσης σήραγγας απαιτούνται πολύ καθαρές επιφάνειες δειγμάτων καθώς επίσης η ακίδα που χρησιμοποιείται θα πρέπει να είναι αρκετά αιχμηρή [7].



Σχήμα 2.3: Το σχηματικό διάγραμμα του μικροσκοπίου σάρωσης σήραγγας [10].

2.3.5 Οπτικές λαβίδες

Οι οπτικές λαβίδες χρησιμοποιούνται για το χειρισμό των μικρο και νανο διηλεκτρικών σωματιδίων. Ο χειρισμός των νανοδιηλεκτρικών σωματιδίων πραγματοποιείται με την εφαρμογή πολύ μικρών δυνάμεων διαμέσου μίας δέσμης λέιζερ πολύ υψηλής πυκνότητας. Η δέσμη οδηγείται συνήθως από ένα τροποποιημένο οπτικό μικροσκόπιο.

Το πιο στενό σημείο της οδηγούμενης δέσμης λέιζερ εμφανίζει μία πολύ ισχυρή διαβάθμιση ηλεκτρικού πεδίου. Εξαιτίας της διαβάθμισης αυτής τα διηλεκτρικά σωματίδια μετατοπίζονται προς το κέντρο της δέσμης λέιζερ, όπου υπάρχει ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Επίσης, το φως λέιζερ ασκεί κάποια δύναμη στα σωματίδια που βρίσκονται κατά μήκος της ακτίνας διάδοσης της δέσμης. Αυτό συμβαίνει επειδή, το φως αποτελείται από μικροσκοπικά σωματίδια, τα οποία συγκρούονται με τα διηλεκτρικά νανοςωματίδια. Εξαιτίας των συγκρούσεων αυτών εμφανίζεται μία κύρια δύναμη η οποία αποτελείται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα είναι η δύναμη σκέδασης η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω μετατόπιση των νανοδιηλεκτρικών σωματιδίων που βρίσκονται στο κέντρο της δέσμης λέιζερ. Η δεύτερη συνιστώσα είναι η δύναμη επαναφοράς η οποία λειτουργεί ως οπτική παγίδα

των νανοδιηλεκτρικών σωματιδίων. Οι οπτικές αυτές παγίδες μπορούν ακόμη, να χρησιμοποιηθούν για ποσοτικές μετρήσεις των νανοδιηλεκτρικών σωματιδίων. Όταν χρησιμοποιούνται γι' αυτόν το σκοπό ρυθμίζονται έτσι ώστε το σωματίδιο να μη μπορεί να μετατοπιστεί πέρα από το κέντρο της παγίδας. Αυτό συμβαίνει επειδή, η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με τη μετατόπιση του από το κέντρο της παγίδας, εφόσον βέβαια η μετατόπιση αυτή είναι αρκετά μικρή. Η οπτική παγίδευση του σωματιδίου εξαρτάται τόσο από το μέγεθός του όσο και από το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται για να το παγιδεύσει [11].

2.4 Τεχνικές παραγωγής νανοϋλικών

Στο φυσικό κόσμο τα άτομα αποτελούν τις βασικές δομικές μονάδες της ύλης και ο συνδυασμός τους οδηγεί στη δημιουργία σύνθετων ενώσεων, όπως είναι τα μόρια. Στη νανοτεχνολογία υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις κατασκευής νανοϋλικών και νανοδομών. Η πρώτη από αυτές αναφέρεται ως «από πάνω προς τα κάτω» προσέγγιση (bottom-up approach). Κύριος σκοπός της τεχνικής αυτής είναι ο κατάλληλος συνδυασμός μικρότερων δομών, ώστε να δημιουργηθεί μία μεγάλη πολύπλοκη δομή. Η δεύτερη από αυτές αναφέρεται ως «από πάνω προς τα κάτω» προσέγγιση (top-down approach). Η τεχνική top-down είναι η διαδικασία κατά την οποία από ένα υλικό μεγάλων διαστάσεων χρησιμοποιείται για να κατακερματιστεί σε μικρότερες δομές με τη βοήθεια κατάλληλων διεργασιών [12].

Και οι δύο αυτές τεχνικές μπορούν να πραγματοποιηθούν σε αέρια, υγρή ή υπερκρίσιμα υγρή, στερεή φάση, ακόμη και σε κενό αέρος. Οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση των νανοϋλικών και στις δύο αυτές προσεγγίσεις έχουν ως κύριο σκοπό, τον έλεγχο του μεγέθους, της σύνθεσης και του σχήματος του υλικού ή της δομής που κατασκευάζεται.

2.4.1 Τεχνική Bottom-Up

Η τεχνική Bottom-Up, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι η διαδικασία κατά την οποία από πολύ μικρές δομικές μονάδες, όπως είναι τα άτομα ή τα μόρια, κατασκευάζονται πολύπλοκες δομές με τη βοήθεια χημικών, συνήθως διαδικασιών. Ορισμένες από τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των νανοϋλικών είναι η επεξεργασία της κολλοειδούς γέλης (sol – gel processing), η χημική εναπόθεση ατμών (chemical vapour deposition, CVD), η ατομική ή μοριακή

συμπύκνωση, κ.τ.λ. Για τον έλεγχο του σχηματισμού και της ανάπτυξης των νανοσωματιδίων με την τεχνική Bottom-Up χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές μέθοδοι. Η πρώτη από αυτές τις μεθόδους αφορά είτε την εξάντληση ενός εκ των αντιδρώντων στοιχείων ή την εισαγωγή ενός χημικού στοιχείου το οποίο θα σταματήσει την περαιτέρω ανάπτυξη του σχηματιζόμενου υλικού. Η άλλη μέθοδος αφορά το φυσικό περιορισμό του όγκου ενός νανοσωματιδίου με τη χρήση διαφόρων περιγραμμάτων.

Η **τεχνική της κολλοειδούς γέλης (sol-gel)** είναι μία βιομηχανική διαδικασία η οποία περιλαμβάνει την παραγωγή πηκτωμάτων από ένα υγρό κολλοειδές διάλυμα. Τα κύρια πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνική αυτή για την παραγωγή των υλικών είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται κατά τη διαδικασία αυτή και η ικανότητα προσαρμογής της σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Επίσης, η διαδικασία αυτή επιτρέπει στους επιστήμονες να ελέγχουν με ευκολία το σχήμα του παραγόμενου νανοσωματιδίου καθώς επίσης τους δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης και άλλων υλικών εάν αυτό κριθεί απαραίτητο [13].

Η **τεχνική χημικής εναπόθεσης ατμών** είναι μία χημική διαδικασία που κύριο σκοπό έχει τη σύνθεση υλικών υψηλής καθαρότητας και επιδόσεων. Η χημική αυτή διαδικασία χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στη σύνθεση λεπτών υμενίων για την κατασκευή ημιαγωγών. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής ένα υπόστρωμα, που είναι και το αρχικό υλικό από το οποίο θα παραχθεί η ζητούμενη δομή, τοποθετείται σε ένα θάλαμο κενού. Η χημική διαδικασία πραγματοποιείται μεταξύ του υποστρώματος και κάποιου καταλύτη σε αέρια μορφή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να ενεργοποιηθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος ή με την εναπόθεση πλάσματος (σύνολο θετικών ιόντων και ηλεκτρονίων μέσα σε πλήθος ουδέτερων ατόμων) πάνω στο υπόστρωμα. Από αυτήν τη διαδικασία μπορεί να παραχθούν και άλλα υποπροϊόντα τα οποία και αφαιρούνται από το θάλαμο μέσω ροής αέρα. Υπάρχουν διάφορων ειδών τεχνικές εναπόθεσης ατμών [12], όπως είναι η χημική εναπόθεση ατμών ατμοσφαιρικής πίεσης, η χημική εναπόθεση ατμών χαμηλής πίεσης, η ατομικού στρώματος χημική εναπόθεση ατμών, κ.τ.λ.

Η **επιταξία μοριακών δεσμών (Molecular Beam Epitaxy, MBE)**, είναι και αυτή μία διαδικασία για τη σύνθεσης μίας νανοδομής, κατά την οποία το κύριο σώμα από το οποίο θα κατασκευαστεί η νανοδομή τοποθετείται μέσα σε ένα θάλαμο κενού. Στο θάλαμο κενού υπάρχουν και κάποιοι σωλήνες οι οποίοι περιέχουν χημικά στοιχεία που θα πρέπει να περιέχει η συγκεκριμένη νανοδομή. Οι σωλήνες αυτοί, στη συνέχεια,

θερμαίνονται με αποτέλεσμα τα χημικά στοιχεία να κατευθύνονται προς το κύριο σώμα της νανοδομής όπου και αλληλεπιδρούν με αυτή. Για να επιτευχθεί η ομοιομορφη εναπόθεση των χημικών στοιχείων πάνω στο κύριο σώμα της δομής, αυτό τοποθετείται σε ένα δίσκο ο οποίος περιστρέφεται καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

Μία διαδικασία σύνθεσης νανοϋλικών η οποία απαντάται και στη φύση είναι η κατασκευή νανοδομών με **αυτοδιάταξη** (self-assembly). Η αυτοδιάταξη είναι η διαδικασία κατά την οποία ορισμένα μόρια ενώνονται μεταξύ τους χωρίς την καθοδήγηση ή τον έλεγχο από κάποιον εξωτερικό παράγοντα. Κατά τη διαδικασία της αυτοδιάταξης ένα μεμονωμένο δομικό στοιχείο, άτομο ή μόριο, περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε να σχηματίσει μία δόμη η οποία θα αποτελείται από πολλά ίδια τέτοια στοιχεία. Η τελική δομή που σχηματίζεται περιλαμβάνει τόσο το σχήμα όσο και τις ιδιότητες των επιμέρους στοιχείων από τα οποία κατασκευάστηκε. Με τη διαδικασία της αυτοδιάταξης φαίνεται να σχηματίζονται δομές οι οποίες παρουσιάζουν λιγότερες κατασκευαστικές ατέλειες σε σχέση με τις υπόλοιπες κατασκευαστικές μεθόδους [12].

2.4.2 Τεχνική Top-Down

Η τεχνική Top-Down στον αντίποδα της τεχνικής Bottom-Up επιδιώκει τη σύνθεση νανοδομών από μεγαλύτερα σε μέγεθος υλικά τα οποία με τη βοήθεια εξωτερικών μηχανισμών κατακερματίζονται ώστε να αποκτήσουν τις επιθυμητές ιδιότητες και μέγεθος μίας νανοδομής. Ορισμένες από τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νανοϋλικών είναι η ιοντική λείανση, η λιθογραφία, κ.τ.λ. Οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε ένα περιβάλλον αδρανής ατμόσφαιρας ή στο κενό. Αμέσως μετά το τέλος των διαδικασιών αυτών οι δομές που κατασκευάζονται είναι ακόμη ενεργές με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα να σχηματίσουν συσσωματώματα. Για να τερματιστεί η διαδικασία αλληλεπίδρασης του κατασκευασμένου υλικού με το περιβάλλον ή με κάποιες χημικές ουσίες, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραγωγή του, η νανοδομή επικαλύπτεται με ένα ενεργό αέριο.

Η **λιθογραφία** (lithography) είναι μία χημική διαδικασία η οποία ανήκει στην κατηγορία της τεχνικής Top-Down και η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα στην κατασκευή νανοδομών. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας στο υπόστρωμα τοποθετείται ένα υμένιο το οποίο περιλαμβάνει τη χημική ένωση από την οποία θα προέλθει τελικά η νανοδομή. Πάνω από το υμένιο τοποθετείται ένα φωτοευαίσθητο

πολυμερές και μία μάσκα που διαθέτει διαφανή και αδιαφανή με την επιθυμητή δομή της νανοδομής. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια φωτός χαράσσεται το υμένιο, μόνο στις διαφανείς περιοχές της μάσκας ώστε να προκύψει το σχήμα της νανοδομής. Το πολυμερές χρησιμοποιείται για την προστασία του υμενίου. Για να απομακρυνθούν τα περιττά κομμάτια της διάταξης που δεν προστατεύονται από το πολυμερές χρησιμοποιείται οξύ. Η τελική νανοδομή προκύπτει αφού προστεθεί ακετόνη ώστε να διασπάσει και το φωτοευαίσθητο πολυμέρες που έχει απομείνει στη δομή. Υπάρχουν διάφορα είδη λιθογραφίας, όπως η λιθογραφία με ακτίνες X, η λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης, κ.τ.λ.

Μία ακόμη Top-Down τεχνική είναι η **ιοντική λείανση** (Ion milling). Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιείται ένα πλάσμα το οποίο αφαιρεί την κατάλληλη ποσότητα ενός υλικού, το οποίο διαθέτει τις επιθυμητές ιδιότητες για τη ζητούμενη νανοδομή, και την τοποθετεί πάνω σε ένα υπόστρωμα. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σε ένα θάλαμο κενού με το υπόστρωμα να είναι τοποθετημένο μέσα στο θάλαμο αλλά ηλεκτρικά απομονωμένο από αυτόν. Το πλάσμα σε αυτήν την περίπτωση δημιουργείται εξαιτίας του ιονισμού τα ατόμων του αερίου που βρίσκονται μέσα στο θάλαμο. Ο ιονισμός επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Με την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου τα θετικά ιόντα του πλάσματος συγκρούονται με την επιφάνεια του υποστρώματος ώστε να επιτευχθεί η εγχάραξή της.

2.5 Κατηγορίες νανοϋλικών

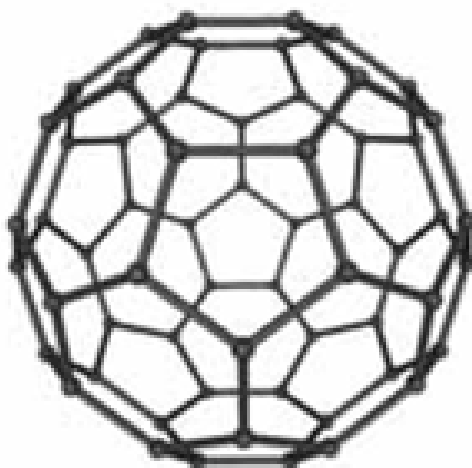
Ο όρος *νανοϋλικό* αναφέρεται σε ένα φυσικό, περιστασιακό ή μεταποιημένο υλικό στο οποίο περιέχονται σωματίδια είτε σε μη δεσμευμένη μορφή είτε ως σύμπυγμα ή συσσωμάτωμα. Το 50% τουλάχιστον των σωματιδίων που περιέχονται σε ένα νανοϋλικό έχουν μία ή περισσότερες διαστάσεις σε κλίμακα μεγέθους 1 nm – 100 nm [14]. Όλα τα υλικά που υπάρχουν στο μακρόκοσμο, όπως είναι τα μεταλλικά, τα ημιαγώγιμα, τα κεραμικά ή τα πολυμερή, μπορούν να κατασκευαστούν και στη νανομετρική κλίμακα. Το φάσμα των νανοϋλικών εκτείνεται από οργανικά ή ανόργανα, κρυσταλλικά ή άμορφα σωματίδια μέχρι και την τάξη των φουλερενίων (σφαιρικά και ελλειψοειδή νανοϋλικά άνθρακα) και των παραγωγών τους. Ακόμη, στο πεδίο των νανοϋλικών ανήκουν και υπερομοριακές δομές, όπως είναι τα δενδριμερή, τα μικύλλια και τα λιποσώματα. Έχουν παρουσιαστεί διαφορετικές προσεγγίσεις ταξινόμησης των νανοϋλικών, οι οποίες στηρίζονται σε κάποιο χαρακτηριστικό γνώρισμα που

παρουσιάζουν αυτά. Συνήθως, για την ταξινόμηση των νανοϋλικών χρησιμοποιούνται γνωρίσματα, όπως οι διαστάσεις τους, η χημική σύνθεσή τους, η διαδικασία παράγωγής τους, τα πεδία εφαρμογής τους, κ.τ.λ. Οι νανοδομές μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις γενικούς τύπους [13], τα νανοσωματίδια, τα νανοκαλώδια και οι νανοσωλήνες, τα νανοστρώματα και οι νανοπόροι.

2.5.1 Νανοσωματίδια

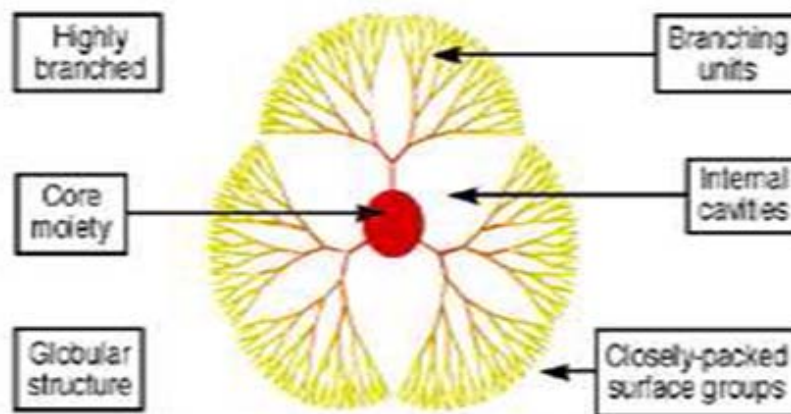
Τα νανοσωματίδια αποτελούνται από δεκάδες ή εκατοντάδες άτομα ή μόρια και διαθέτουν μεγάλη ποικιλία όσον αφορά το σχήμα και τη μορφολογία τους. Τα νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται ήδη σε εμπορικές εφαρμογές, με τη μορφή ξηρής σκόνης ή υγρών αιωρημάτων. Η χρήση νανοσωματιδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή περιβλημάτων, συστατικών ή συσκευών οι οποίες μπορεί να διατηρούν τη δομή των νανοϋλικών από τα οποία κατασκευάστηκαν. Ένας ακόμη τύπος νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται σε εμπορικές εφαρμογές είναι οι νανοσκόνες μεταλλικών ή οξειδίων του σιδήρου, οι σύνθετοι ημιαγωγοί, τα μέταλλα και τα κράμματα αυτών.

Εκτός από τα παραπάνω υλικά, τα οποία συναντώνται και στο μακροκόσμο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας παίζουν και ορισμένα μόρια όπως είναι τα φουλερένια και τα δενδριμερή. Με την ονομασία **φουλερένια** αναφέρονται τα σφαιρικά και ελλειψοειδή νανοϋλικά άνθρακα [15]. Τα φουλερένια είναι κοίλες, κλειστές, αρωματικές ενώσεις, οι οποίες αποτελούνται από άρτιο αριθμό ατομών άνθρακα. Ο αριθμός των ατόμων άνθρακα που συναντώνται σε αυτά τα σωματίδια ποικίλλει (από 32 έως 600), ενώ η στερεοδιάταξή τους στο χώρο είναι τέτοια ώστε να σχηματίζουν πενταγωνικές ή εξαγωνικές έδρες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ενδοεδρικά φουλερένια, στο εσωτερικό των οποίων έχουν τοποθετηθεί άτομα ή μόρια (π.χ., μεταλλοφουλερένια) και τα υδατοδιαλυτά φουλερένια, τα οποία με τη βοήθεια πολικών ομάδων που είναι τοποθετημένες στην εξωτερική επιφάνεια τους μειώνουν τον υδρόφοβο χαρακτήρα τους.



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση ενός φουλερένιου που αποτελείται από 60 άτομα άνθρακα (C_{60}) [15].

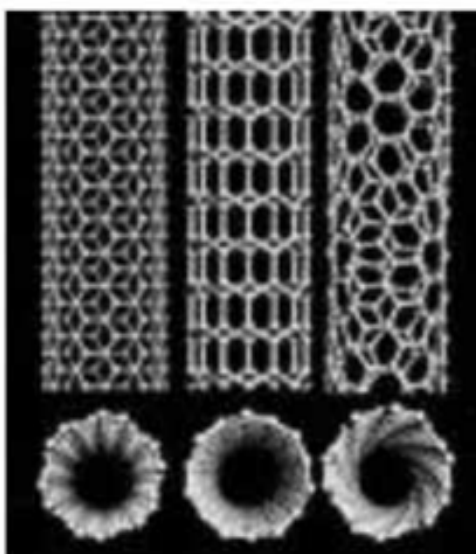
Τα **δενδριμέρη** (dendrimers) είναι μία κατηγορία συνθετικών μακρομορίων που βρίσκουν κυρίως εφαρμογή στη νανοϊατρική. Τα δενδριμερή παρουσιάζουν υψηλή λειτουργικότητα και αποτελούνται από διακλαδισμένες δομικές μονάδες. Ακόμη, περιέχουν εσωτερικές κοιλότητες με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης και άλλων μορίων μέσα σε αυτά. Ένα τυπικό δενδριμερές μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα σφαιρικό μόριο νανοκλίμακας με τρεις κύριες περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι ο κεντρικός πυρήνας του δενδριμερούς, ο οποίος μπορεί να είναι είτε ένα μόνο άτομο ή και μία ομάδα ατόμων. Τη δεύτερη περιοχή του δενδριμερούς απαρτίζουν οι διακλαδώσεις του οι οποίες ξεκινούν από τον πυρήνα του μορίου και καταλήγουν στο εξωτερικό του μακρομορίου. Οι διακλαδώσεις των δενδριμέρων αναπτύσσονται ακτινωτά και αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες. Η τρίτη περιοχή του δενδριμερούς είναι οι τερματικές λειτουργικές μονάδες που βρίσκονται στο εξωτερικό αυτού του μακρομορίου [16].



Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού δενδριμερούς με τις διακριτές περιοχές του [16].

2.5.2 Νανοκαλώδια και νανοσωλήνες

Τα νανοκαλώδια και οι νανοσωλήνες είναι γραμμικές νανοδομές, οι οποίες μπορούν να παραχθούν από διαφορετικά είδη υλικών (π.χ., μεταλλικά, ημιαγώγιμα υλικά και υλικά από άνθρακα). Η πιο σημαντική κατηγορία αυτών των γραμμικών νανοδομών είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα. Οι **νανοσωλήνες άνθρακα** χρησιμοποιούνται ευρύτατα στο τομέα της νανοηλεκτρονικής για την αποθήκευση δεδομένων όπως επίσης και ως πηγές ψυχρών ηλεκτρονίων σε ενισχυτές μικροκυμάτων και σε επίπεδες οθόνες απεικόνισης. Μία ακόμη εφαρμογή των νανοσωλήνων άνθρακα είναι η χρήση τους ως υλικά πλήρωσης (fillers) των νανوسύνθετων υλικών για την παραγωγή υλικών με εξαιρετικές ιδιότητες.



Σχήμα 2.6: Διάφοροι τύποι νανοσωλήνων άνθρακα [15].

2.5.3 Νανοστρώματα

Τα νανοστρώματα ή νανοεπίπεδα είναι ένας σημαντικός κλάδος μελέτης της νανοτεχνολογίας. Η επεξεργασία αυτών των στρωμάτων με τη βοήθεια της νανομηχανικής οδηγεί στην ανάπτυξη καινούργιων λειτουργικών χαρακτηριστικών και φυσικών ιδιοτήτων ενός υλικού. Επίσης, η σχεδίαση στρωμάτων και επιφανειών στη νανομετρική κλίμακα κρίνεται συχνά απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση των διεπιφανείων μεταξύ διαφορετικών υλικών και την εξασφάλιση των επιθυμητών ιδιοτήτων τους. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη σχεδίαση αυτών των επιφανειών μπορεί να αποκτηθούν μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές, βιολογικές, ηλεκτρονικές, μαγνητικές και οπτικές ιδιότητες ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το συγκεκριμένο υλικό.

2.5.4 Νανοπόροι

Οι νανοπόροι χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε βιομηχανικές εφαρμογές καθώς παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες, που αφορούν τη θερμική μόνωση και την ελεγχόμενη διαδικασία διαχωρισμού και απελευθέρωσης του υλικού. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως υλικά πλήρωσης για χημικές εφαρμογές των νανοϋλικών. Ένα ευρύ φάσμα πιθανών εφαρμογών των υλικών αυτών περιλαμβάνει την κατάλυση, τη θερμική μόνωση, την παραγωγή περιβαλλοντικών φίλτρων και μεμβρανών και την κατασκευή φορέων φαρμάκου ελεγχόμενης αποδέσμευσης [13].

Κεφάλαιο 3

3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

3.1 Νανοηλεκτρονική

Ο όρος **νανοηλεκτρονική** αναφέρεται στον τομέα εκείνο της νανοτεχνολογίας, που ασχολείται με την ανάπτυξη ηλεκτρονικών συσκευών, των οποίων οι διαστάσεις κυμαίνονται από τη νανομετρική κλίμακα μέχρι και τη μοριακή ή ατομική κλίμακα [17]. Η νανοηλεκτρονική θεωρείται ο διάδοχος της μικροηλεκτρονικής, ο οποίος συνδυάζει τις μεθόδους παραγωγής νανοδομών με τους επιστημονικούς τομείς της φυσικής, της χημείας, της επιστήμης των υλικών και της ηλεκτρονικής, με σκοπό την ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αλλά και μεμονομένων ηλεκτρονικών στοιχείων. Πιο αναλυτικά, οι ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της μικροηλεκτρονικής οδήγησαν στη μείωση του κόστους παραγωγής και του μεγέθους των ηλεκτρονικών στοιχείων και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αυξάνοντας αντίστοιχα το βαθμό απόδοσης των ηλεκτρονικών αυτών στοιχείων (νόμος του Moore). Η ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής δε θα μπορούσε, όμως, να συνεχιστεί επ' αόριστον καθώς παρουσιάστηκαν κάποιοι βασικοί περιορισμοί τόσο όσον αφορά στο κόστος της παραγωγικής διαδικασίας όσο και στο μικρότερο δυνατό μέγεθος των μικροηλεκτρονικών στοιχείων, τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν και να λειτουργούν αποτελεσματικά. Για το λόγο αυτό προέκυψε η ανάγκη εξεύρεσης ενός νέου τρόπου κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και ηλεκτρονικών στοιχείων στη νανομετρική κλίμακα.

Η νανοηλεκτρονική στοχεύει στην κατασκευή μικρότερων και γρηγορότερων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και στη δημιουργία νέων ηλεκτρονικών στοιχείων, τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας του ανθρώπου, όπως είναι η γρηγορότερη επικοινωνία, η δημιουργία ισχυρών συστημάτων αποθήκευσης πληροφορίας, η χρήση όσο το δυνατόν μικρότερων σε μέγεθος υπολογιστικών συστημάτων, η ανάπτυξη συστημάτων έξυπνων αισθητήρων, κ.τ.λ. Στη νανοηλεκτρονική χρησιμοποιούνται δύο πιθανές προσεγγίσεις όσον αφορά τον τρόπο κατασκευής των επιθυμητών νανοδομών, η προσέγγιση «από κάτω προς τα πάνω»

(“bottom up approach”) και η προσέγγιση «από πάνω προς τα κάτω» (“top down approach”), οι οποίες έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Το βασικό στοιχείο κάθε νανοηλεκτρονικού κυκλώματος είναι οι συσκευές και τα ηλεκτρονικά στοιχεία που το αποτελούν. Για τα συνηθισμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα αυτά τα στοιχεία είναι κυρίως τα τρανζίστορ από πυρίτιο καθώς επίσης και τα καλώδια χαλκού, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των κυκλωμάτων αυτών. Στα νανοηλεκτρονικά κυκλώματα τα καλώδια από χαλκό αντικαθίστώνται είτε με νανοσωλήνες άνθρακα ή νανοκαλώδια. Στην παρούσα εργασία αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες από τις νανοηλεκτρονικές διατάξεις που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα. Οι συσκευές αυτές μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες [18]. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις συσκευές στερεάς κατάστασης (solid-state quantum effect), ενώ η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις μοριακές ηλεκτρονικές συσκευές. Η αρχή λειτουργίας των νανοηλεκτρονικών διατάξεων στηρίζεται κατά κύριο λόγο στα κβαντικά φαινόμενα, τα οποία εμφανίζονται όταν οι συσκευές κατασκευάζονται ώστε να λειτουργούν στη νανομετρική κλίμακα.

3.1.1 Συσκευές στερεάς κατάστασης

Τα παραδοσιακά ηλεκτρονικά στοιχεία (π.χ. τρανζίστορ), τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων φαίνεται να παρουσιάζουν ορισμένα προβλήματα κατά τη χρήση τους (π.χ. ανάπτυξη υψηλών ηλεκτρικών πεδίων, υψηλή διάχυση της θερμότητας στα τρανζίστορ, κ.τ.λ.) [19]. Εξέλιξη των ηλεκτρονικών αυτών στοιχείων αποτελούν οι συσκευές στερεάς κατάστασης (solid-state quantum effect), η λειτουργία των οποίων στηρίζεται στα κβαντικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στη νανομετρική κλίμακα.

Το βασικό δομικό στοιχείο των συσκευών αυτής της κατηγορίας είναι μία μικρή νησίδα, η οποία κατασκευάζεται συνήθως από ένα ημιαγώγιμο ή μεταλικό υλικό. Ο ρόλος της νησίδας αυτής είναι ανάλογος με αυτόν του καναλιού σε ένα παραδοσιακό τρανζίστορ. Η νησίδα αυτή επιτρέπει την ελεγχόμενη μεταφορά των ηλεκτρονίων από και προς αυτή. Οι νανοηλεκτρονικές συσκευές αποτελούνται ακόμη από μία πηγή και μία υποδοχή. Για τη λειτουργία των νανοηλεκτρονικών αυτών συσκευών μία τάση πόλωσης εφαρμόζεται κατά μήκος της νησίδας και ελεύθερα ηλεκτρόνια μετακινούνται από τη ζώνη αγωγιμότητας της πηγής προς την περιοχή της υποδοχής, η οποία

βρίσκεται σε χαμηλότερο δυναμικό. Η μετακίνηση των ηλεκτρονίων επιτυγχάνεται διαμέσου της νησίδας.

Το μέγεθος, η σύνθεση και το σχήμα της νησίδας είναι τα χαρακτηριστικά, τα οποία είναι υπεύθυνα για την κατασκευή διαφορετικών τύπων νανοηλεκτρονικών δομών. Οι νανοηλεκτρονικές συσκευές στερεάς κατάστασης μπορούν να χωριστούν σε τρεις επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος του περιορισμού της ροής των ηλεκτρονίων στη νησίδα [19]. Η πρώτη κατηγορία είναι οι κβαντικές τελείες (quantum dots), στις οποίες τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν από και προς τη νησίδα με μηδέν κλασικούς βαθμούς ελευθερίας. Τη δεύτερη κατηγορία απαρτίζουν οι συσκευές συντονισμού σήραγγας (resonant tunneling devices), στις οποίες η ροή των ηλεκτρονίων από και προς τη νησίδα διαθέτει έναν ή δύο κλασικούς βαθμούς ελευθερίας. Η τελευταία κατηγορία συσκευών στερεάς κατάστασης είναι οι συσκευές μονού ηλεκτρονίου (single-electron). Κυριότερος εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής είναι τα τρανζίστορ μονού ηλεκτρονίου (single-electron transistor), στα οποία τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν από και προς τη νησίδα με τρεις κλασικούς βαθμούς ελευθερίας.

Οι **κβαντικές τελείες** είναι ημιαγώγιμες νανοδομές με σφαιρικό συνήθως σχήμα. Το κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα των κβαντικών τελειών είναι ότι η κίνηση των ηλεκτρονίων από και προς τη νησίδα περιορίζεται και στις τρεις χωρικές κατευθύνσεις. Οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από 1 – 100 nm. Οι κβαντικές τελείες μπορεί να περιλαμβάνουν από ένα ηλεκτρόνιο έως μία ομάδα από χιλιάδες ηλεκτρόνια. Το μέγεθος, το σχήμα και ο αριθμός των ηλεκτρονίων σε μία κβαντική τελεία μπορούν να ελεγχθούν με εξαιρετική ακρίβεια, γεγονός που επιτρέπει στους επιστήμονες να ελέγχουν τις αγώγιμες ιδιότητες των νανοδομών αυτών. Οι κβαντικές τελείες βρίσκουν αρκετές εφαρμογές στον τομέα της νανοηλεκτρονικής. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία ημιαγωγών, τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή λέιζερ και φωτοανιχνευτών. Επίσης, εξαιτίας των εξαιρετικών οπτικών ιδιοτήτων που διαθέτουν χρησιμοποιούνται σε οπτικές και οπτοηλεκτρονικές συσκευές. Οι κβαντικές τελείες μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν στην κβαντική πληροφορική και στην αποθήκευση πληροφοριών [20].

Οι **συσκευές συντονισμού σήραγγας** κατασκευάζονται συνήθως από στρώματα δύο διαφορετικών ημιαγώγιμων κραμάτων. Ο πιο απλός τύπος των συσκευών συντονισμού σήραγγας είναι η δίοδος συντονισμού σήραγγας (Resonant Tunneling

Diode, RTD). Η νησίδα σε μία δίοδο συντονισμού σήραγγας κατασκευάζεται με την τοποθέτηση δύο μονωτικών φραγμάτων σε έναν ημιαγωγό. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζεται ένα «πηγάδι» μέσα στο οποίο κινούνται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Το πλάτος των νησίδων φτάνει περίπου στα 10 nm. Η αρχή λειτουργίας της δίοδου συντονισμού σήραγγας είναι απλή. Αρχικά, εφαρμόζεται μία τάση πόλωσης στην περιοχή της νησίδας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας της πηγής προς την υποδοχή διαμέσου της νησίδας. Για να επιτευχθεί η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων θα πρέπει οι ενεργειακές στάθμες στην περιοχή της νησίδας να είναι παρόμοιες με αυτές της πηγής και της υποδοχής. Μία ακόμη διαδεδομένη συσκευή συντονισμού σήραγγας είναι το τρανζίστορ συντονισμού σήραγγας (Resonant Tunneling Transistor, RTT), το οποίο διαθέτει μία επιπλέον υποδοχή από αυτές της δίοδου συντονισμού σήραγγας, που καλείται πύλη. Το τρανζίστορ συντονισμού σήραγγας λειτουργεί παρόμοια με το συμβατικό τρανζίστορ επίδρασης πεδίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν διακόπτης ή σαν ενισχυτής στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι συσκευές συντονισμού σήραγγας έναντι των συμβατικών δομών που απαρτίζουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ότι δε διαθέτουν μόνο δύο πιθανές λογικές καταστάσεις (την κατάσταση “on” και την κατάσταση “off”). Αυτό συμβαίνει επειδή, το ενεργειακό «πηγάδι» που εμφανίζεται στην περιοχή της νησίδας διαθέτει πολλαπλές πιθανές ενεργειακές στάθμες μετάβασης των ηλεκτρονίων [18].

Οι **συσκευές μονού ηλεκτρονίου** είναι μία πολλά υποσχόμενη κατηγορία νανοηλεκτρικών συσκευών, καθώς το μέγεθος τους είναι πολύ μικρό και ακόμη μπορούν να ελέγχουν την κίνηση κάθε ηλεκτρονίου ξεχωριστά. Η χρήση των συσκευών μονού ηλεκτρονίου ως δομικά στοιχεία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μπορεί να προσφέρει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και πιο αποδοτική λειτουργία των κυκλωμάτων αυτών [21]. Ο κυριότερος εκπρόσωπος αυτής της κατηγορίας συσκευών, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι τα τρανζίστορ μονού ηλεκτρονίου. Η δομή των τρανζίστορ μονού ηλεκτρονίου είναι παρόμοια με αυτή των τρανζίστορ επίδρασης πεδίου. Η νησίδα σε ένα τρανζίστορ μονού ηλεκτρονίου αποτελείται από μία ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων, ο αριθμός των οποίων μπορεί να φτάσει και το ένα εκατομμύριο. Οι δυνάμεις Coulomb που αναπτύσσονται ανάμεσα στα ελεύθερα ηλεκτρόνια της νησίδας εμποδίζουν την ανάπτυξη του φαινομένου σήραγγας όταν η τάση πόλωσης είναι χαμηλή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «αποκλεισμός Coulomb» [22]. Η πύλη σε ένα τρανζίστορ μονού ηλεκτρονίου χρησιμεύει στον έλεγχο του

αριθμού των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη νησίδα. Καθώς αυξάνεται η τάση που εφαρμόζεται στην πύλη ένα μόνο ηλεκτρόνιο περνάει από την πηγή στην υποδοχή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.

3.1.2 Μοριακές ηλεκτρονικές συσκευές

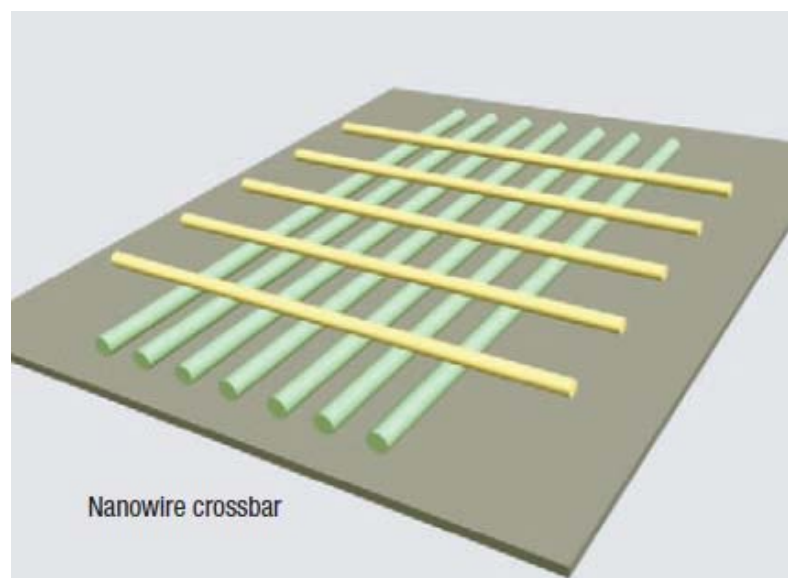
Η μοριακή ηλεκτρονική είναι ο νεότερος κλάδος της νανοηλεκτρονικής και περιλαμβάνει την ανάπτυξη δομών οι οποίες έχουν παρόμοιες ιδιότητες και μέγεθος με αυτές των μορίων. Το μέγεθος ενός μορίου κυμαίνεται από 0.2 έως 20 nm, οπότε γίνεται εύκολα κατανοητό ότι οι μοριακές ηλεκτρονικές συσκευές θα έχουν τουλάχιστον μία διάσταση σε αυτήν την κλίμακα. Εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους τους τα μόρια διαθέτουν κβαντισμένες ενεργειακές στάθμες και ενεργειακά κενά με μεγάλο φάσμα ενεργειών. Ο έλεγχος των ενεργειακών αυτών κενών κατά την ανάπτυξη μίας δομής σε μοριακό επίπεδο οδηγεί στην κατασκευή συσκευών οι οποίες διαθέτουν συγκεκριμένη ηλεκτρονική κατανομή φόρτισης. Η μοριακή ηλεκτρονική βρίσκει εφαρμογές στην κατασκευή μοριακών αγωγών, ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, διόδων εκπομπής φωτός, κ.τ.λ.

Οι **μοριακοί αγωγοί** είναι δομές που έχουν αναπτυχθεί σε μοριακό επίπεδο με σκοπό τη διασύνδεση των ηλεκτρονικών στοιχείων ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος. Οι μοριακοί αγωγοί, όπως και οι συμβατικοί αγωγοί είναι δομές οι οποίες άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι μοριακοί αγωγοί αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες, οι οποίες μπορεί να είναι είτε οργανικές είτε ανόργανες. Η λειτουργία των μοριακών αγωγών εξαρτάται από την ικανότητά τους να σχηματίζουν αξιόπιστες συνδέσεις μεταξύ τους, αλλά και με τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, τα οποία μπορεί να κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά. Μία ακόμη χρήση των μοριακών καλωδίων είναι η εισαγωγή τους μέσα σε ένα πολυμερές υλικό έτσι ώστε να ενισχυθούν οι αγωγιμες και οι μηχανικές ιδιότητές του [23].

Μία ακόμη σημαντική εφαρμογή της μοριακής ηλεκτρονικής είναι η ανάπτυξη μοριακών τρανζίστορ. Ένα **μοριακό τρανζίστορ** αποτελείται είτε από ένα μόνο μόριο είτε από μία ομάδα μορίων, τα οποία συνδέονται με τη βοήθεια δύο ηλεκτροδίων, της πηγής και της υποδοχής. Ακόμη, το μοριακό τρανζίστορ διαθέτει ακόμη ένα ηλεκτρόδιο, το οποίο καλείται πύλη. Τα μοριακά τρανζίστορ που αποτελούνται από ένα μόνο μόριο έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του αποκλεισμού Coulomb. Η

περαιτέρω ανάπτυξη των μοριακών τρανζίστορ μπορεί να οδηγήσει στη χρήση τους σε ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα [24].

Μία σημαντική δομή κυκλώματος, η οποία χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές της μοριακής ηλεκτρονικής είναι η **διασταυρούμενη ράβδος** (crossbar) [25]. Η μοριακή αυτή δομή αποτελείται από μεμονωμένες μοριακές συσκευές, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με τη βοήθεια διακλαδούμενων καλωδίων. Η δομή αυτή παρουσιάζει σημαντική ευελιξία και είναι ιδιαίτερα ανεκτική στα τυχόν κατασκευαστικά ελαττώματα που μπορεί να εμφανιστούν. Η δομή αυτή χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στην κατασκευή λογικών κυκλωμάτων και κυκλωμάτων μνήμης. Μελλοντικά, μελετάται η δυνατότητα ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου υπολογιστικού συστήματος το οποίο θα αποτελείται από πολλές τέτοιες διασυνδεμένες δομές.



Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση μίας μνήμης με τη δομή της διασταυρούμενης ράβδου [25].

Ένας σημαντικός τομέας μελέτης της μοριακής ηλεκτρονικής είναι η **μοριακή οπτοηλεκτρονική**. Η μοριακή οπτοηλεκτρονική μελετά τον τρόπο μετάδοσης των ηλεκτρικών και οπτικών σημάτων στο μοριακό επίπεδο. Η πιο σημαντική εφαρμογή στον τομέα αυτόν είναι οι **μοριακές δίοδοι εκπομπής φωτός** (light-emitting diode, LED). Η λειτουργία των μοριακών δίοδων εκπομπής φωτός είναι παρόμοια με αυτή των συμβατικών δίοδων. Κατά αντιστοιχία, λοιπόν, με τις συμβατικές δίοδους εκπομπής φωτός, τα ηλεκτρόνια και οι οπές σε ένα μοριακό LED εισάγονται από την κάθοδο και την άνοδο αντίστοιχα. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια και οι οπές διαχέονται μαζί και ενώνονται στο μοριακό κέντρο εκπομπής. Η ένωση των ηλεκτρονίων και των

οπών προκαλεί τη δημιουργία ενός ηλεκτρονικού ρεύματος, το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραγωγή του οπτικού σήματος. Τα κύρια χαρακτηριστικά των μοριακών διόδων εκπομπής φωτός είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (ορατό και κοντά στο υπεριώδες) και ότι οι εξωτερικές κβαντικές αποδόσεις τους φτάνουν το 4% [23], με αποτέλεσμα να είναι ικανά να χρησιμοποιηθούν για το φωτισμό ακόμη και ενός δωματίου.

3.2 Η Νανοτεχνολογία στην Ιατρική

Ένας σημαντικός κλάδος της νανοτεχνολογίας είναι η νανοϊατρική. Η συνεχής ανάπτυξη των τεχνολογιών και των υλικών στη νανοκλίμακα οδηγεί στην παραγωγή δομών, οι οποίες σκοπεύουν να βελτιώσουν σε μεγάλο βαθμό τις διαδικασίες διάγνωσης και θεραπείας των ασθενειών. Ακόμη, έχουν αναπτυχθεί νανοσυσκευές οι οποίες καταγράφουν και απεικονίζουν με ακρίβεια τις βιολογικές λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού.

Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια συγκεκριμένων νανοσωματιδίων είναι δυνατή η διάγνωση των ασθενειών σε κυτταρικό επίπεδο. Τα νανοσωματίδια μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως απεικονιστικά μέσα για τον έλεγχο των βιολογικών λειτουργιών του ανθρώπου και να μεταφέρουν θεραπευτικές ουσίες όποτε αυτό κριθεί απαραίτητο. Σημαντική είναι και η μελέτη της νανοτεχνολογίας προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης χειρουργικών εργαλείων και ρομποτικών συστημάτων, τα οποία θα ελαχιστοποιήσουν τους κινδύνους που προκύπτουν κατά τη διάρκεια μίας ιατρικής διαδικασίας. Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται νανοϋλικά και νανοδομές που χρησιμοποιούνται στη διαγνωστική και στη θεραπευτική ιατρική καθώς και στη νανοχειρουργική.

3.2.1 Διαγνωστική Ιατρική

Η διαγνωστική ιατρική είναι εκείνος ο τομέας ο οποίος ασχολείται με την έγκυρη και έγκαιρη διάγνωση των ασθενειών. Η ανάπτυξη στον τομέα αυτό αφορά την κατασκευή διαγνωστικών εργαλείων, τα οποία είναι πολύ μικρά σε μέγεθος και τα οποία παρέχουν στο ιατρικό προσωπικό ακριβή βιολογικά δεδομένα μέσα από μία απλή εξέταση. Έχουν αναπτυχθεί δύο μεγάλες κατηγορίες νανοδομών που αφορούν τη διαγνωστική ιατρική. Αυτές είναι οι βιοαισθητήρες και οι συσκευές μοριακής απεικόνισης [26].

Η πρώτη κατηγορία νανοδομών που αναπτύχθηκε στη νανοϊατρική είναι οι **βιοαισθητήρες**. Οι βιοαισθητήρες είναι ουσιαστικά συσκευές καταγραφής των βιολογικών αντιδράσεων του ανθρώπινου οργανισμού. Οι βιοαισθητήρες χρησιμοποιούν ένα στοιχείο, το βιοδέκτη, ο οποίος αλληλεπιδρά με την επιθυμητή αναλύσιμη βιολογική ουσία. Η αλληλεπίδραση αυτή προκαλεί μία βιολογική απόκριση η οποία καταγράφεται από τους αισθητήρες και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ένα ανιχνεύσιμο από το ιατρικό προσωπικό σήμα. Οι βιοαισθητήρες θεωρούνται αρκετά ασφαλείς συσκευές, αφού χρησιμοποιούνται κυρίως για την *in vitro* ανάλυση των βιολογικών παραμέτρων του ασθενούς χωρίς να απαιτείται κάποια επεμβατική μέθοδος για τη διεξαγωγή αυτών των διαδικασιών.

Η **μοριακή απεικόνιση** χρησιμοποιείται για τη διάγνωση ασθενειών σε μοριακό επίπεδο, πριν ακόμη από την εκδήλωση των κλινικών συμπτωμάτων της. Αυτή η μέθοδος απεικόνισης παίζει σημαντικό ρόλο στη διάγνωση και στην αποτελεσματική καταπολέμηση των καρκινικών κυττάρων. Κατά τη μοριακή απεικόνιση, ένα νανοσωματίδιο στοχεύει τα αισθητήρια όργανα ή τους συνδέτες, οι οποίοι μπορεί να εμφανίσουν κάποια παθολογία. Τα νανοσωματίδια, διαθέτουν την ικανότητα να στοχεύουν μόνο τους κατεστρεμμένους ιστούς με αποτέλεσμα να γίνεται εφικτή η διάγνωση της ασθένειας σε πολύ πρώιμο στάδιο.

3.2.2 Θεραπευτική Ιατρική

Σημαντικές εξελίξεις έχουν διαδραματιστεί από την πλευρά της νανοτεχνολογίας και στον τομέα της θεραπευτικής ιατρικής. Οι εξελίξεις αυτές αφορούν κυρίως την παραγωγή νανοσωματιδίων και νανοδομών, οι οποίες βοηθούν στην επιλεκτική μεταφορά διαφόρων φαρμακευτικών ουσιών στους ιστούς και στα όργανα τα οποία εμφανίζουν κάποια παθολογία και στην ελεγχόμενη αποδέσμευση των ουσιών αυτών στα κύτταρα για την αποτελεσματικότερη θεραπεία των ασθενειών αυτών. Η μέλετη γύρω από τον τομέα της επιλεκτικής μεταφοράς και της ελεγχόμενης αποδέσμευσης των φαρμάκων στα κύτταρα του ανθρώπινου οργανισμού είναι σε αρχικό στάδιο, παρουσιάζει, όμως σημαντικές προοπτικές για μελλοντικές εφαρμογές [26]. Οι φαρμακευτικές ουσίες μπορούν να εισαχθούν στο ανθρώπινο σώμα είτε διαμέσου της στοματικής κοιλότητας ή με τη βοήθεια εμφυτευμάτων. Η συνεχής μελέτη των νανοϋλικών οδηγεί στην κατασκευή ολοένα και πιο εξελιγμένων υλικών στη νανοκλίμακα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως νανομεταφορείς για την

αποτελεσματική χορήγηση φαρμάκων [27]. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι νανομεταφορείς έναντι των υπολοίπων μεταφορέων φαρμάκων είναι το μικρό τους μέγεθος, η αυξημένη διαλυτότητά τους, η ικανότητα που διαθέτουν να χορηγούνται σε συγκεκριμένους στόχους και η αποδέσμευση των ουσιών που μεταφέρουν να είναι ελεγχόμενη και εκτός από φαρμακευτικές ουσίες οι μεταφορείς αυτοί μπορούν να μεταφέρουν μικρομόρια, όπως είναι οι πρωτεΐνες, τα νουκλεϊκά οξέα, κ.τ.λ. Οι σημαντικότερες απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν οι νανομεταφορείς είναι να μην είναι τοξικοί, να παρουσιάζουν ανοσογονικότητα και να είναι σε θέση να απελευθερώνουν επαρκείς ποσότητες φαρμακευτικών ουσιών και μικρομορίων. Ένα παράδειγμα, νανομεταφορέων φαρμάκων είναι τα βιοδιασπώμενα και τα μεταλλικά νανοσωματίδια.

3.2.3 Νανοχειρουργική

Η κατασκευή χειρουργικών εργαλείων στη νανομετρική κλίμακα θα βοηθήσει στην περαιτέρω ανάπτυξη των ελάχιστα επεμβατικών ιατρικών διαδικασιών, που κύριο σκοπό έχουν την ελαχιστοποίηση των επιπλοκών κατά τη διάρκεια μίας ιατρικής διαδικασίας. Έχουν αναπτυχθεί χειρουργικά εργαλεία τα οποία βοηθούν στον εντοπισμό, τη μεταφορά και τις αλληλεπιδράσεις των μορίων στα κύτταρα του ανθρώπινου οργανισμού. Ένα παράδειγμα, τέτοιων νανοχειρουργικών εργαλείων είναι οι μαγνητικές λαβίδες [28], οι οποίες χρησιμοποιούνται στη μελέτη της συμπεριφοράς των εξατομικευμένων μικρομορίων και στην τοποθέτηση μαγνητικών νανοανιχνευτών στα ζωντανά κύτταρα. Επίσης, οι οπτικές λαβίδες, η λειτουργία των οποίων περιγράφηκε στο 2^ο κεφάλαιο της εργασίας, χρησιμοποιούνται στο διαχωρισμό των κακοηθών κυττάρων από τα υγιή και στην ταξινόμηση των κυττάρων με τη βοήθεια της φθορίζουσας κυτταρομετρίας ροής [29].

3.2.4 Άλλες εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στην Ιατρική

Η νανοτεχνολογία βρίσκει εφαρμογή σε αρκετούς τομείς της Ιατρικής. Οι εφαρμογές της νανοτεχνολογίας μπορούν να προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα στην αναδόμηση και αντικατάσταση των ιστών καθώς και στην καρδιολογία. Με τη βοήθεια των νανοϊνών επιτυγχάνεται η αναδόμηση και η αντικατάσταση των κατεστραμμένων ιστών. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των νανοϊνών είναι τα φυσικά και τα συνθετικά πολυμερή υλικά. Το βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν αυτά τα υλικά έναντι των υπολοίπων νανοϋλικών είναι η ομοιότητα και πολύ συχνά η

ταυτοποίησή τους με τα μακρομόρια που συναντούνται στον ανθρώπινο οργανισμό. Τα φυσικά πολυμερή υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χονδροκυττάρων και ιστών, ενώ τα συνθετικά πολυμερή χρησιμοποιούνται κυρίως στο σχεδιασμό αγγείων του αίματος, και στην παραγωγή οδοντικών και ορθοπεδικών εμφυτευμάτων. Επίσης, η νανοτεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί στη διάγνωση και στη θεραπεία διαφόρων καρδιαγγειακών ασθενειών. Με τη χρήση βιοαισθητήρων μπορούν να ανιχνευθούν πολλά γονίδια τα οποία σχετίζονται με τη στεφανιαία νόσο. Επίσης, η χρήση νανοσωματιδίων κατά την αγγειοπλαστική με μπαλονάκι μπορεί να διασφαλίσει ότι οι φαρμακευτικές ουσίες, οι οποίες είναι απαραίτητες κατά της επαναστένωσης θα χορηγηθούν στον ασθενή την κατάλληλη στιγμή ώστε να μην υπάρχουν πιθανές αλλοιώσεις.

3.3 Ενεργειακές εφαρμογές της νανοτεχνολογίας

Οι συνεχείς εξελίξεις στον τομέα της νανοτεχνολογίας, η οποία δίνει τη δυνατότητα στους επιστήμονες να κατασκευάζουν συνεχώς καινούργιες δομές και υλικά στο επίπεδο της νανοκλίμακας, αυξάνουν ολοένα και περισσότερο τα πεδία εφαρμογής της. Δύο από τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογής των προϊόντων της νανοτεχνολογίας είναι οι τομείς της ενέργειας και της προστασίας του περιβάλλοντος. Οι παράγοντες που οδηγούν στην αναζήτηση καινούργιων και πιο αποδοτικών πηγών ενέργειας είναι η αύξηση του πληθυσμού και η αυξανόμενη κατα κεφαλή ενεργειακή κατανάλωση. Στη σημερινή εποχή οι κύριες πηγές ενέργειας είναι τα ορυκτά καύσιμα (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κ.τ.λ.), η πυρηνική ενέργεια και οι υδροηλεκτρικές πηγές. Οι παραπάνω μορφές ενέργειας συνδέονται άμεσα με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν προκύψει σε παγκόσμια κλίμακα. Ωστόσο, τις τελευταίες δεκαετίες έχει αρχίσει η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι σχετικά περιορισμένη ακόμη, καθώς το κόστος κατασκευής τους παραμένει σχετικά υψηλό σε σχέση με την αποτελεσματικότητα των πηγών αυτών και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή ενέργειας δεν έχουν εξαλειφθεί σε σημαντικό βαθμό (διατάραξη οικοσυστημάτων, επικίνδυνα απόβλητα, κ.τ.λ.) [30]. Εστιάζοντας στον τομέα της ενέργειας, η νανοτεχνολογία προσφέρει λύσεις για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων, που προκύπτουν από την παραγωγή, την αποθήκευση και τη χρήση της ενέργειας. Στη συνέχεια, της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται κάποια νανοϋλικά και νανοδομές, οι οποίες

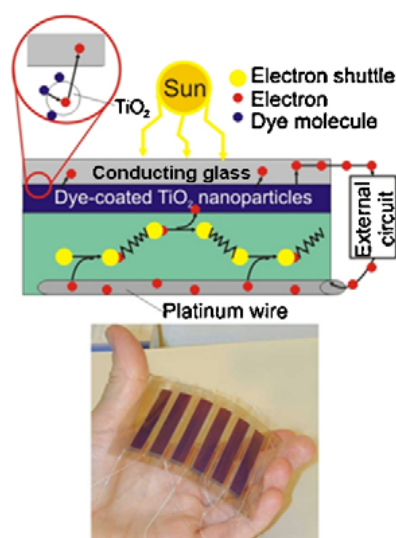
χρησιμοποιούνται στην παραγωγή, στη μετατροπή, στην αποθήκευση, στη μεταφορά και στην εξοικονόμηση ενέργειας.

3.3.1 Παραγωγή ενέργειας

Οι εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στον τομέα της παραγωγής ενέργειας κυρίως από ανανεώσιμες πηγές αναφέρονται στη χρήση βελτιωμένων νανοϋλικών και νανοδομών, που κύριο σκοπό έχουν την αύξηση της απόδοσης της παραγωγής και τη μείωση του κόστους κατασκευής των εγκαταστάσεων παραγωγής. Μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες για την παραγωγή ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία είναι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Οι φωτοβολταϊκές ηλιακές κυψέλες είναι συσκευές οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία με τη βοήθεια του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία θεωρείται ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την ευρεία χρήση της. Με τη χρήση των νανοϋλικών κατασκευάζονται νέοι τύποι ηλιακών κυψελών, οι οποίοι μειώνουν το κόστος παραγωγής και αυξάνουν το βαθμό απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Με τη βοήθεια διαφόρων νανοδομών, όπως είναι οι κβαντικές τελείες είναι δυνατή η βέλτιστη προσαρμογή των ενεργειακών κενών των ημιαγωγών στο περιστασιακό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμη, οι κβαντικές τελείες είναι αποτελεσματικοί εκπομποί φωτός καθώς εκπέμπουν πολλαπλά ηλεκτρόνια ανά ηλιακό φωτόνιο με αποτέλεσμα να αυξάνεται το θεωρητικό όριο απόδοσης των ηλιακών κυψελών που χρησιμοποιούν τις συγκεκριμένες νανοδομές. Η αποτελεσματική δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση λεπτών αντανάκλαστικών υμενίων στις ηλιακές κυψέλες. Επίσης, ο συνδυασμός νέων υλικών, όπως είναι οι πολυμερείς ημιαγωγοί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μείωση του κόστους παραγωγής των ηλιακών κυψελών εξαιτίας των φθηνών μαζικών μεθόδων παραγωγής των υλικών αυτών. Γενικά, λοιπόν, οι δυνατότητες που παρέχει η νανοτεχνολογία που αφορούν κυρίως τη σχεδίαση επιφανειών και στρωμάτων στη νανομετρική κλίμακα επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της δομής και της απόδοσης όλων των τύπων ηλιακών κυψελών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα.

Ένας τύπος ηλιακών κυψελών που κάνει χρήση της νανοτεχνολογίας είναι οι **ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων** (thin-layer solar cells). Στις ηλιακές αυτές κυψέλες εισάγονται ημιαγώγιμα κυρίως υλικά με τη μορφή λεπτών υμενίων, το πάχος των οποίων είναι περίπου 1 – 2 nm. Οι κυψέλες αυτού του τύπου παρουσιάζουν

πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών κυψελών, οι οποίες κατασκευάζονται από δίσκους πυριτίου. Το κόστος παραγωγής των ηλιακών κυψελών λεπτών υμενίων είναι μικρότερο εξαιτίας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, των χαμηλής-θερμοκρασίας διαδικασιών παραγωγής και το υψηλό επίπεδο αυτοματισμού στη διαδικασία παραγωγής τους. Μία ακόμη εναλλακτική λύση που προφέρει η νανοτεχνολογία στην παραγωγή ηλιακών κυψελών είναι η χρήση των **ευαισθητοποιημένων μέσω βαφής ηλιακών κυψελών** (dye-sensitized solar cells). Αυτού του τύπου οι ηλιακές κυψέλες χρησιμοποιούν νανοσωματίδια διοξειδίου του τιτανίου τα οποία είναι εμποτισμένα με μόρια χρωστικών ουσιών, σχηματίζοντας λεπτά υμένια. Τα υμένια αυτά τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια, ένα διαφανές αγωγίμο ηλεκτρόδιο κατασκευασμένο από γυαλί, το οποίο λειτουργεί ως άνοδος και ένα ηλεκτρόδιο από λευκόχρυσο το οποίο λειτουργεί ως καταλυτικός αγωγός. Ένας ηλεκτρολύτης τοποθετείται μεταξύ του υμενίου και του ηλεκτροδίου από λευκόχρυσο για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων. Η απορρόφηση του φωτός λαμβάνει χώρα στα μόρια των χρωστικών ουσιών, ενώ ο διαχωρισμός του φορτίου λαμβάνει χώρα στο σημείο διεπαφής του διοξειδίου του τιτανίου και των μορίων των χρωστικών ουσιών. Η δομή αυτή των ηλιακών κυψελών σε συνδυασμό με τη μεγάλη επιφάνεια των νανοσωματιδίων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγεται από τις ηλιακές κυψέλες [31].



Σχήμα 3.2: Μία ευαισθητοποιημένη μέσω βαφής ηλιακή κυψέλη [32].

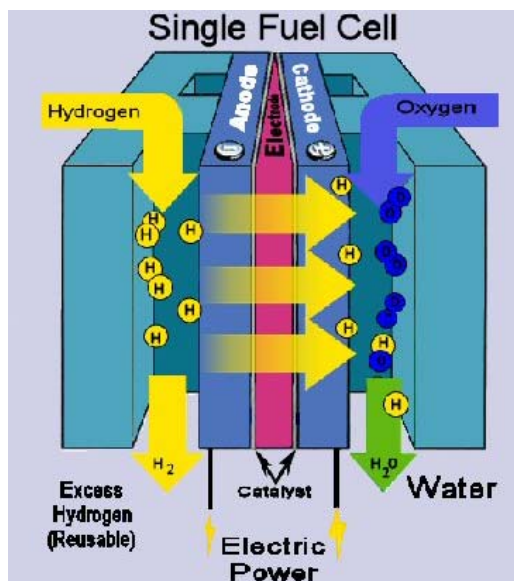
Ακόμη ένα τύπος ηλιακών κυψελών είναι οι **πολυμερείς ηλιακές κυψέλες**. Οι πολυμερείς ηλιακές κυψέλες χρησιμοποιούν οργανικά ημιαγωγικά υλικά για τη μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια. Ακόμη, χρησιμοποιούνται συζευγμένα

πολυμερή υλικά ως δότες ηλεκτρονίων οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και παράγωγα των φουλερενίων ως δέκτες ηλεκτρονίων. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν αυτού του είδους οι κυψέλες είναι το χαμηλό κόστος παραγωγής των υλικών κατασκευής τους και η μηχανική ευελιξία τους.

3.3.2 Μετατροπή της ενέργειας

Ακόμη ένα πεδίο εφαρμογών της νανοτεχνολογίας είναι η αποδοτική μετατροπή της ενέργειας από μία μορφή σε μία άλλη. Κύριοι εκπρόσωποι αυτού του πεδίου είναι οι κυψέλες καυσίμου, τα θερμοηλεκτρικά συστήματα και οι ηλεκτρικοί και οι κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η συνεχής εξέλιξη των συστημάτων μετατροπής ενέργειας αποβλέπει στην αποδοτική μετατροπή της ενέργειας με παράλληλη εξοικονόμηση της αρχικής πηγής ενέργειας και στη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Οι **κυψέλες καυσίμου** (fuel cells) είναι ηλεκτροχημικές συσκευές οι οποίες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια. Εκτός από το υδρογόνο οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιήσουν και φυσικό αέριο, μεθανόλη, βενζόλιο ή βιοαέριο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στα αυτοκίνητα, σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, κ.τ.λ. Με τη χρήση νανοδομών, που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια, μεμβράνες ή καταλύτες, ο βαθμός απόδοσης των κυψελών καυσίμου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, στις κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου η χρήση μίας κεραμικής νανοσκόνης μπορεί να ενισχύσει την αγωγιμότητα των ιόντων. Ενώ, στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου με πολυμερική μεμβράνη ηλεκτρολύτη, η σταθερή θερμοκρασία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση είτε οργανικών ή ανόργανων νανوسύνθετων υλικών. Η χρήση νανοϋλικών στην κατασκευή των ηλεκτροδίων και των καταλυτών ενισχύει την ηλεκτροχημική διαδικασία μετατροπής του υδρογόνου. Τα φουλερένια, μπορούν να ενσωματωθούν στα υλικά κατασκευής των ηλεκτροδίων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοση της μετατροπής και να εξοικονομούνται τα ακριβά μεταλλικά υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι καταλύτες [31].



Σχήμα 3.3: Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου [33].

Τα **θερμοηλεκτρικά συστήματα** χρησιμοποιούνται για την απευθείας μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Seebeck. Το φαινόμενο Seebeck περιγράφει την ανάπτυξη τάσης μεταξύ δύο σημείων ενός ηλεκτρικού αγωγού τα οποία διαθέτουν διαφορετικές θερμοκρασίες [31]. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά στα άκρα του αγωγού τόσο μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας παράγεται από τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των θερμοηλεκτρικών συστημάτων θα πρέπει να διαθέτουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η χρήση νανοδομημένων υλικών επιτρέπει τον έλεγχο των ηλεκτρικών και θερμικών ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής ενός θερμοηλεκτρικού συστήματος. Τέτοια υλικά είναι τα νανοστρώματα, οι κβαντικές τελείες ή τα κβαντικά καλώδια.

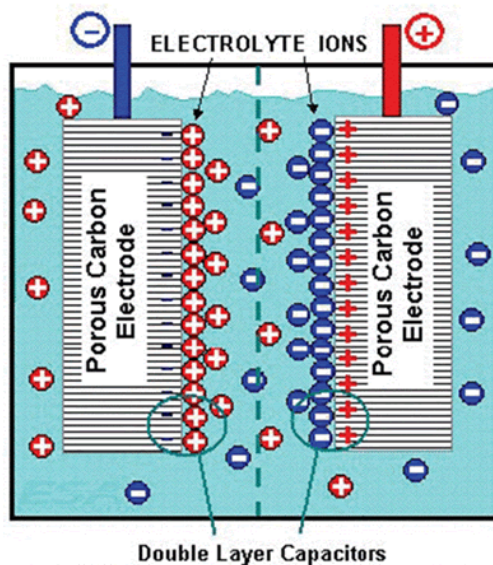
Οι **ηλεκτρικές μηχανές** και οι **μηχανές εσωτερικής καύσης** βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως είναι για παράδειγμα οι μεταφορές. Γι' αυτόν το λόγο έχει προκύψει η ανάγκη οι μηχανές αυτές να καταστούν όσο το δυνατόν πιο αποδοτικές. Αυτό πρακτικά σημαίνει, εξοικονόμηση της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας και μείωση των ρύπων που διαφεύγουν στο περιβάλλον. Η εξοικονόμηση καυσίμου επιτυγχάνεται στις μηχανές εσωτερικής καύσης Diesel με την επίστρωση του κυλίνδρου της μηχανής και των βαλβίδων με νανοκρυσταλλικά σύνθετα υλικά, τα οποία μειώνουν την τριβή και τη φθορά των εξαρτημάτων της μηχανής. Ακόμη, μελετάται η πρόσμειξη του καυσίμου Diesel με κάποια νανοπρόσθετα υλικά, τα οποία θα συμβάλλουν στην αποδοτικότερη καύση του υλικού και στην ταυτόχρονη μείωση των ρύπων εκπομπής.

3.3.3 Αποθήκευση της ενέργειας

Οι αποθήκες ενέργειας είναι απαραίτητες σε όλα τα στάδια της αλυσίδας παροχής της, από τη μετατροπή της μέχρι και την τελική κατανάλωσή της από τους χρήστες. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί είτε σε αυτή τη μορφή είτε σε άλλου είδους μορφή, όπως είναι η χημική και η μηχανική ενέργεια. Ορισμένες συσκευές που έχουν σχεδιαστεί για την αποθήκευση της ενέργειας είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium-Ion batteries), οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές (supercapacitors) και τα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου.

Οι **μπαταρίες ιόντων λιθίου** χρησιμοποιούνται στην αποθήκευση της ενέργειας καθώς παρουσιάζουν άριστη πυκνότητα ενέργειας και ισχύος. Οι έρευνες που βρίσκονται σε εξέλιξη στον τομέα αυτόν επισημαίνουν την ανάγκη χρήσης νανοϋλικών τόσο στα ηλεκτρόδια όσο και στο μη υδατικό ηλεκτρολύτη των μπαταριών αυτού του τύπου ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα τους και να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία τους. Ο στόχος των ερευνών αυτών είναι η κατασκευή ανόδων και καθόδων με υψηλή χωρητικότητα φόρτισης/εκφόρτισης διαμέσου νανοπορώδων υλικών άνθρακα, όπως είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα. Ακόμη, θεωρείται ότι η αντικατάσταση των οργανικών υδατικών ηλεκτρολυτών με πολυμερείς ηλεκτρολύτες και η εφαρμογή κεραμικών υμενίων στη βάση των νανοϋλικών ως διαχωριστές θα βοηθήσουν σημαντικά στην αύξηση της ασφάλειας λειτουργίας των συσκευών αυτών.

Οι **ηλεκτροχημικοί πυκνωτές** είναι, όπως και οι μπαταρίες ιόντων λιθίου συσκευές αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας. Αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια τα οποία περιβάλλονται από έναν ηλεκτρολύτη και διαχωρίζονται από ένα διαχωριστή. Η χωρητικότητα φόρτισης των συσκευών αυτών εξαρτάται κυρίως από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Γι' αυτόν το λόγο για την κατασκευή των ηλεκτροδίων χρησιμοποιούνται αεροπηκτώματα από άνθρακα με τη μορφή νανοπορώδων ουσιών. Οι ουσίες αυτές παρουσιάζουν μεγάλη επιφάνεια φόρτισης και ρυθμιζόμενη κατανομή των πόρων του υλικού. Η χρήση των υλικών αυτών για την κατασκευή των ηλεκτροδίων οδηγεί στη δημιουργία πυκνωτών με πυκνότητες ισχύος που ξεπερνούν τα 10 kW/kg [31]. Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται η παροχή μεγάλης ποσότητας ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα.



Σχήμα 3.4: Το σχηματικό διάγραμμα ενός ηλεκτροχημικού πυκνωτή [34].

Τα περισσότερα διαθέσιμα **συστήματα αποθήκευσης του υδρογόνου** φαίνεται να είναι αναποτελεσματικά και οι επιστήμονες έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στην περαιτέρω αύξηση της δυναμικότητας των συστημάτων αποθήκευσης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση του υδρογόνου, όπως είναι η χημειοαπορρόφηση και η φυσιοαπορρόφηση, παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα. Κάποια από αυτά είναι ότι οι διαδικασίες αυτές απαιτούν ειδικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και τα υλικά κατασκευής των συστημάτων αυτών διαθέτουν μεγαλύτερους σε μέγεθος πόρους από αυτούς των ατόμων ή των μορίων υδρογόνου. Η χρήση νανοϋλικών, όπως είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού και μονού τοιχώματος, οι νανοϊνες άνθρακα με μεταλλική ενίσχυση και οι ζεόλιθοι, μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης του υδρογόνου καθώς τα υλικά αυτά πληρούν τις προϋποθέσεις της μεγάλης επιφάνειας, του βελτιστοποιημένου μεγέθους και σχήματος και της υψηλής ικανότητας αποθήκευσης [35].

3.3.4 Μεταφορά της ενέργειας

Η συνεχής ανάπτυξης στον τομέα της παραγωγής ενέργειας έχει έγειρει πολλά ζητήματα στον τομέα της μεταφοράς της ενέργειας. Τα τρέχοντα ηλεκτρικά δίκτυα δεν είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια που θα παράγεται μόνο από ανανεώσιμες πηγές. Οι απαιτήσεις για το ηλεκτρικό δίκτυο του μέλλοντος είναι η καλύτερη διαχείριση του δυναμικού φορτίου και των σφαλμάτων, η ελεγχόμενη παροχή ενέργειας σύμφωνα με τη ζήτηση, καθώς επίσης και η τροφοδότηση του δικτύου από πολλές αποκεντρωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο τομέας της

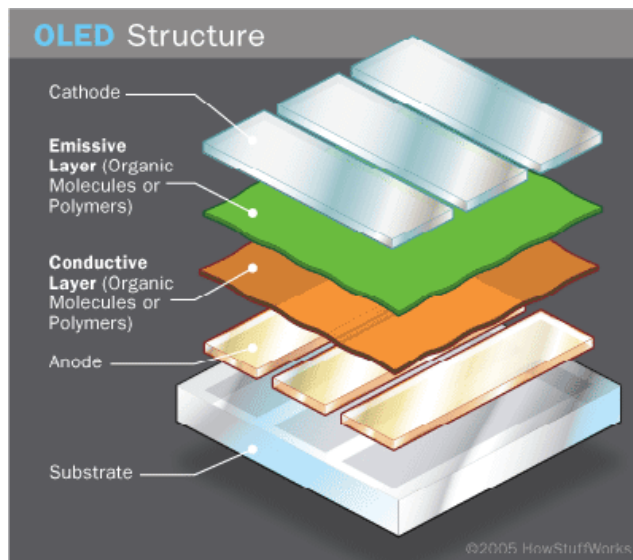
νανοτεχνολογίας μπορεί να συνεισφέρει αποφασιστικά στην κατασκευή ενός τέτοιου ηλεκτρικού δικτύου [31]. Ένα σημαντικό ζήτημα που αφορά τον τομέα της διανομής ενέργειας είναι η μείωση των ενεργειακών απωλειών κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτόν έχει ξεκινήσει η μελέτη για τη χρήση νανοσωλήνων άνθρακα, οι οποίοι θα πάρουν τη θέση των ηλεκτρικών καλωδίων, καθώς εμφανίζουν εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ένα ακόμη, σημαντικό ζήτημα είναι η χρήση νανοδομημένων υλικών μόνωσης για τις γραμμές διανομής υψηλής τάσης. Καθώς αυξάνεται η τάση και η απαιτούμενη συμπίκνωση του ηλεκτρικού ρεύματος εξαιτίας της τροφοδότησης του συστήματος από πολλές αποκεντρωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και της ζήτησης από τους καταναλωτές ολοένα και μεγαλύτερων ποσοτήτων ενέργειας, αυξάνονται και η μηχανική και ηλεκτρική ένταση των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης σε ένα δίκτυο διανομής. Γι' αυτόν το λόγο είναι απαραίτητη η ανάπτυξη νέων, πιο αποδοτικών μεθόδων μόνωσης των γραμμών μεταφοράς με τη βοήθεια της νανοτεχνολογίας. Σε επόμενο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής μελέτη των νανοϋλικών που χρησιμοποιούνται για τη μόνωση των γραμμών μεταφοράς υψηλών τάσεων.

3.3.5 Εξοικονόμηση ενέργειας

Η εξοικονόμηση ενέργειας δεν αφορά μόνο την αποδοτική παραγωγή, μεταφορά, αποθήκευση της ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στους τομείς αυτούς, αφορά και την αποδοτική χρήση της ενέργειας που φτάνει στους καταναλωτές. Με τη βοήθεια της νανοτεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί προϊόντα τα οποία βοηθούν στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας από τους χρήστες. Τα πεδία εφαρμογής των προϊόντων αυτών είναι αρκετά. Ενδεικτικά αναφέρονται, ο αποδοτικός φωτισμός και η θερμική μόνωση των κτιρίων.

Μία από τις πιο διαδεδομένες αλλά όχι αποδοτικές πηγές φωτισμού είναι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως. Οι λαμπτήρες αυτοί εμφανίζουν αρκετές απώλειες καθώς μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια κατά 95% σε θερμότητα και 5% σε φως. Οι νανοτεχνολογικές εφαρμογές στον τομέα του αποδοτικού φωτισμού αφορούν κατά κύριο λόγο την ανάπτυξη και τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών διόδων εκπομπής φωτός, οι οποίες κατασκευάζονται από οργανικά ημιαγώγιμα υλικά. Η τεχνολογία των συμβατικών διόδων εκπομπής φωτός βρίσκει σήμερα εφαρμογές σε απεικονιστικές συσκευές, στο φωτισμό κτιρίων και στο φωτισμό των αυτοκινήτων. Οι οργανικές δίοδοι εκπομπής φωτός έχουν την ικανότητα να επιστρώνονται σε μεγάλες επίπεδες επιφάνειες

με αποτέλεσμα να θεωρούνται οι καταλληλότερες πηγές στερεού, επίπεδου φωτισμού μεγάλων επιφανειών. Περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας των οργανικών διόδων εκπομπής με τη χρήση κβαντικών τελειών θα την ενεργειακή και την απόδοση φωτισμού τους. Ακόμη, μελετάται η χρήση νανοσωματιδίων εκπομπής φωτός για την ελαχιστοποίηση των φαινομένων σκέδασης από αυτές τις πηγές φωτισμού.



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση της τυπικής δομής μίας οργανικής διόδου εκπομπής φωτός [36].

Η ενεργειακή απαίτηση για θέρμανση και ψύξη τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε οικιακό επίπεδο κατέχει ένα σημαντικό ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης παγκοσμίως. Γι' αυτόν το λόγο, η αποτελεσματική μόνωση των κτιριακών εγκαταστάσεων είναι ένας σημαντικός τομέας έρευνας. Η νανοτεχνολογία με τη βοήθεια διαφόρων υλικών μπορεί να συμβάλλει αποτελεσματικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και να αυξήσει την άνεση και την ευημερία στο εσωτερικό των κτιρίων. Η νανοτεχνολογία επιτρέπει την ανάπτυξη νέων μονωτικών υλικών, όπως είναι τα αεροπηκτώματα και οι επιστρώσεις παραθύρων, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή ειδική απόδοση και έχουν μικρότερο πάχος από τα συμβατικά μονωτικά υλικά. Τα αεροπηκτώματα είναι νανοπορώδη υλικά, δηλαδή διαθέτουν πολύ χαμηλή πυκνότητα και μέγεθος πόρων στο επίπεδο της νανοκλίμακας, δύο ιδιότητες πολύ χρήσιμες στη μόνωση των κτιρίων. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν αυτές οι δομές είναι το υψηλό τους κόστος γι' αυτό δε χρησιμοποιούνται ακόμη ευρέως. Άλλα μονωτικά υλικά νανοτεχνολογίας περιλαμβάνουν τις νανοεπικαλύψεις και χρωματικές ουσίες με ενίσχυση νανοσωματιδίων. Τα υλικά αυτά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στη μείωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Ένα παράδειγμα τέτοιων υλικών είναι το γυαλί χαμηλής εκπομπής, το οποίο διαθέτει ένα πολύ λεπτό στρώμα μετάλλου που

αντανακλά τη θερμική ακτινοβολία ή μειώνει την εκπομπή της, μειώνοντας τη μεταφορά θερμότητας από και προς το κτίριο σε όλες τις εποχές. Μία ακόμη εναλλακτική λύση, είναι τα φιλμ γυαλιού τα οποία αντανακλούν συγκεκριμένα μήκη κύματος φωτός με αποτέλεσμα να μειώνεται η επίσης, η μεταφορά θερμότητας από και προς το κτίριο. Τα φιλμ αυτά αποτελούνται από νανοστρώματα πολυμερών υλικών και λειτουργούν ουσιαστικά σαν φίλτρα για την υπεριώση και την υπέρυθη ακτινοβολία. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι των γυαλιών χαμηλής εκπομπής είναι ότι δεν περιέχουν μέταλλα, οπότε ο χρόνος ζωής τους είναι μεγαλύτερος και δεν είναι ενεργοβόρα [37].

Κεφάλαιο 4

4 ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

4.1 Εισαγωγή

Στη νανοτεχνολογία, ένα σωματίδιο ορίζεται ως ένα μικρό σε διαστάσεις αντικείμενο το οποίο συμπεριφέρεται ως μία ολοκληρωμένη μονάδα τόσο όσον αφορά την κίνηση του στο χώρο αλλά και όσον αφορά τις ιδιότητες του. Τα σωματίδια στη νανομετρική κλίμακα μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους. Την πρώτη κατηγορία αποτελούν τα λεπτά σωματίδια (fine particles), των οποίων οι διαστάσεις κυμαίνονται από 100 έως 2500 nm, ενώ τη δεύτερη κατηγορία αποτελούν τα πολύ λεπτά σωματίδια (ultra fine particles) ή αλλιώς νανοσωματίδια, των οποίων οι διαστάσεις κυμαίνονται από 1 έως 100 nm [38]. Στην ευρύτερη κατηγορία των σωματιδίων στη νανοκλίμακα δε συμπεριλαμβάνονται τα ξεχωριστά μόρια, αν και το μέγεθός τους βρίσκεται σε αυτό το εύρος.

Άλλες δομές που συναντούνται στη μελέτη των νανοσωματιδίων είναι τα νανοσυμπλέγματα (nanoclusters), τα οποία διαθέτουν μία τουλάχιστον διάσταση που κυμαίνεται από 1 έως 10 nm και εμφανίζουν ομοιόμορφη κατανομή ως προς το μέγεθός τους. Ακόμη μία δομή είναι οι νανοσκόνες (nanopowders) οι οποίες είναι συσσωματώματα νανοσωματιδίων ή νανοσυμπλεγμάτων. Η μελέτη των νανοσωματιδίων αποτελεί έναν επιστημονικό τομέα εξαιρετικού ενδιαφέροντος κυρίως λόγω των πιθανών εφαρμογών τους στις επιστημονικές περιοχές της βιοιατρικής, της οπτικής και της ηλεκτρονικής.

Τα νανοσωματίδια, όπως και οι περισσότερες δομές που έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής στην παρούσα εργασία, μπορούν να κατασκευαστούν είτε με φυσικές ή χημικές μεθόδους με κύριο σκοπό να διαθέτουν προκαθορισμένες ιδιότητες. Μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες που εμφανίζουν τα νανοσωματίδια είναι ο λόγος της επιφάνειας προς τη μάζα τους, ο οποίος είναι αρκετά μεγαλύτερος σε σχέση με άλλα υλικά και σωματίδια. Εξαιτίας αυτής της ιδιότητας οι αντιδράσεις των νανοσωματιδίων γίνονται με πολύ πιο γρήγορους ρυθμούς. Επιπλέον, εξαιτίας της μεγάλης επιφάνειας τους τα νανοσωματίδια έχουν την ικανότητα να απορροφούν και να μεταφέρουν και άλλα σύνθετα υλικά. Ακόμη, η μεγάλη επιφάνεια των νανοσωματιδίων αυξάνει τον

αριθμό των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφόρων υλικών στα νανοσύνθετα υλικά, των οποίων κύρια συστατικά στοιχεία αποτελούν τα νανοσωματίδια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα νανοσύνθετα υλικά να παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή καθώς επίσης και θερμική και χημική αντίσταση. Η δραστηριότητα της επιφάνειας των νανοσωματιδίων προέρχεται από τα κβαντικά φαινόμενα, τα οποία λαμβάνουν χώρα στη νανομετρική κλίμακα. Τα κύρια γνωρίσματα ενός νανοσωματιδίου μπορούν να μεταβληθούν με την αλλαγή των θερμοδυναμικών καταστάσεων μέσα στο οποίο βρίσκεται και των συνθετικών στοιχείων τα οποία προσκολλώνται στην επιφάνεια του [39]. Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι τα νανοσωματίδια διαθέτουν διαστάσεις πολύ μικρότερες από αυτές του κρίσιμου μήκους κύματος του φωτός γεγονός που τα καθιστά διαφανή. Η ιδιότητα αυτή των νανοσωματιδίων βρίσκει εφαρμογή στους τομείς της κοσμετολογίας και της συσκευασίας.

4.2 Διαμοριακές δυνάμεις των νανοσωματιδίων

Μετά το σχηματισμό τους τα νανοσωματίδια έχουν τη δυνατότητα να αλληλεπιδράσουν με άλλα γειτονικά σωματίδια ή μόρια με αποτέλεσμα το σχηματισμό συσσωματωμάτων. Αν και αυτές οι διαμοριακές δυνάμεις είναι ασθενέστερες από τις δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό των δεσμών μεταξύ των ατόμων εντούτοις η αύξηση των διαμοριακών αυτών δυνάμεων περιλαμβάνει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας, γεγονός που εξηγεί την προσκόλληση των σωματιδίων σε διάφορες επιφάνειες ή την ένωση των νανοσωματιδίων μεταξύ τους ύστερα από μία κρούση. Υπάρχουν δύο κατηγορίες διαμοριακών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των νανοσωματιδίων ή άλλων μορίων. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις μη εξειδικευμένες ακόρεστες διαμοριακές δυνάμεις. Αυτή η κατηγορία απαρτίζεται από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις, τις δυνάμεις Van der Waals, τις υδροφοβικές αλληλεπιδράσεις και τις αλληλεπιδράσεις στοίβας (stacking interactions). Η επόμενη κατηγορία περιλαμβάνει τις εξειδικευμένες κορεσμένες διαμοριακές δυνάμεις. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι δεσμοί υδρογόνου και οι δεσμοί μεταφοράς φορτίου (charge transfer bond).

Οι **ηλεκτροστατικές δυνάμεις** οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των φορτισμένων επιφανειών δύο νανοσωματιδίων μπορεί να είναι είτε ελκτικές ή απωστικές. Απωστικές δυνάμεις αναπτύσσονται όταν τα φορτία των επιφανειών των νανοσωματιδίων είναι όμοια. Οι δυνάμεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα το διαχωρισμό των νανοσωματιδίων

και την αποφυγή δημιουργίας συσσωματωμάτων. Ελκτικές δυνάμεις ασκούνται σε νανοσωματίδια με αντίθετα φορτία, γεγονός που επιταχύνει τη δημιουργία συσσωματωμάτων. Το μέγεθος των ηλεκτροστατικών αυτών δυνάμεων είναι αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης, σύμφωνα με το γνωστό νόμο του Coulomb. Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι πιο ισχυρές στον αέρα από ότι στο νερό, αφού το νερό εμφανίζει υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα τα φορτισμένα νανοσωματίδια να πλησιάσουν μεταξύ τους. Ένα φορτισμένο νανοσωματίδιο παράγει στον περιβάλλοντα χώρο του ένα πεδίο, το οποίο πολώνει τα γύρω μόρια με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ελκτικές δυνάμεις μεταξύ του σωματιδίου και των μορίων οι οποίες τελικά καταλήγουν στη δημιουργία ενός συσσωματώματος. Τα μόρια μπορεί να διαθέτουν μία μόνιμη διπολική ροπή, η οποία προκαλεί το σχηματισμό σταθερότερων συσσωματωμάτων μεγαλύτερης μάζας.

Οι **δυνάμεις Van der Waals** συνδέονται με την ύπαρξη διπόλων, τα οποία μπορεί να είναι είτε μόνιμα ή επαγόμενα και στιγμιαία, σε ένα νανοσωματίδιο. Η ένταση των δυνάμεων αυτών είναι αντιστρόφως ανάλογη με την έκκτη δύναμη της απόστασης μεταξύ δύο νανοσωματιδίων, αυτό πρακτικά σημαίνει πως η ένταση των δυνάμεων αυτών μειώνεται πολύ γρήγορα καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των δύο νανοσωματιδίων. Εξαιτίας της εμφάνισης των δυνάμεων Van der Waals παρατηρούνται πιο συχνά ελκτικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα νανοσωματίδια και όχι απωστικές [40].

Οι **υδροφοβικές αλληλεπιδράσεις** λαμβάνουν χώρα στην περίπτωση που τα υδροφοβικά μόρια ενός υλικού τοποθετηθούν μέσα σε νερό. Σε αυτήν την περίπτωση τα μόρια του νερού περικυκλώνουν το υδροφοβικό μόριο με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία σχεδόν κρυσταλλική επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει για να μεγιστοποιηθεί η ενδομοριακή γέφυρα υδρογόνου των μορίων του νερού γύρω από την υδροφοβική επιφάνεια. Εάν δύο υδροφοβικά κύτταρα συναντηθούν οι υδροφοβικές τους επιφάνειες θα συνδεθούν η μία με την άλλη. Τα κύτταρα του νερού τα οποία ήταν προσκολλημένα στις δύο αυτές επιφάνειες κατανέμονται στην επιφάνεια του μεγαλύτερου διαλύτη [41].

Οι **αλληλεπιδράσεις στοίβας** (stacking interactions) συμβαίνουν μεταξύ επίπεδων αρωματικών ή ετεροαρωματικών συστημάτων. Οι πιο συνηθισμένες

αλληλεπιδράσεις στοιβάς λαμβάνουν χώρα στο DNA. Σε αυτήν την περίπτωση, οι δυνάμεις αυτές συμβάλλουν στη σταθερότητα της διπλής έλικας.

Προηγούμενως αναπτύχθηκαν οι μη εξειδικευμένες ακόρεστες διαμοριακές δυνάμεις που μπορεί να εμφανιστούν κατά την αλληλεπίδραση ενός νανοσωματιδίου με ένα άλλο ή με άλλα μόρια. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι εξειδικευμένες κορεσμένες διαμοριακές δυνάμεις, τις οποίες απαρτίζουν η ανάπτυξη δεσμών υδρογόνου και η ανάπτυξη δεσμών μεταφοράς φορτίου. Πιο συγκεκριμένα, ένας **δεσμός υδρογόνου** αναπτύσσεται όταν το ηλεκτραρνητικό άτομο ενός μορίου, το οποίο συνδέεται με ένα μόριο υδρογόνου, αλληλεπιδρά με ένα διαφορετικό ηλεκτραρνητικό άτομο [42]. Στην περίπτωση των νανοσωματιδίων για να αναπτυχθεί ένας δεσμός υδρογόνου, το νανοσωματίδιο θα πρέπει να διαθέτει μία επιφάνεια η οποία απαρτίζεται από ομάδες μορίων οξυγόνου (O) – υδρογόνου (H) ή αζώτου (N) – υδρογόνου (H) [40]. Ένας δεσμός μεταφοράς φορτίου μπορεί να αναπτυχθεί κατά την αλληλεπίδραση δύο νανοσωματιδίων, όπου ένα ηλεκτρόνιο-δότης από το πρώτο νανοσωματίδιο μπορεί να αλληλεπιδράσει με ένα ηλεκτρόνιο-δέκτη από το άλλο νανοσωματίδιο. Οι δεσμοί μεταφοράς φορτίου δεν είναι σταθεροί χημικοί δεσμοί, για το λόγο αυτόν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι ασθενέστερες από αυτές των ομοιοπολικών δυνάμεων.

4.3 Ιδιότητες των σωματιδίων στη νανοκλίμακα

Η κύρια διαφορά που συναντάται στα σωματίδια αλλά και στα υλικά στη νανομετρική κλίμακα σε σχέση με τη συμβατική κλίμακα και τη μικροκλίμακα είναι το μεγάλο ποσοστό ατόμων και μορίων που συνθέτουν την επιφάνεια των σωματιδίων σε σχέση με το εσωτερικό τους και η πολύ μεγάλη επιφάνεια διαθέσιμου χώρου που βρίσκεται στην επιφάνεια του σωματιδίου ανά μονάδα όγκου. Και οι δύο αυτές ιδιότητες αυξάνονται σε ένταση καθώς μειώνεται το μέγεθος του σωματιδίου. Οι μοναδικές φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες των νανοϋλικών και των νανοσωματιδίων προέρχονται από τα δύο αυτά χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Ακόμη, ένας παράγοντας που ευνοεί τη χρήση των νανοσωματιδίων σε πολλές εμπορικές εφαρμογές είναι τα κβαντικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στη νανομετρική κλίμακα. Ενώ, και η μορφολογία των νανοσωματιδίων μπορεί να παίζει κάποιο ρόλο στην ευρύτερη κατηγοριοποίηση και εφαρμογή τους σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων δομών με ασυνήθιστη μορφολογία αποτελούν οι νανοσωλήνες άνθρακα και τα δενδριμερή.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το πολύ μικρό μέγεθος των νανοσωματιδίων είναι υπεύθυνο για τις πολλές μοναδικές ιδιότητες που εμφανίζουν. Πιο συγκεκριμένα, τα νανοσωματίδια επιδεικνύουν οπτικές ιδιότητες αφού τα μήκη κύματος απορρόφησης και εκπομπής του φωτός μπορούν να ελεγχθούν από το μέγεθος του σωματιδίου και την ενεργοποίηση της επιφάνειάς του. Εάν το μέγεθος του νανοσωματιδίου είναι μικρότερο από το κρίσιμο μήκος κύματος του φωτός τότε η διαφάνεια του σωματιδίου μπορεί να επιτευχθεί. Οι ιδιότητες μεταφοράς των ηλεκτρονίων μπορούν να ελεγχθούν από τη χημική σύνθεση και το μέγεθος των νανοσωματιδίων. Για παράδειγμα, στα μεταλλικά νανοσωματίδια καθώς μειώνεται το μέγεθός τους, μειώνονται και οι θερμοκρασίες τήξης και συσσωμάτωσής τους. Τα νανοσωματίδια, επίσης, έχουν τη δυνατότητα να ενσωματωθούν σε μία σταθερή μήτρα ώστε αυξηθεί η θερμική αγωγιμότητά τους. Η μείωση του μεγέθους σε μερικά μέταλλα και οξείδια μετάλλων μπορεί να οδηγήσει σε ενίσχυση των μαγνητικών ιδιοτήτων τους. Ενώ, μεμονωμένα μεταλλικά μαγνητικά νανοσωματίδια μπορούν να επιδείξουν εξαιρετικά παραμαγνητική συμπεριφορά.

Η μεγάλη επιφάνεια των νανοσωματιδίων δίνει τη δυνατότητα στους επιστήμονες να κατασκευάζουν νανοσωματίδια τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Η διαδικασία της κατάλυσης ενισχύεται από τη μεγάλη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου και την ομοιόμορφη κατανομή των νανοσωματιδίων. Οι μεγάλες επιφάνειες οδηγούν σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των νανοσωματιδίων και της στερεάς μήτρας στην οποία μπορούν να ενσωματωθούν. Ακόμη, στα σύνθετα υλικά, ανάλογα με τη χημική σύνθεση του νανοσωματιδίου, το λόγο των διαστάσεων του και την έκταση της διασποράς και της διεπιφανειακής αλληλεπίδρασης με την πολυμερή μήτρα, η οποία μπορεί επιμέρους να τροποποιηθεί με την ενεργοποίηση της επιφάνειας του νανοσωματιδίου, είναι δυνατό να επιτευχθούν διαφορετικά επίπεδα των μηχανικών ιδιοτήτων για το τελικό νανοςύνθετο υλικό. Για παράδειγμα, ένα νανοςύνθετο υλικό μπορεί να διαθέτει ένα υψηλό μέτρο ελαστικότητας χωρίς να μειώνεται παράλληλα η αντοχή που διαθέτει στην κρούση. Αυτό το γεγονός, παρατηρείται ως επί το πλείστον σε μεγαλύτερων διαστάσεων υλικά. Ακόμη, η μορφολογία των αιμοπεταλίων και οι μεγάλες επιφάνειες των σωματιδίων από πυρίτιο ενισχύουν τις ιδιότητες φραγμού των πολυμερών μεμβρανών ανοίγοντας το δρόμο για την κατασκευή μοριακών σωματιδίων για τη μεταφορά διεισδυτικών ουσιών. Επίσης, τα νανοσωματίδια μπορούν να επηρεάσουν την αναφλεξιμότητα των πολυμερών

υλικών, αυξάνοντας τη θερμοκρασία της υαλωδούς μετάβασης και τη θερμική αντοχή τους.

4.4 Διεργασίες κατασκευής νανοσωματιδίων

Η σύνθεση των νανοσωματιδίων μπορεί να γίνει με πολλές μεθόδους χρησιμοποιώντας αέριες, υγρές ή στερεάς κατάστασης διαδικασίες. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν εκτός των άλλων τις αέριες διαδικασίες της πυρόλυσης, την υψηλής θερμοκρασίας εξάτμιση και τη σύνθεση πλάσματος. Ακόμη περιλαμβάνουν τη σύνθεση νανοσωματιδίων με ακτινοβολία μικροκυμάτων και με φυσική και χημική εναπόθεση ατμών. Όσον αφορά τις κolloειδείς ή υγρές κατάστασης διαδικασίες σε αυτές παράγονται χημικές αντιδράσεις με τη βοήθεια διαλυτών οι οποίες οδηγούν στο σχηματισμό κolloειδών σωματιδίων. Άλλες μέθοδοι παρασκευής νανοσωματιδίων είναι η μοριακή αυτοδιάταξη και οι μηχανικές διαδικασίες μείωσης του μεγέθους μίας δομής, χρησιμοποιώντας μεθόδους λείανσης και κρματοποίησης.

Οι **αέριες διαδικασίες σύνθεσης** των νανοσωματιδίων βασίζονται αρχικά στην ομογενή συμπύκνωση ενός υπερκορεσμένου ατμού και στη συνέχεια στην ανάπτυξη του σωματιδίου χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες της συμπύκνωσης, της πήξης και της δέσμευσης των νανοσωματιδίων. Η παραγωγή του υπέρκορου ατμού μπορεί να επιτευχθεί με πολλές μεθόδους, οι οποίες εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τη χημική σύνθεση της πρώτης ύλης από την οποία παράγεται. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος παραγωγής του υπερκορεσμένου ατμού είναι η θέρμανση ενός στερεού υλικού και η εξάτμισή του σε ένα φορέα αέριας φάσης. Ο υπερκορεσμός του ατμού επιτυγχάνεται με την ψύξη του αερίου ή με τη βοήθεια διαφόρων χημικών αντιδράσεων ή με το συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδων. Οι πυρήνες των ατόμων των νανοσωματιδίων μπορούν να δημιουργηθούν ομοιογενώς στην αέρια φάση ή ακόμη και ετερογενώς ερχόμενοι σε επαφή με τις επιφάνειες των νανοσωματιδίων. Τα διαφορετικά μεγέθη και μορφολογίες των νανοσωματιδίων εξαρτώνται από αυτή την ανάπτυξη των πυρήνων.

Ο σχηματισμός ενός νανοσωματιδίου με κάποια από τις μεθόδους εναπόθεσης ατμών επιτυγχάνεται αρχικά με το σχηματισμό του ατμού με τη βοήθεια της πυρόλυσης και στη συνέχεια με τη μείωση, την οξείδωση και την εναπόθεση του ατμού πάνω σε μία επιφάνεια. Ξεκινώντας από κάποιους αρχικούς πυρήνες, οι οποίοι υπάρχουν ως νησίδες σε κάποια επιφάνεια, η ανάπτυξη των πυρήνων αυτών μπορεί να ελεγχθεί με πολλούς τρόπους έτσι ώστε να παραχθούν νανοσωματίδια με εξειδικευμένες ιδιότητες.

Ένα σημαντικό παράδειγμα νανοσωματιδίου που παράγεται με τη βοήθεια της μεθόδου εναπόθεσης ατμών είναι η παραγωγή των νανοσωλήνων άνθρακα.

Οι **κολλοειδείς μέθοδοι** παραγωγής νανοσωματιδίων βασίζονται στις διαδικασίες κατακρήμνισης σε διαλύματα. Για παράδειγμα, διαλύματα διαφορετικών ιόντων μπορούν να αναμειχθούν κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας έτσι ώστε να δημιουργήσουν αδιάλυτα ιζήματα. Όπως και στις προηγούμενες διαδικασίες, ο έλεγχος της ανάπτυξης και της κίνησης των πυρήνων βοηθά στη δημιουργία νανοσωματιδίων διαφορετικών μεγεθών και μορφολογιών. Για να ελεγχθεί η διαδικασία ανάπτυξης των πυρήνων ενός νανοσωματιδίου έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα υπερηχητικά φαινόμενα. Μία μεγάλη ποικιλία μεταλλικών, μεταλλικών οξειδίων και οργανικών νανοσωματιδίων έχουν παραχθεί με την υγρή, χημική, κολλοειδή μέθοδο.

Η μέθοδος της **μοριακής αυτοδιάταξης** είναι μία αυθόρμητη διαδικασία σχηματισμού νανοσωματιδίων από απλά κύτταρα. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την παραγωγή πολυμερικών νανοσωματιδίων από αμφιφιλικά, μοριακά, συμπολυμερή δομικά στοιχεία. Με τη μέθοδο της μοριακής αυτοδιάταξης παράγονται θερμοδυναμικά σταθερά νανοσωματίδια το μέγεθος και το σχήμα των οποίων μπορεί να ελεγχθεί με την επιλογή του κατάλληλου συμπολυμερούς δομικού στοιχείου, κυρίως όσον αφορά το είδος, τη σύνθεση και το μοριακό του βάρος, και την κατάλληλη επιλογή του διαλύτη και των κατάλληλων περιβαλλοντικών συνθηκών για να ξεκινήσει η μοριακή αυτοδιάταξη των νανοσωματιδίων.

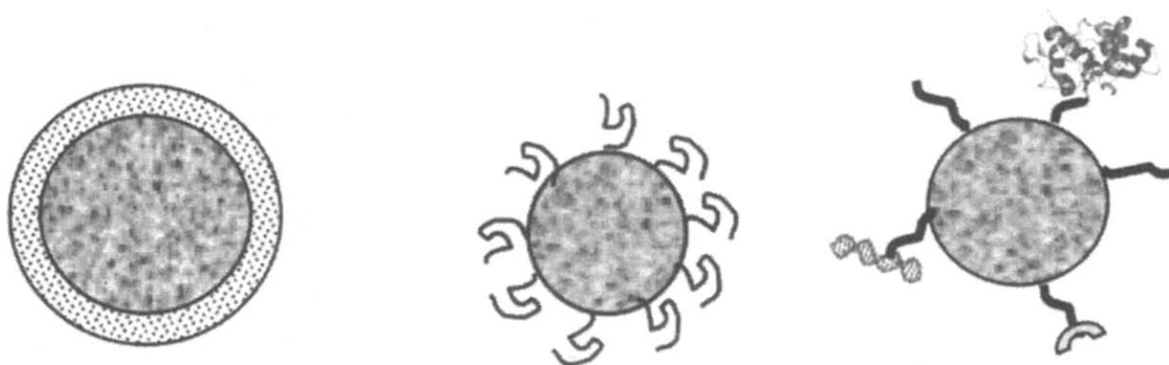
Εκτός από τις διαδικασίες σύνθεσης των νανοσωματιδίων σε αέριες ή υγρές φάσεις, είναι επίσης πιθανή η χρήση στερεών υποστρωμάτων ως ετερογενείς χώροι παραγωγής πυρήνων για τη δημιουργία νανοσωματιδίων σε στερεές-υγρές διεπιφάνειες. Οι ιδιότητες των νανοσωματιδίων που παράγονται μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια με τη χρήση ήδη διαμορφωμένων επιφανειών.

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι παρασκευής νανοσωματιδίων ανήκουν στην κατηγορία της τεχνικής Bottom up, η οποία αναλύθηκε στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Στον αντίποδα της τεχνικής αυτής βρίσκεται η τεχνική Top Down, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή των νανοσωματιδίων κάνοντας χρήση των μεθόδων μηχανικής μείωσης του μεγέθους, όπως είναι η λείανση του υλικού. Αυτές οι μέθοδοι παραγωγής έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τη δημιουργία νανοσωματιδίων από

ορυκτά, όπως είναι ο άργιλος, ο άνθρακας και διάφορα μέταλλα. Για να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη συγκέντρωση των σωματιδίων κατά τη διαδικασία μείωσης του μεγέθους τους, οι διαδικασίες της λείανσης συχνά χρησιμοποιούν κolloειδείς σταθεροποιητές.

4.5 Μετασχηματισμός της επιφάνειας των νανοσωματιδίων

Μετά την παραγωγή και τον καθαρισμό των νανοσωματιδίων σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο κρίνεται συχνά απαραίτητος ο μετασχηματισμός της επιφάνειάς τους. Οι λόγοι που μπορεί να οδηγήσουν στο μετασχηματισμό της επιφάνειας ενός νανοσωματιδίου είναι η μερική αδρανοποίηση ενός πολύ ενεργού νανοσωματιδίου, η σταθεροποίηση ενός συνόλου νανοσωματιδίων σε ένα μέσο, το οποίο μπορεί να είναι είτε ένα διάλυμα ή μία ρευστή μάζα υλικού, όπου τα νανοσωματίδια είναι έτοιμα να διασκορπιστούν. Ακόμη, ο μετασχηματισμός της επιφάνειας των νανοσωματιδίων μπορεί να ενεργοποιήσει ένα νανοσωματίδιο ώστε να χρησιμοποιηθεί σε ιδιαίτερα πολύπλοκες διεργασίες, όπως είναι η μοριακή αναγνώριση. Επίσης, η τροποποίηση της επιφάνειας τους μπορεί να ενισχύσει τη σωστή τοποθέτηση, συναρμολόγηση των νανοσωματιδίων στο χώρο. Μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται συχνότερα για το μετασχηματισμό της επιφάνειας των νανοσωματιδίων είναι η τοποθέτηση μίας ουσίας επιφανειακής δράσης ή πολυμερών υλικών στην επιφάνειά τους, η απορρόφηση των ουσιών επιφανειακής δράσης από την επιφάνεια των νανοσωματιδίων, η τοποθέτηση φορτισμένων συνδετικών ουσιών και πολυμερών ψηκτρών στην επιφάνειά τους και η προσάρτηση βιολογικών μορίων, όπως είναι το DNA, ή η επίστρωση ενός συνεχούς, πολυμερικού υμενίου στα νανοσωματίδια.



Σχήμα 4.1: Διαφορετικές παραλλαγές της επιφάνειας ενός νανοσωματιδίου [43].

4.6 Συναρμολόγηση των νανοσωματιδίων

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές κρίνεται απαραίτητη η διάταξη των νανοσωματιδίων με παρόμοιο τρόπο με τον οποίο διατάσσονται τα μόρια και τα άτομα στο χώρο για να σχηματίσουν την ύλη. Για παράδειγμα, η διάταξη των νανοσωματιδίων μίας οπτοηλεκτρονικής συσκευής θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η συνολική επιφάνεια των νανοσωματιδίων να είναι σαφώς διαμορφωμένη. Γενικά, κατά τη δημιουργία δομών με τη βοήθεια των νανοσωματιδίων είναι απαραίτητη η τοποθέτησή τους σε συγκεκριμένες θέσεις έτσι ώστε να είναι εύκολος ο εντοπισμός και η σύνδεσή τους με το μακρόκοσμο.

Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές διαφορετικές τεχνικές για την ακριβή τοποθέτηση των νανοσωματιδίων σε συγκεκριμένες θέσεις. Για παράδειγμα, έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές διαμόρφωσης της επιφάνειας για να τοποθετηθούν πολυμερή και πυριτιούχα νανοσωματίδια σε συγκεκριμένες θέσεις. Ακόμη, έχουν χρησιμοποιηθεί αυτοδιατασσόμενες ουσίες επιφανειακής δράσης και δομικές νανοδομές συμπολυμερών υλικών ως πρότυπα για τη συναρμολόγηση των σωματιδίων από μεταλλικά οξείδια ώστε να σχηματίσουν μεσοπορώδη υλικά.



Σχήμα 4.2: Διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης των νανοσωματιδίων για να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές εφαρμογές [43].

Κεφάλαιο 5

5 NANOΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

5.1 Εισαγωγή στην ηλεκτρική μόνωση

Ένα υψηλής τάσης ηλεκτρικό σύστημα αποτελείται από μία σειρά ειδικά συνδεδεμένων γεννητριών, από πολλές σειρές γραμμών μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων και από τοπικά δίκτυα διανομής, τα οποία διαθέτουν αγωγούς πάνω από το έδαφος αλλά και υπόγειους, ώστε να μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια στους χρήστες. Η ηλεκτρική μόνωση κάθε επιμέρους τμήματος του εξοπλισμού αυτού κρίνεται απαραίτητη για την ορθή λειτουργία του συστήματος υψηλής τάσης. Η σχεδίαση και η βελτιστοποίηση ενός ηλεκτρικού συστήματος μόνωσης αποτελεί μία ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, ενώ πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ενεργειακές απαιτήσεις, τα επίπεδα τάσης και οι θερμοκρασίες λειτουργίας των συστημάτων αυτών, οι οποίες αυξάνονται στις παραδοσιακές εφαρμογές ηλεκτρικής μόνωσης. Τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των συσκευών εμφανίζουν μεγαλύτερο δυναμικό σε χώρους όπου αυτό είναι ανεπιθύμητο. Τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε ηλεκτρική εφαρμογή. Η μελέτη των ιδιοτήτων και η ανάπτυξη των μονωτικών υλικών έχει ξεκινήσει εδώ και αρκετές δεκαετίες. Η συνεχής μελέτη των διηλεκτρικών υλικών επιτρέπει πλέον τη χρήση εξειδικευμένων υλικών, που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις κάθε ηλεκτρικής εφαρμογής. Επίσης, η συνεχής ανάπτυξη νέων διηλεκτρικών υλικών οδηγεί και στην περαιτέρω μείωση του κόστους εφαρμογής και κατασκευής τους.

Κατά τη σχεδίαση ή την επιλογή του κατάλληλου τύπου μονωτικού συστήματος για τις ηλεκτρικές εφαρμογές υψηλών τάσεων πρέπει να ληφθούν υπόψη τρεις κύριες κατηγορίες ηλεκτρικών ιδιοτήτων των συστημάτων αυτών [44]. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στην ηλεκτρική αντοχή των υλικών και των δομικών στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα μόνωσης. Η επόμενη σημαντική ηλεκτρική ιδιότητα είναι η σχετική επιτρεπτότητα που θα πρέπει να διαθέτει το ηλεκτρικό σύστημα μόνωσης. Ακόμη, κατά την επιλογή του κατάλληλου συστήματος μόνωσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι διηλεκτρικές απώλειες που εμφανίζονται στο ηλεκτρικό σύστημα υψηλής τάσης.

Η σημασία των παραπάνω ηλεκτρικών ιδιοτήτων κατά την επιλογή του κατάλληλου συστήματος μόνωσης εξαρτάται κυρίως από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το σύστημα αυτό. Ωστόσο, η ηλεκτρική αντοχή των δομικών στοιχείων του ηλεκτρικού συστήματος υψηλής τάσης παίζει κυρίαρχο ρόλο κατά την επιλογή ή τη σχεδίαση του συστήματος μόνωσης. Η ηλεκτρική αντοχή είναι μία στοχαστική μεταβλητή. Γι' αυτόν το λόγο, για τη μελέτη της παραμέτρου αυτής εκτός από τη μέση τιμή της είναι απαραίτητη η στατιστική κατανομή της στο ηλεκτρικό σύστημα υψηλής τάσης. Δηλαδή, κατά τη σχεδίαση ενός ηλεκτρικού συστήματος υψηλής τάσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το εύρος της ηλεκτρικής αντοχής των στερεάς ή υγρής κατάστασης μονωτών ειδικά όταν πρόκειται να μονωθούν μεγάλες περιοχές και επιφάνειες. Ακόμη, η αποτελεσματική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής μόνωσης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών και των δομικών στοιχείων που το απαρτίζουν. Οι θερμικές και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματική μόνωση ενός ηλεκτρικού συστήματος υψηλής τάσης. Για παράδειγμα, στη σύνθετη μόνωση των μεγάλων ηλεκτρικών μηχανών η πλειοψηφία των ηλεκτρικών βλαβών που εμφανίζονται οφείλονται σε μηχανικές ή θερμικές αστοχίες [44]. Ορισμένες ειδικές εφαρμογές, βέβαια, απαιτούν τη μελέτη πιο εξειδικευμένων παραμέτρων, όπως είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής, για τη σχεδίαση ενός αποτελεσματικού μονωτικού συστήματος.

Αρχικά, για την κατασκευή ενός συστήματος ηλεκτρικής μόνωσης χρησιμοποιούνταν κυρίως φυσικά υλικά, όπως είναι για παράδειγμα, το μετάξι, το γυαλί και διάφορα κεραμικά υλικά. Ωστόσο, οι συνεχείς εξελίξεις στον τομέα της επιστήμης των υλικών και η χρήση πλαστικών υλικών σε τέτοιες εφαρμογές καθώς επίσης και η ανάπτυξη ηλεκτρικών συσκευών και εξοπλισμού με μέγεθος πολύ μικρότερο από αυτό των παραδοσιακών συσκευών δημιούργησαν την ανάγκη για την ανάπτυξη καινούργιων μονωτικών υλικών, τα οποία θα διέθεταν βελτιωμένες ιδιότητες όσον αφορά τη μόνωση των ηλεκτρικών συστημάτων υψηλής τάσης και επίσης θα είχαν μικρότερο μέγεθος ώστε να ταιριάζουν στο νέο εξοπλισμό. Επίσης, σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη νέων μονωτικών υλικών έχει η πρόοδος που έχει γίνει τις τελευταίες δεκαετίες στον τομέα της νανοτεχνολογίας και ειδικότερα στον τομέα των νανοσύνθετων υλικών (nanocomposites). Γι' αυτόν το σκοπό αναπτύχθηκε ένας νέος τομέας έρευνας στο επιστημονικό πεδίο της ηλεκτρικής μόνωσης που αφορά τη δημιουργία των νανοδιηλεκτρικών υλικών.

Ο τομέας των νανοδιηλεκτρικών υλικών αναφέρεται στη μελέτη τόσο των διηλεκτρικών φαινομένων όσο και των υλικών στη νανομετρική κλίμακα με σκοπό την κατασκευή δομών, συσκευών και συστημάτων τα οποία θα διαθέτουν βελτιωμένες διηλεκτρικές ιδιότητες και λειτουργίες εξαιτίας της νανομετρικής δομής τους. Το μέγεθος των νανοδιηλεκτρικών υλικών που κατασκευάζονται δεν ξεπερνά τα 100 nm [45]. Η ανάπτυξη των νανοδιηλεκτρικών υλικών προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στην κατασκευή μίας ηλεκτρικής συσκευής ή ενός ολόκληρου συστήματος. Όσον αφορά τη βιομηχανία ενέργειας κρίνεται ολόενα και πιο σημαντική η χρήση υλικών, τα οποία θα διαθέτουν μεγάλο χρονικό όριο ζωής και θα έχουν τις λιγότερες δυνατές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

5.2 Νανοςύνθετα υλικά: Βασικές έννοιες

Ο όρος σύνθετο υλικό χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει ένα υλικό το οποίο κατασκευάζεται από δύο ή περισσότερα συστατικά στοιχεία. Τα σύνθετα υλικά είναι στερεά, πολλαπλών φάσεων υλικά τα οποία σχηματίζονται από το συνδυασμό υλικών με διαφορετικές φυσικές, δομικές και χημικές ιδιότητες. Τα σύνθετα υλικά διαφέρουν από τα συστήματα πολλαπλών συστατικών, όπως είναι τα μείγματα και τα κράματα, ως προς το ότι μπορούν να διατηρήσουν τις ιδιότητες των επιμέρους συστατικών στοιχείων που τα απαρτίζουν. Τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως είναι στις κατασκευές, στις μεταφορές, σε διάφορα καταναλωτικά προϊόντα και στην ηλεκτρική μόνωση. Ο συνδυασμός διαφορετικών υλικών οδηγεί στην κατασκευή σύνθετων υλικών με αξιοσημείωτες ιδιότητες, όσον αφορά το βάρος, την αντοχή, τη διαπερατότητα, τη βιοαποικοδομησιμότητα αλλά και ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες, τις οποίες δε διαθέτουν τα μεμονωμένα συνθετικά συστατικά τους. Η δυνατότητα αυτή των σύνθετων υλικών ανοίγει το δρόμο για τη σύνθεση αρκετά εξειδικευμένων υλικών τα οποία κατασκευάζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Ένα σύνθετο υλικό αποτελείται συνήθως από δύο φάσεις, τη μήτρα και το υλικό πλήρωσης. Οι μήτρες των σύνθετων υλικών κατασκευάζονται συνήθως από πολυμερή, κεραμικά ή μεταλλικά υλικά. Τα πολυμερή υλικά χρησιμοποιούνται σε πολλές τεχνικές εφαρμογές καθώς παράγονται ευκολότερα σε σχέση με τα μεταλλικά και τα κεραμικά υλικά, ενώ διαθέτουν ακόμη μεγαλύτερη πλαστικότητα και μικρότερο βάρος από τα

άλλα δύο είδη υλικών. Ωστόσο, τα πολυμέρη υλικά δε διαθέτουν ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες και μεγάλη αντοχή.

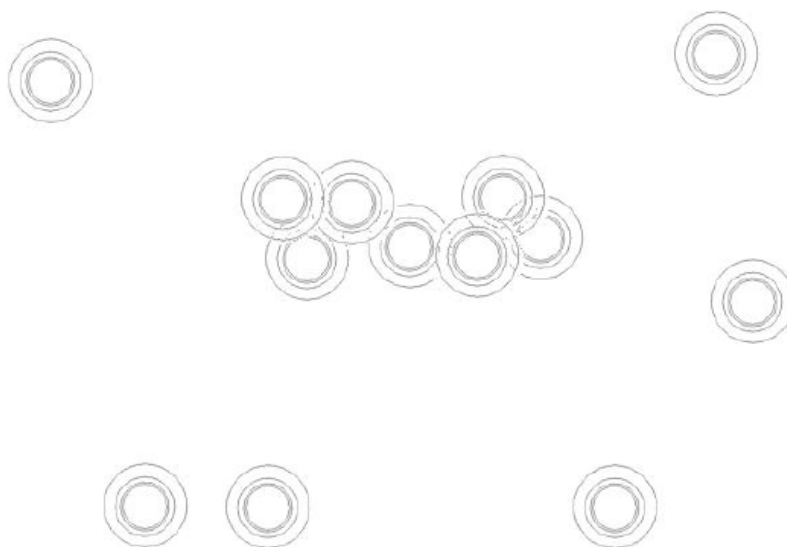
Κατά αντιστοιχία με τα σύνθετα υλικά, τα νανοσύνθετα υλικά είναι τα υλικά τα οποία κατασκευάζονται από διαφορετικά συστατικά στοιχεία, ενώ τουλάχιστον ένα από αυτά τα στοιχεία διαθέτει μία τουλάχιστον διάσταση στη νανομετρική κλίμακα [46]. Αν και η μελέτη των νανοσύνθετων υλικών είναι ένας σχετικά νέος κλάδος της νανοτεχνολογίας, ωστόσο στη φύση τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται επί αιώνες. Για παράδειγμα, φυσικά υλικά, όπως είναι οι υδρογονάνθρακες, τα λιπίδια και οι πρωτεΐνες χρησιμοποιούνται στο φυσικό κόσμο για τη δημιουργία νανοσύνθετων δομών, όπως είναι τα κόκκαλα, τα κοχύλια και το ξύλο [47]. Στην παρούσα εργασία, μελετώνται κατά κύριο λόγο τα πολυμερή νανοσύνθετα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στον τομέα της ηλεκτρικής μόνωσης και πιο συγκεκριμένα στην ηλεκτρική μόνωση υψηλών τάσεων. Ο σχηματισμός ενός νανοδιηλεκτρικού υλικού επιτυγχάνεται συνήθως με την ομοιόμορφη διασπορά του υλικού πλήρωσης στη μήτρα του νανοσύνθετου υλικού.

Τα νανοσύνθετα υλικά θεωρούνται «λειτουργικά» υλικά. Ο όρος «λειτουργικά» αναφέρεται στις ιδιότητες των υλικών αυτών, οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν με την κατάλληλη προσθήκη των υλικών πλήρωσης. Η «λειτουργία» των νανοσύνθετων υλικών βασίζεται κυρίως στις ζώνες αλληλεπίδρασης ή με άλλα λόγια στο μεγάλο διεπιφανειακό όγκο που προκύπτει στα σύνθετα υλικά από τον υψηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο των υλικών πλήρωσης τους. Ο αυξημένος διεπιφανειακός όγκος σε ένα νανοσύνθετο υλικό μπορεί να μεταβάλλει ακόμη και τη δομή της μήτρας του. Οι ιδιότητες που εμφανίζουν οι ζώνες αυτές αλληλεπίδρασης διαφέρουν από τις ιδιότητες των υλικών πλήρωσης και της μήτρας του νανοσύνθετου υλικού. Για τη δημιουργία μεγάλου διεπιφανειακού όγκου σε ένα νανοσύνθετο υλικό θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητική ποσότητα υλικού πλήρωσης, το οποίο θα κατανεμηθεί ομοιογενώς σε αυτό. Ο μεγάλος διεπιφανειακός όγκος στα νανοσύνθετα υλικά ισοδυναμεί με τη μεταβολή των διηλεκτρικών ιδιοτήτων τους [48].

Τα νανοσωματίδια και οι διεπιφάνειες τους σε συνδυασμό με την πολυμερή μήτρα προκαλούν μεταβολές στη δομή του πολυμερούς υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το νανοσύνθετο υλικό. Ένα εξαιρετικά σταθερό στρώμα αναπτύσσεται κοντά στην επιφάνεια των υλικών πλήρωσης του νανοσύνθετου υλικού εξαιτίας των δεσμών που αναπτύσσονται μεταξύ του πολυμερούς και του υλικού

πλήρωσης. Αυτό το στρώμα ελέγχει την περιοχή που βρίσκεται γύρω από τα νανοσωματίδια του σύνθετου υλικού. Το μέγεθος του στρώματος αυτού μπορεί να επηρεάσει ορισμένες από τις ιδιότητες του νανοσύνθετου υλικού, όπως είναι η τοπική διανομή φόρτισης, την κινητικότητα και τη διάθρωση των πολυμερικών αλυσίδων, το μοριακό βάρος τους, κ.τ.λ [49]. Ωστόσο, οι διηλεκτρικές ιδιότητες ενός νανοσύνθετου υλικού εξαρτάται κυρίως από την πολυμερή μήτρα, το υλικό πλήρωσής του και τη μορφή της ζώνης αλληλεπίδρασής του [50].

Γύρω από το υλικό πλήρωσης των νανοσύνθετων υλικών μπορούν να δημιουργηθούν περιοχές τοπικής αγωγιμότητας. Οι περιοχές αυτές μειώνουν τη συγκέντρωση φόρτισης στο νανοσύνθετο υλικό ελέγχοντας με αυτόν τον τρόπο την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και τη διηλεκτρική αντοχή βλάβης (dielectric breakdown strength) του. Ο σχηματισμός της περιοχής τοπικής αγωγιμότητας πραγματοποιείται στη μήτρα του νανοσύνθετου υλικού όταν σε αυτή υπάρχουν νανοσωματίδια τα οποία επικαλύπτονται μερικώς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση των νανοσωματιδίων σε μία πολυμερή μήτρα. Η περιοχή τοπικής αγωγιμότητας σχηματίζεται γύρω από τα νανοσωματίδια που επικαλύπτονται μερικώς [48].

Τα υλικά πλήρωσης που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση ενός νανοσύνθετου υλικού μπορούν να μεταβάλλουν τη διαύγεια του υλικού [49]. Η μεγάλη επιφάνεια που διαθέτει ένα νανοσύνθετο υλικό μπορεί να επηρεάσει τη μορφολογία των ημικρυσταλλικών πολυμερών υλικών από τα οποία κατασκευάζεται. Η διαύγεια του πολυμερούς υλικού μπορεί να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή βλάβης του

νανοσύνθετου υλικού, δεν είναι όμως αρκετή για τον πλήρη έλεγχο αυτής της ιδιότητάς του [51].

Ένας ακόμη μηχανισμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του νανοσύνθετου υλικού είναι ο σχηματισμός μίας περιοχής, η οποία καλείται «παγίδα». Η περιοχή αυτή διαθέτει χαμηλότερο ενεργειακό δυναμικό από οποιαδήποτε άλλη περιοχή μπορεί να σχηματιστεί στη ζώνη αλληλεπίδρασης του νανοσύνθετου υλικού. Η πυκνότητα και το βάθος των περιοχών αυτών είναι μεταβλητές ποσότητες. Οι περιοχές αυτές δεσμεύουν με μεγαλύτερη ευκολία τους φορείς φορτίου σε σχέση με τη μήτρα του νανοσύνθετου υλικού. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η κινητική ενέργεια και η κινητικότητα των φορέων αυτών. Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί ως μηχανισμός σκέδασης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η ενέργεια των φορέων φορτίων αφού αρχικά δεσμεύεται σε αυτές τις περιοχές στη συνέχεια διανέμεται ομοιόμορφα στο πολυμερές υλικό με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ανθεκτικότητα και η διάρκεια ζωής του. Αυτός ο μηχανισμός σκέδασης μειώνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στα ηλεκτρόδια του υλικού και αυξάνει την απαιτούμενη τάση για την έγχυση φορτίων στο υλικό [49].

Οι μηχανισμοί που αναπτύχθηκαν παραπάνω οι οποίοι συνδέονται άμεσα με τη ζώνη αλληλεπίδρασης του νανοσύνθετου υλικού σε συνδυασμό με την προσθήκη κατάλληλης ποσότητας υλικών πλήρωσης και τη μεταβολή της επιφάνειας των υλικών αυτών χρησιμοποιούνται για την κατασκευή νανοσύνθετων υλικών τα οποία διαθέτουν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά για να χρησιμοποιηθούν στον τομέα της ηλεκτρικής μόνωσης [49], [50]. Σημαντικό ρόλο στη σύνθεση νανοσύνθετων υλικών με διηλεκτρικές ιδιότητες παίζει και η αύξηση της συμβατότητας της πολυμερούς μήτρας με το υλικό πλήρωσης ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία συσσωματωμάτων. Επίσης, η σύνδεση των υλικών πλήρωσης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αυξάνεται η πιθανότητα για μοριακή αυτοδιάταξη του νανοσύνθετου υλικού.

5.3 Θεωρητικά μοντέλα περιγραφής των νανοσύνθετων υλικών

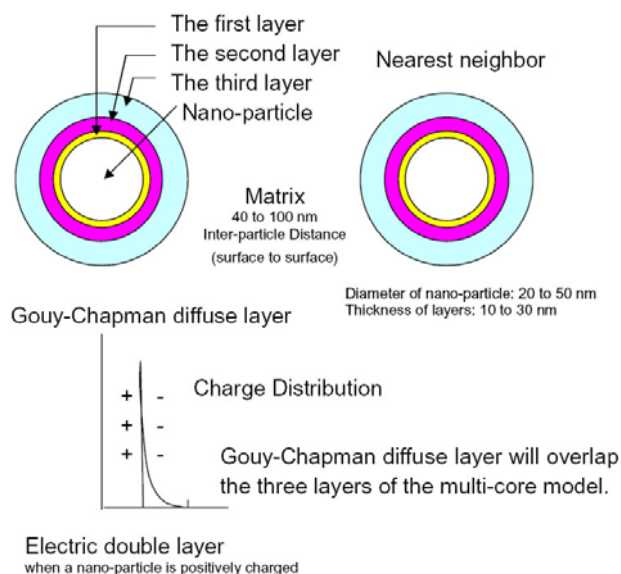
Έχουν αναπτυχθεί διάφορα θεωρητικά μοντέλα για τη μελέτη της συμπεριφοράς των νανοσύνθετων υλικών, κυρίως όσον αφορά τη μεταβολή των ιδιοτήτων τους με την προσθήκη κάποιου υλικού πλήρωσης. Τα φαινόμενα που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια

των νανοσύνθετων υλικών ευθύνονται κατά κύριο λόγο για τη μεταβολή των ιδιοτήτων τους.

Ένα μοντέλο που έχει αναπτυχθεί για τη μελέτη των φαινομένων που εμφανίζονται στη διεπιφάνεια των νανοσύνθετων υλικών είναι το μοντέλο διπλού, ηλεκτρικού στρώματος. Ένα διπλό, ηλεκτρικό στρώμα μπορεί να δημιουργηθεί μεταξύ μίας στερεής και μίας υγρής φάσης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η μία φάση πρέπει να έχει τη δυνατότητα κίνησης. Γι' αυτόν το λόγο θεωρείται ότι οι πολυμερικές αλυσίδες σε ένα νανοσύνθετο υλικό μπορούν να κινηθούν ελαφρώς. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο ένα νανοσύνθετο υλικό αποτελείται από δύο στρώματα, ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό. Στο εσωτερικό στρώμα τα ιόντα του νανοσύνθετου υλικού είναι ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Ενώ, στο εξωτερικό στρώμα, τα ιόντα παρουσιάζουν μεγαλύτερη κινητικότητα. Όταν ένα νανοσωματίδιο που περιλαμβάνεται στο σύνθετο υλικό κινείται τα ιόντα που βρίσκονται εντός του διπλού αυτού στρώματος μετακινούνται με το σωματίδιο. Ενώ όσα βρίσκονται εκτός αυτού του στρώματος παραμένουν ακίνητα. Το όριο αυτό καλείται επίπεδο ολίσθησης. Εξαιτίας της κίνησης αυτής του σωματιδίου κατά μήκος του εξωτερικού στρώματος αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό δυναμικό του επιπέδου ολίσθησης και του περιβάλλοντος μέσου του νανοσωματιδίου. Ένα διπλό στρώμα μπορεί να σχηματιστεί σε ένα νανοσύνθετο υλικό όταν κάποιες από τις ομάδες των ατόμων της επιφάνειας ενός σωματιδίου ιονίζονται ή απορροφώνται. Το φορτία που αναπτύσσονται μέσα στο σωματίδιο μπορεί να είναι είτε κινητά ηλεκτρόνια ή οπές. Το εσωτερικό στρώμα γύρω από το σωματίδιο αποτελείται από δίπολα ή ιόντα αντίθετης πολικότητας από αυτά που βρίσκονται στο εσωτερικό του σωματιδίου. Το δυναμικό που αναπτύσσεται στο εσωτερικό στρώμα καθορίζεται από τα ιόντα τα οποία έλκονται από το επιφανειακό δυναμικό του σωματιδίου. Το μέγεθος και η αντοχή του εξωτερικού στρώματος είναι αντιστρόφως ανάλογα από την αγωγιμότητα του υλικού πλήρωσης [52].

Το μοντέλου πολλαπλού πυρήνα (multi-core model) αποτελεί μία περίπλοκη αλλά και μία ευπροσάρμοστη θεωρητική προσέγγιση για τη μελέτη των φαινομένων που εμφανίζονται στην επιφάνεια των νανοδιηλεκτρικών υλικών. Το μοντέλο αυτό παρουσιάστηκε από τον Tanaka και τους συναδέλφους του [48]. Το μοντέλο αυτό περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις ενός σφαιρικού ανόργανου σωματιδίου με τα περιβάλλοντα μέσα. Αποτελείται από τρία κύρια στρώματα-πυρήνες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2. Το πρώτο στρώμα αποτελείται από μόρια τα οποία είναι φυσικά

συνδεδεμένα στην επιφάνεια του σωματιδίου με τη βοήθεια διαφόρων φορέων ζεύξης. Το πάχος του στρώματος αυτού είναι μόλις 1 nm και μπορεί να σχηματιστεί από ομοιοπολικούς, δεσμούς Van der Waals ή δεσμούς υδρογόνου. Το επόμενο, δεύτερο στρώμα αποτελείται από πολυμερικές αλυσίδες, οι οποίες εμφανίζουν ισχυρούς δεσμούς και αλληλεπιδράσεις με το πρώτο στρώμα. Εξαιτίας των ισχυρών αυτών αλληλεπιδράσεων στην περιοχή αυτή μεταβάλλεται η δομή του πολυμερούς υλικού. Γι' αυτόν το λόγο το στρώμα αυτό επηρεάζει την κινητικότητα των πολυμερικών αλυσίδων. Το πάχος του στρώματος αυτού κυμαίνεται από 2 έως 9 nm. Το τρίτο στρώμα αλληλεπιδρά με το δεύτερο και αποτελείται ομοίως από πολυμερικές αλυσίδες, οι οποίες στην περίπτωση αυτή αλληλεπιδρούν και με το υλικό πλήρωσης του νανოსύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η μορφή, η κινητικότητα, ο όγκος και η κρυσταλλικότητα των αλυσίδων αυτών. Το πάχος του στρώματος αυτού είναι μερικές δεκάδες νανόμετρα. Με τη βοήθεια του μοντέλου αυτού μπορεί να εξηγηθούν αρκετά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια ενός νανοςύνθετου υλικού.



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση του μοντέλου πολλαπλού πυρήνα [48].

Ένα ακόμη θεωρητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για τη μελέτη της συμπεριφοράς των νανοςύνθετων υλικών είναι το μοντέλο όγκου ενδιάμεσης φάσης. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από τον Raetzke και τους συναδέλφους του [53]. Σε αυτό το μοντέλο υπολογίζεται το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει η ενδιάμεση φάση σε ένα πολυμερές υλικό εξαιτίας της προσθήκης των υλικών πλήρωσης. Ως παράμετροι

εισόδου, λοιπόν, λαμβάνονται οι πυκνότητες μάζας της μήτρας και του υλικού πλήρωσης του νανოსύνθετου υλικού. Επίσης, γίνεται η παραδοχή πως τα σφαιρικά νανοσωματίδια του υλικού είναι ομοιογενώς κατανεμημένα στην πολυμερή μήτρα. Το μοντέλο αυτό δείχνει ότι υπάρχουν συγκεκριμένες μέγιστες τιμές για τον όγκο που καταλαμβάνει η ενδιάμεση φάση, οι οποίες εξαρτώνται από το ποσοστό του όγκου και από το μέγεθος του υλικού πλήρωσης του νανοςύνθετου υλικού. Επίσης, από το μοντέλο αυτό διεξάγεται το συμπέρασμα ότι τα νανοςύνθετα υλικά επηρεάζονται από το μέγεθος των νανοσωματιδίων που περιλαμβάνουν.

5.4 Σύνθεση νανοςύνθετων διηλεκτρικών υλικών

Η διαδικασία της παραγωγής των νανοςύνθετων υλικών θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη ακρίβεια καθώς οι ξεχωριστές ιδιότητες που διαθέτουν τα υλικά αυτά εξαρτώνται άμεσα από αυτή. Ο κύριος στόχος κατά την επεξεργασία των νανοςύνθετων υλικών είναι να διασφαλιστεί η ομοιόμορφη διασπορά των νανοϋλικών πλήρωσης μέσα στο υπό σύνθεση νανοςύνθετο υλικό. Η μη ομοιόμορφη διασπορά των υλικών πλήρωσης επηρεάζει σε μεγάλο ποσοστό τις ιδιότητες του τελικού υλικού και δυσχεραίνει τις μετρήσεις που αφορούν το υλικό αυτό αλλά και το σύστημα στο οποίο χρησιμοποιείται. Υπάρχουν διάφοροι τύποι υλικών πλήρωσης που χρησιμοποιούνται, όπως είναι ο πηλός, και κάθε τύπος απαιτεί διαφορετική επεξεργασία, ωστόσο η διαδικασία επεξεργασίας των νανοςύνθετων υλικών περιλαμβάνει κάποια βασικά βήματα που ακολουθούνται τα οποία δεν εξαρτώνται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά τη σύνθεση των υλικών αυτών.

Το πρώτο βήμα αφορά την αποξήρανση του νανοσωματιδίου σε κατάσταση κενού και την παρακολούθηση αυτού με τη βοήθεια της θερμοβαρυτικής ανάλυσης. Ιδιαίτερη προσοχή κατά το βήμα αυτό πρέπει να δοθεί ώστε η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την αποξήρανση να μην ξεπερνά κάποιο συγκεκριμένο όριο. Έαν η θερμοκρασία υπερβεί το όριο αυτό υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να απομακρυνθεί ο παράγοντας σύζευξης που περιλαμβάνεται στο νανοςύνθετο υλικό. Το βήμα αυτό πραγματοποιείται ώστε να διαχωριστούν τα νανοσωματίδια από το υλικό πλήρωσης. Άλλος ένας τρόπος διαχωρισμού των νανοσωματιδίων είναι η εφαρμογή σε αυτό μίας διατμητικής δύναμης ή η αύξηση των φυσικών και χημικών δυνάμεων μεταξύ των υλικών πλήρωσης και της πολυμερούς μήτρας. Το επόμενο βήμα της διαδικασίας παραγωγής των νανοςύνθετων υλικών αφορά η ανάμειξη των νανοσωματιδίων με την πολυμερή μήτρα και η σύνδεσή

τους εάν αυτό κριθεί απαραίτητο με έναν παράγοντα σύζευξης. Το τρίτο βήμα της παραγωγής αφορά τη χύτευση, το καλούπωμα ή την εξώθηση των μεμονωμένων υλικών για τον τελικό σχηματισμό του νανοσύνθετου υλικού. Κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης του νανοσύνθετου υλικού απαιτείται η εφαρμογή υψηλής διαμητρικής τάσης. Το τέταρτο βήμα είναι η αφαίρεση των παραπροϊόντων που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διαδικασία κατασκευής του νανοσύνθετου υλικού. Εάν τα παραπροϊόντα αυτά δεν αφαιρεθούν τότε μπορεί να μειώσουν την ποιότητα των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος. Μετά τη σύνθεση του νανοσύνθετου υλικού θα πρέπει να ελεγχθεί η ομοιόμορφη διασπορά του υλικού πλήρωσης σε αυτό. Ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του μικροσκοπίου μετάδοσης ηλεκτρονίων (TEM).

Ένας κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σύνθεση των νανοσύνθετων υλικών είναι η ποσότητα του υλικού πλήρωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα του υλικού πλήρωσης αυξάνεται και η πιθανότητα σχηματισμού συσσωματωμάτων. Ο σχηματισμός συσσωματωμάτων σε ένα νανοσύνθετο υλικό δεν είναι επιθυμητός καθώς αυτά μειώνουν τη διηλεκτρική αντοχή βλάβης των υλικών αυτών. Γι' αυτόν το λόγο η περιεκτικότητα των νανοσύνθετων υλικών στα υλικά πλήρωσης κρατιέται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα.

5.5 Διηλεκτρικές ιδιότητες των νανοσύνθετων υλικών

Τα νανοσύνθετα υλικά εξαιτίας των εξαιρετικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε αρκετούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ειδικότερα, στην παρούσα εργασία μελετάται η χρήση των νανοσύνθετων υλικών στην ηλεκτρική μόνωση των υψηλών τάσεων. Για την εφαρμογή των νανοσύνθετων υλικών σε αυτόν τον τομέα, τα υλικά αυτά θα πρέπει να μελετηθούν κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες τους, όπως είναι η διηλεκτρική αντοχή βλάβης (Dielectric Breakdown Strength, DBS), η σχετική επιτρεπτότητα και οι διηλεκτρικές απώλειες που εμφανίζουν καθένα από τα νανοσύνθετα υλικά, η ανάπτυξη ανεπιθύμητων διακλαδώσεων (treeing growth) και η αντοχή μερικής εκφόρτισης (Partial Discharge, PD), το φαινόμενο της ηλεκτροφωταύγειας, ο ελεύθερος όγκος που διαθέτουν τα νανοσύνθετα υλικά, η αγωγιμότητα που παρουσιάζουν αυτά τα υλικά τόσο σε χαμηλά όσο και σε υψηλά ηλεκτρικά πεδία, η συσσώρευση φορτίου διαστήματος (space charge accumulation), η εμφάνιση ενός θερμικού ρεύματος διέγερσης (Thermally Stimulated Current, TSC), η

αντίσταση σπινθηρισμού, η θερμοκρασία υαλωδούς μετάπτωσης και τέλος, η θερμική αγωγιμότητα που παρουσιάζουν τα νανοσύνθετα υλικά.

Η διηλεκτρική αντοχή βλάβης είναι μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες ενός μονωτικού υλικού. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, οι ιδιότητες των πολυμερών κυρίων νανοσύνθετων υλικών, που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρική μόνωση, καθορίζονται από τη μεγάλη επιφάνεια των υλικών πλήρωσή τους. Η διεπιφάνεια αυτή είναι υπεύθυνη για τις αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ της πολυμερούς μήτρας και των υλικών πλήρωσης σε ένα νανοσύνθετο υλικό. Η διηλεκτρική αντοχή βλάβης ενός μονωτικού νανοϋλικού εξαρτάται από την περιεκτικότητα του υλικού αυτού σε υλικό πλήρωσης. Ακόμη, και μία πολύ μικρή μεταβολή της περιεκτικότητας αυτής μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός μονωτικού υλικού με αυξημένη διηλεκτρική αντοχή βλάβης. Συνήθως στα νανοηλεκτρικά υλικά η ποσότητα των υλικών πλήρωσης δεν ξεπερνά το 5% του συνολικού βάρους του υλικού. Το γεγονός ότι η ποσότητα του υλικού πλήρωσης σε ένα νανοσύνθετο διηλεκτρικό υλικό είναι τόσο μικρή μειώνει τον κίνδυνο δημιουργίας συσσωματώματων μέσα στο υλικό. Η δημιουργία συσσωματώματων είναι ένας παράγοντας που προκαλεί μείωση της διηλεκτρικής αντοχής βλάβης των νανοσύνθετων υλικών. Ακόμη, ένα παράγοντας που ευνοεί την αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής βλάβης σε ένα νανοδιηλεκτρικό υλικό είναι η ομοιογενής διασπορά του υλικού πλήρωσης μέσα στο υλικό αυτό.

Η διηλεκτρική αντοχή βλάβης των νανοσύνθετων υλικών μπορεί να επηρεαστεί και από άλλους παράγοντες, όπως είναι η μεταβολή της τοπικής συσσώρευσης φορτίου, η μείωση του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος του υλικού πλήρωσης στο μονωτικό υλικό και η μεταβολή της μορφολογίας του πολυμερούς υλικού [51]. Επίσης, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις επιπτώσεις που έχει η σκέδαση των ηλεκτρονίων στις περιοχές υψηλού πεδίου, η παγίδευση των ηλεκτρονίων και ο ελεύθερος όγκος της πολυμερούς δομής, στη διηλεκτρική αντοχής βλάβης των νανοσύνθετων υλικών [50]. Όταν διαφορετικά στρώματα των νανοσωματιδίων που περιέχονται στο νανοσύνθετο υλικό βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους με αποτέλεσμα να επικαλύπτονται τότε μπορεί να δημιουργηθούν σε αυτές τις περιοχές ζώνες αγωγιμότητας. Αυτές οι περιοχές αγωγιμότητας μπορεί να προκαλέσουν ταχύτερο ανασυνδυασμό της φόρτισης στα νανοσύνθετα υλικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της συσσώρευσης του

φορτίου στο χώρο του νανοσωματιδίου και τη μείωση των τοπικών εσωτερικών ηλεκτρικών πεδίων. Επιπρόσθετα, η σκέδαση των ηλεκτρονίων μειώνει την κινητική ενέργεια των φορτίων με αποτέλεσμα να αποφεύγεται ο ιονισμός τους και η αύξηση του βάθους στις περιοχές-παγίδες μειώνει την κινητικότητα των φορέων φορτίου [47].

Κατά τη σύνθεση ενός νανοδιηλεκτρικού υλικού θα πρέπει να εξεταστεί εάν διαθέτει την κατάλληλη διηλεκτρική αντοχή για την εφαρμογή στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής σε ένα νανοσύνθετο υλικό γίνεται συγκρίνοντας τις διηλεκτρικές αντοχές βλάβης που εμφανίζουν δύο ή περισσότερα υλικά τα οποία αποτελούνται από την ίδια πολύμερη μήτρα αλλά από διαφορετικά υλικά πλήρωσης. Επίσης, κατά τη μελέτη της διηλεκτρικής αντοχής βλάβης είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διατηρούνται σταθεροί όλοι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία, η πίεση του αέρα και η υγρασία, καθώς μπορεί να επηρεάσουν τόσο τις μετρήσεις της συγκεκριμένης ιδιότητας αλλά μπορεί να προκαλέσουν και αλλοιώσεις στο προς εξέταση υλικό. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχής βλάβης είναι η τάση, συνεχής ή εναλλασσόμενη, που χρησιμοποιείται στις εφαρμογές της ηλεκτρικής μόνωσης. Για παράδειγμα, εάν σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται συνεχής τάσης τότε η διηλεκτρική αντοχή βλάβης του υλικού είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη χρήση εναλλασσόμενης τάσης [48].

Η σχετική επιτρεπτότητα ενός νανοδιηλεκτρικού υλικού σχετίζεται άμεσα με τους μηχανισμούς πόλωσης που αναπτύσσονται σε αυτό. Οι μηχανισμοί πόλωσης μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους κατηγορίες, όπως είναι η ηλεκτρονική, η ιονική, η διπολική και η διεπιφανειακή πόλωση. Καθένας από αυτούς τους μηχανισμούς πόλωσης έχει μία χαρακτηριστική συχνότητα χαλάρωσης. Καθώς αυξάνεται η χαρακτηριστική αυτή συχνότητα αυξάνεται οι μηχανισμοί πόλωσης που απαιτούν αρκετό χρόνο για να λειτουργήσουν θεωρούνται αμελητέοι με αποτέλεσμα να μειώνεται η σχετική επιτρεπτότητα που χαρακτηρίζει το νανοδιηλεκτρικό υλικό. Η ομοιόμορφη διασπορά του υλικού πλήρωσης στο νανοσύνθετο υλικό είναι απαραίτητη, όπως και στην περίπτωση της διηλεκτρικής αντοχής βλάβης, στην επιθυμητή μεταβολή της σχετικής επιτρεπτότητας του υλικού. Η μεταβολή της σχετικής επιτρεπτότητας ενός νανοσύνθετου υλικού εξαρτάται επίσης από το μέγεθος της διεπιφάνειας του υλικού που προκύπτει με τη προσθήκη των υλικών πλήρωσης [48]. Οι μεμονωμένες σχετικές επιτρεπτότητες των υλικών πλήρωσης σε ένα νανοσύνθετο υλικό είναι συνήθως

μεγαλύτερες από τη σχετική επιτρεπτότητα του υλικού. Γι' αυτόν το λόγο συμπεραίνεται πως η μείωση της σχετικής επιτρεπτότητας του υλικού δεν οφείλεται στα νανοσωματίδια που το απαρτίζουν. Η χαμηλή σχετική επιτρεπτότητα που διαθέτουν τα νανოსύνθετα υλικά συνθέεται με τους μηχανισμούς πόλωσης που εμφανίζονται στην πολυμερή μήτρα. Η περιορισμένη κίνηση των πολυμερικών αλυσίδων στη μήτρα του υλικού οδηγεί στη μείωση της σχετικής επιτρεπτότητας του τελικού νανοσύνθετου υλικού. Με τη σειρά της η περιορισμένη κίνηση των πολυμερικών αλυσίδων εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα του νανοσύνθετου υλικού σε υλικό πλήρωσης και την ομοιόμορφη διασπορά του. Όταν η ποσότητα του υλικού πλήρωσης κρατιέται σε χαμηλά επίπεδα τότε η σχετική επιτρεπτότητα του υλικού εξαρτάται από τη σχετική επιτρεπτότητα του υλικού πλήρωσης και από τις αλληλεπιδράσεις της πολυμερούς μήτρας με το υλικό πλήρωσης [48]. Ακόμη ένας παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τη σχετική επιτρεπτότητα ενός νανοσύνθετου διηλεκτρικού υλικού είναι η πυκνότητα του υλικού πλήρωσης μέσα στο υλικό. Η πυκνότητα του υλικού πλήρωσης καθορίζει τον αριθμό των νανοσωματιδίων που βρίσκονται στην πολυμερική μήτρα. Η μεταβολή, λοιπόν, της πυκνότητας αυτής έχει σαν αποτέλεσμα δύο νανοσύνθετα υλικά με την ίδια περιεκτικότητα σε υλικό πλήρωσης να παρουσιάζουν διαφορετικές σχετικές επιτρεπτότητες. Ορισμένοι ακόμη λόγοι που μπορεί να οδηγήσουν στην αύξηση της σχετικής επιτρεπτότητας ενός νανοσύνθετου υλικού είναι οι ατέλειες και τα μέσα διασποράς που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία σύνθεσης του υλικού.

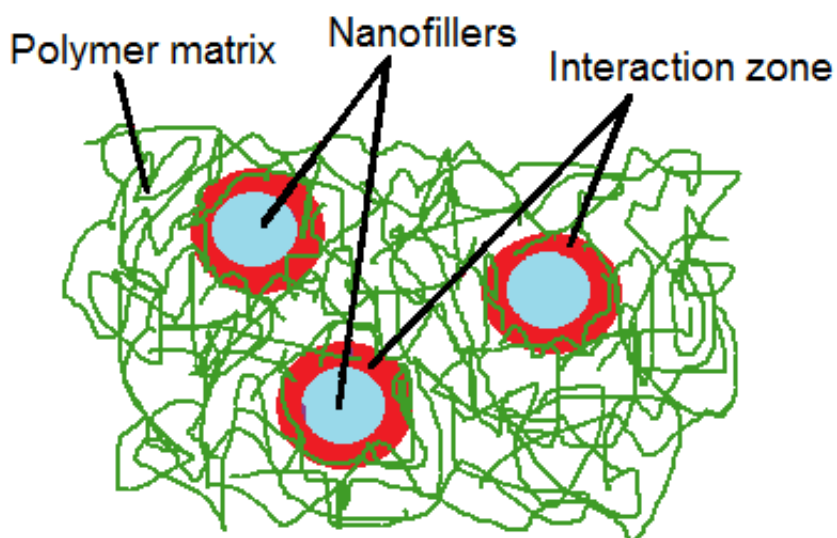
Οι διηλεκτρικές απώλειες ενός νανοσύνθετου υλικού αποτελούνται από τις απώλειες αγωγιμότητας και πόλωσης. Οι απώλειες αγωγιμότητας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, τη συχνότητα και την τάση που εφαρμόζεται στο νανοσύνθετο υλικό. Οι απώλειες πόλωσης προκύπτουν από τη μοριακή τριβή που εμφανίζεται κατά την πόλωση ενός διηλεκτρικού υλικού σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Οι διηλεκτρικές απώλειες των νανοδιηλεκτρικών υλικών είναι περίπου ίδιες με τις απώλειες του υλικού αναφοράς από το οποίο κατασκευάζονται. Μειωμένες διηλεκτρικές απώλειες σε ένα νανοσύνθετο υλικό μπορεί να εμφανιστούν εξαιτίας της μειωμένης ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάζει το υλικό αυτό.

Τόσο η σχετική επιτρεπτότητα όσο και οι διηλεκτρικές απώλειες σε ένα νανοσύνθετο υλικό εξαρτώνται από τη συχνότητα και τη θερμοκρασία. Καθώς αυξάνεται η συχνότητα, η σχετική επιτρεπτότητα του υλικού μειώνεται. Οι

διηλεκτρικές απώλειες μειώνονται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος του νανοσύνθετου υλικού. Ακόμη, ένα παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τις τιμές των δύο αυτών ιδιοτήτων είναι η υγρασία του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο βρίσκεται το νανοσύνθετο υλικό. Ο έλεγχος της υγρασίας κρίνεται απαραίτητος καθώς τα νανοσύνθετα υλικά τείνουν να απορροφούν περισσότερη υγρασία σε σχέση εξαιτίας του μεγάλου ελεύθερου όγκου που διαθέτουν.

5.6 Πολυμερή νανοδιηλεκτρικά υλικά

Τα πολυμερή νανοσύνθετα υλικά έχουν γίνει αντικείμενο έρευνας εδώ και αρκετές δεκαετίες εξαιτίας των μοναδικών ιδιοτήτων που κατέχουν. Τα πολυμερή νανοσύνθετα υλικά βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε πολλούς τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας. Στην παρούσα εργασία μελετώνται τα υλικά αυτά ως μέσα μόνωσης στα ηλεκτρικά συστήματα υψηλών τάσεων. Τα πολυμερή νανοσύνθετα υλικά αποτελούνται από τρία κύρια μέρη, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, τα οποία είναι η πολυμερής μήτρα, το υλικό πλήρωσης και η ζώνη αλληλεπίδρασης. Η ζώνη αλληλεπίδρασης βρίσκεται ανάμεσα στη μήτρα και στο υλικό πλήρωσης και είναι υπεύθυνη για τις βελτιωμένες ιδιότητες που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά [54]. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός πολυμερούς νανοσύνθετου υλικού.



Σχήμα 5.3: Το απλοποιημένο διάγραμμα ενός πολυμερούς νανοσύνθετου υλικού [54].

Η πολυμερής μήτρα μπορεί να είναι κατασκευασμένη είτε από θερμοπλαστικά, είτε από θερμοσκληρυνόμενα ή από ελαστομερή υλικά. Όσον αφορά τα υλικά πλήρωσης που χρησιμοποιούνται σε ένα πολυμερές νανοσύνθετο υλικό, αυτά μπορούν επιμέρους να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το πόσες διαστάσεις διαθέτουν τα υλικά αυτά στη νανοκλίμακα. Έτσι τα υλικά πλήρωσης μπορεί να είναι είτε μονοδιάστατα είτε δισδιάστατα, όπως είναι τα νανοκαλώδια και οι νανοσωλήνες, ή τρισδιάστατα, όπως είναι τα ανόργανα οξείδια. Στην περίπτωση της ηλεκτρικής μόνωσης τα συνηθέστερα υλικά πλήρωσης έχουν είτε μία διάσταση στη νανομετρική κλίμακα, όπως είναι τα υλικά από άργιλο (clays) και τα πυριτικά πολυεπίπεδα υλικά (layered silicates), ή τρεις διαστάσεις, όπως είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), το οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) και το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2).

Τα πολυμερή νανοσύνθετα υλικά αποτελούν το συνδυασμό των νανοσωματίδιων με τα πολυμερή υλικά, με σκοπό την ανάπτυξη των νανοσύνθετων υλικών, τα οποία διαθέτουν ξεχωριστές ιδιότητες. Για την εφαρμογή των πολυμερών νανοσύνθετων υλικών στις ηλεκτρικές μονώσεις υψηλών τάσεων μελετώνται διάφορες ηλεκτρικές ιδιότητες που εμφανίζουν. Οι κυριότερες από αυτές είναι η διηλεκτρική αντοχή βλάβης, η επιτρεπτότητα του υλικού, η μερική αντίσταση εκφόρτισης και η αντοχή των γραμμών μεταφοράς (tracking resistance).

Η μελέτη των πολυμερών νανοσύνθετων υλικών για τη χρήση τους στις εφαρμογές της ηλεκτρικής μόνωσης ξεκίνησε από τους Henk και Nelson αντίστοιχα [54]. Οι δύο αυτοί επιστήμονες τόνισαν τις ασυνήθιστες μέχρι τότε ιδιότητες που παρουσίασαν τα πολυμερή νανοσύνθετα υλικά σε σχέση με αυτές των πολυμερών μικροσύνθετων υλικών, τα οποία είναι πολυμερή σύνθετα υλικά στα οποία έχει γίνει προσθήκη μικρο-υλικών πλήρωσης. Μία από τις σημαντικότερες αλλαγές στις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών κατά τη μετάβαση από τα μικρο-σύνθετα στα νανοσύνθετα πολυμερή υλικά είναι η βελτίωση της διηλεκτρικής αντοχής βλάβης των νανοσύνθετων υλικών. Εκτός από αυτήν την ιδιότητα και οι υπόλοιπες ηλεκτρικές ιδιότητες, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, παρουσιάζονται βελτιωμένες κατά την ανάπτυξη των πολυμερών νανοσύνθετων υλικών. Η ζώνη αλληλεπίδρασης σε ένα νανοσύνθετο πολυμερές υλικό και οι μηχανισμοί μεταφοράς των φορτίων σε αυτό φαίνεται να είναι οι δύο κύριοι παραγόντες για τη μεγάλη μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού αυτού κατά τη μετάβασή του από τη μικροκλίμακα στη νανοκλίμακα.

5.6.1 Αντοχή της γραμμής μεταφοράς

Στον τομέα της υψηλής τάσης, η δημιουργία ανεπιθύμητων αγωγίμων μονοπατιών (tracking), είναι μία διαδικασία κατά την οποία σχηματίζεται ένα μόνιμο αγωγίμο μονοπάτι κατά μήκος του συστήματος μόνωσης εξαιτίας της επιφανειακής διάβρωσης των μονωτικών υλικών όταν σε ένα ηλεκτρικό σύστημα εφαρμόζεται μία υψηλή τάση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί σε όλους τους πολυμερικούς μονωτές που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξωτερικές εφαρμογές. Αυτό συμβαίνει επειδή οι πολυμερικοί πυκνωτές επικαλύπτονται όταν βρίσκονται στο εξωτερικό περιβάλλον από ένα στρώμα σκόνης ή υγρασίας, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία αγωγίμη λεπτή μεμβράνη στην επιφάνεια τους. Μόλις κάποια τάση εφαρμοστεί στο ηλεκτρικό σύστημα, η λεπτή μεμβράνη διαρρέεται από ρεύμα, προκαλώντας την παραγωγή θερμότητας στην επιφάνεια και τελικά την ξήρανση της. Η ξήρανση της επιφάνειας του μονωτικού υλικού με τη σειρά της οδηγεί στο διαχωρισμό της λεπτής μεμβράνης και στη δημιουργία σπινθηρισμών, οι οποίοι και τελικά καταστρέφουν την επιφάνεια του μονωτή. Αφού τα πολυμερή είναι οργανικά μονωτικά υλικά, στην περιοχή όπου δημιουργούνται οι σπινθηρισμοί τα διηλεκτρικά απανθρακώνονται. Οι απανθρακωμένες αυτές περιοχές λειτουργούν πλέον ως μόνιμα αγωγίμα κανάλια με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση στο υπόλοιπο τμήμα του μονωτή. Η διαδικασία αυτή είναι αθροιστική και τελικά οδηγεί σε βλάβη του μονωτικού συστήματος όταν απανθρακωθεί το όλο το μονωτικό υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί.

Η αποτελεσματική μόνωση των γραμμών μεταφοράς σε ένα σύστημα υψηλής τάσης αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα για τους επιστήμονες, οι οποίοι αναζητούν τρόπους ώστε να αυξήσουν την αντοχή των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιώντας βελτιωμένα πολυμερή διηλεκτρικά, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τη διάρκεια ζωής του ηλεκτρικού συστήματος υψηλής τάσης. Μία πρώτη προσέγγιση βελτίωσης των πολυμερών διηλεκτρικών ήταν η προσθήκη ανόργανων υλικών πλήρωσης στα πολυμερή υλικά και ο σχηματισμός των μικροσύνθετων πολυμερών υλικών.

Η επόμενη γενιά πολυμερών διηλεκτρικών είναι τα πολυμερή νανοδιηλεκτρικά, τα οποία αναπτύχθηκαν χάρη στις ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της νανοτεχνολογίας. Αν και η μελέτη πάνω στα νανοςύνθετα πολυμερή διηλεκτρικά είναι ακόμη σε αρχικό στάδιο, ωστόσο έχει διαφανεί ο σημαντικός ρόλος τους για την βελτίωση της αντοχής των γραμμών μεταφοράς σε ένα ηλεκτρικό σύστημα υψηλής τάσης. Ένα παράδειγμα νανοδιηλεκτρικού υλικού που έχει μελετηθεί είναι η σιλικόνη στην οποία έχει γίνει

προσθήκη νανοσωματιδίων πυριτίου. Το υλικό αυτό παρουσίασε βελτιωμένη αντοχή διάβρωσης της γραμμής μεταφοράς σε σχέση με το αντίστοιχο μικρο-σύνθετο υλικό σιλικόνης. Παρατηρήθηκε ακόμη, ότι μία μικρή ποσότητα υλικού πλήρωσης στο νανοςύνθετο υλικό περίπου 5% του συνολικού βάρους του υλικού είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί η διαβρώμενη ποσότητα του διηλεκτρικού σε σχέση με το αντίστοιχο μικρο-σύνθετο υλικό στο οποίο το υλικό πλήρωσης κατείχε το 30% του συνολικού βάρους του.

5.6.2 Απόδοση μερικής εκφόρτισης

Η μερική εκφόρτιση είναι ακόμη μία διαδικασία που συμβαίνει επίσης σε όλους τους τύπους των πολυμερών διηλεκτρικών. Κατά τη διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μία τοπική μερική εκφόρτιση ώστε να γεφυρωθεί μερικώς μόνο η μόνωση μεταξύ των αγωγών. Η διαδικασία αυτή δεν είναι απαραίτητο να λάβει χώρα δίπλα σε έναν αγωγό. Οι μερικές εκφορτίσεις οφείλονται στις συγκεντρώσεις τοπικής ηλεκτρικής έντασης μέσα στο μονωτικό σύστημα ή στην επιφάνεια του.

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι μερικής εκφόρτισης [54]. Αυτοί είναι η εσωτερική εκφόρτιση, η επιφανειακή εκφόρτιση, το φαινόμενο Corona και η δημιουργία ηλεκτρικών διακλαδώσεων (treeing). Η εσωτερική εκφόρτιση συμβαίνει σε κλειστές κοιλότητες, οι οποίες παρουσιάζουν μειωμένη διηλεκτρική αντοχή και είναι γεμάτες με κάποιο αέριο. Αυτός ο τύπος εκφόρτισης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός μονωτικού συστήματος. Η επιφανειακή εκφόρτιση εάν υπάρχει κάποια συνιστώσα πίεσης παράλληλη με τη διηλεκτρική επιφάνεια. Αυτού του είδους η εκφόρτιση μπορεί να επεκταθεί και πέρα από την περιοχή όπου δημιουργείται, ωστόσο είναι λιγότερο συγκεντρωτική και επικίνδυνη από την εσωτερική εκφόρτιση. Η εκφόρτιση που οφείλεται στο φαινόμενο Corona συμβαίνει κυρίως όταν χρησιμοποιείται ο αέρας ως κύριο μονωτικό υλικό και σε συνθισμένες καταστάσεις δε μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στο ηλεκτρικό σύστημα υψηλής τάσης. Τέλος, η δημιουργία ηλεκτρικών διακλαδώσεων οφείλεται σε μία σειρά από εσωτερικές εκφορτίσεις.

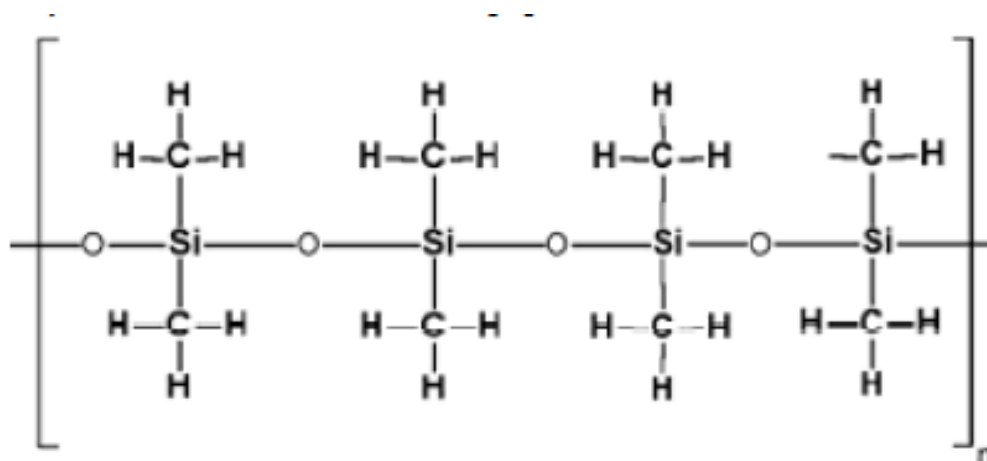
Τα χαρακτηριστικά μερικής εκφόρτισης των πολυμερών νανοςύνθετων υλικών έχουν γίνει αντικείμενο μελέτης από πολλούς επιστήμονες, καθώς η διαδικασία μερικής εκφόρτισης μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες σε ένα διηλεκτρικό σύστημα υψηλής τάσης. Προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν μελετηθεί τα εποξειδικά και τα

πολυαμίδη νανοςύνθετα υλικά στα οποία ως υλικά πλήρωσης έχουν χρησιμοποιηθεί τα πυριτικά πολυεπίπεδα υλικά. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών έδειξαν ότι η προσθήκη μίας μικρής ποσότητας από το υλικό πλήρωσης μπορεί να βελτιώσει αισθητά την αντοχή των υλικών αυτών στις ηλεκτρικές εκφορτίσεις που συμβαίνουν σε ένα διηλεκτρικό σύστημα.

5.7 Κατηγορίες πολυμερών βάσης για τις διηλεκτρικές εφαρμογές υψηλών τάσεων

5.7.1 Σιλικόνη

Η σιλικόνη (silicon rubber) είναι ένα πολυμερές υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και αρκετές δεκαετίες για τη μόνωση των ηλεκτρικών συστημάτων υψηλών τάσεων. Μετά την ανάπτυξη των νανοςύνθετων υλικών η σιλικόνη έχει χρησιμοποιηθεί ως πολυμερές βάσης με μία σειρά από διαφορετικά υλικά πλήρωσης με σκοπό τη δημιουργία νανοςύνθετων διηλεκτρικών, τα οποία παρουσιάζουν βελτιώμενες ιδιότητες μόνωσης σε σχέση με την απλή σιλικόνη. Το βασικό πολυμερές στοιχείο για τη σιλικόνη είναι η πολυδιμεθισιλοξάνη (polydimethylsiloxane, PDMS), της οποίας η χημική δομή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4. Οι ομάδες αυτές υδρογονανθράκων μεθυλίου είναι υδρόφοβες και υδατοαπωθητικές. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα που παρουσιάζει η σιλικόνη είναι ότι μπορεί να διατηρεί την υδροφοβικότητα της ακόμη και όταν η επιφάνεια του υλικού έχει επικαλυφθεί από ένα στρώμα σκόνης και άλλων ανεπιθυμητών ουσιών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επιτυχημένη καταστολή της ανάπτυξης ρευμάτων διαρροής και ηλεκτρικών σπινθηρισμών [55].



Σχήμα 5.4: Αναπαράσταση της χημικής δομής της πολυδιμεθισιλοξάνης [55].

Η παραπάνω υδρόφοβη ιδιότητα οφείλεται στη μεταφορά του χαμηλού μοριακού βάρους από την εσωτερική μάζα του υλικού στην επιφάνεια του και από την επακόλουθη διαδικασία προσρόφησης των ρυπογόνων ουσιών. Η προσρόφηση αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε με χημική ή φυσικό τρόπο. Η μικροσκοπική διάχυση του υγρού στην επιφάνεια του υλικού αυτού χρησιμεύει για την ενσωμάτωση των ρυπογόνων ουσιών στην επιφάνεια του υλικού και την αποφυγή απορρόφησης υγρασίας. Οι χημικές ουσίες των ρυπογόνων ουσιών που προσροφώνται μπορούν να επηρεάσουν την ικανότητα μεταφοράς της υδροφοβικότητας από την εσωτερική μάζα του υλικού προς την επιφάνεια του [55].

Ορισμένοι παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν στην ολική ή μερική απώλεια της υδροφοβικότητας του υλικού αυτού, στη μειωμένη αντοχή στη διάβρωση και στην υποβάθμιση της ποιότητας της επιφάνειας του είναι η πυκνή ομίχλη, η βροχή, η όξινη βροχή, κ.τ.λ. Η απώλεια της υδροφοβικότητας γενικά σε ένα πολυμερή διηλεκτρικό μπορεί να επηρεαστεί από τρεις βασικούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί είναι η ηλεκτρική εκφόρτιση που παρατηρείται σχεδόν σε όλα τα διηλεκτρικά μέσα (π.χ., δημιουργία ηλεκτρικού τόξου, φαινόμενο Corona, κ.τ.λ.), η προσρόφηση στο διηλεκτρικό υλικό πολλαπλών στρωμάτων ρυπογόνων ουσιών και τέλος η έκθεση του διηλεκτρικού υλικού σε υπεριώδη ακτινοβολία.

Στις σημερινές εφαρμογές υψηλών τάσεων χρησιμοποιούνται δύο τύποι σιλικόνης, μία υψηλής θερμοκρασίας βουλκανισμού (high temperature vulcanizing, HTV) και μία θερμοκρασίας περιβάλλοντος βουλκανισμού (room temperature vulcanizing, RTV). Η υψηλής θερμοκρασίας βουλκανισμού σιλικόνη βρίσκει εφαρμογή σε εξωτερικές εφαρμογές ηλεκτρικής μόνωσης και χρησιμοποιείται κυρίως ως προστατευτικό μέσο των ηλεκτρικών συστημάτων υψηλής τάσης από τα διάφορα καιρικά φαινόμενα. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος βουλκανισμού σιλικόνη χρησιμοποιείται κυρίως ως μία υδρόφοβη επίστρωση σε κεραμικές διηλεκτρικές επιφάνειες με σκοπό την προστασία των επιφανειών αυτών από διάφορες ρυπογόνες ουσίες. Το κύριο πρόβλημα, που αντιμετωπίζουν και οι δύο τύποι σιλικόνης είναι ότι εξαιτίας των υψηλών εντάσεων που εμφανίζονται σε ένα ηλεκτρικό σύστημα, από την ανάπτυξη για παράδειγμα του ηλεκτρικού πεδίου και από την εμφάνιση ρευμάτων διαρροής, και εξαιτίας διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως είναι η υπεριώδης ακτινοβολία, η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, διάφορες ρυπογόνες

ουσίες και η όξινη βροχή, καταπονούνται αρκετά με αποτέλεσμα να απαιτείται η συχνή αντικατάστασή τους.

Από την άλλη μεριά, εάν η σιλικόνη χρησιμοποιηθεί ως ένα υλικό βάσης για τη σύνθεση νανοσύνθετων διηλεκτρικών υλικών και χρησιμοποιηθεί και το κατάλληλο υλικό πλήρωσης τότε παρατηρείται αύξηση της διάρκειας ζωής της εξαιτίας της βελτιωμένης αντοχής στη διαβρωση που εμφανίζει. Ένα ζήτημα που πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω είναι η ποσότητα του υλικού πλήρωσης που θα χρησιμοποιηθεί γιατί καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του νανοσύνθετου διηλεκτρικού σε υλικό πλήρωσης μπορεί να μειωθούν οι υδροφοβικές ιδιότητες που παρουσιάζει η σιλικόνη.

5.7.2 Εποξειδικά υλικά

Το εποξύ και τα σύνθετα υλικά που έχουν ως βάση τους το υλικό αυτό χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε εφαρμογές ηλεκτρικής μόνωσης και πιο συγκεκριμένα στις ηλεκτρικές εφαρμογές μόνωσης των συστημάτων υψηλής τάσης. Τα εποξείδια ανήκουν στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Τα υλικά αυτά στη ρευστή τους μορφή εμφανίζονται σαν μόρια μιας μεγάλης αλυσίδας. Κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως είναι για παράδειγμα υπό συγκεκριμένη θερμοκρασία ή πίεση, τα υλικά αυτά έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν τη μορφή τους, π.χ αυξάνεται η σκληρότητά τους. Η μορφή που θα αποκτήσουν τα εποξείδια κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τους δεν μπορεί εκ νεού να μεταβληθεί [56]. Όπως έγινε σαφές και στην περίπτωση της σιλικόνης, οι ηλεκτρικές ιδιότητες που εμφανίζουν τα υλικά αυτά μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με τη προσθήκη σε αυτά κάποιων υλικών πλήρωσης.

Οι διηλεκτρικές ιδιότητες των εποξειδικών νανοσύνθετων υλικών έχουν μελετηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια. Οι μελέτες αυτές έχουν δείξει ότι η σχετική επιτρεπτότητα και οι διηλεκτρικές απώλειες των νανοσύνθετων υλικών, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται υλικά πλήρωσης, όπως είναι τα διηλεκτρικά οξειδία ή τα πολυεπίπεδα πυριτικά υλικά, είναι μειωμένες σε σχέση με αυτές του καθαρού εποξειδίου ή των μικρόσυνθετων εποξειδικών υλικών [57]. Ακόμη, ένα νανοσύνθετο εποξειδικό σύστημα παρουσιάζει υψηλή επιτρεπτότητα στις χαμηλές συχνότητες και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα με χαμηλά κατώφλια διήθησης όταν σε αυτό διαχέονται αγωγιμα υλικά πλήρωσης [57].

5.8 Υλικά πλήρωσης των νανοσύνθετων διηλεκτρικών υλικών

Τα υλικά πλήρωσης σε ένα προστίθενται σε ένα πολυμερές υλικό με σκοπό τη βελτίωση συγκεκριμένων ιδιοτήτων του και τη μείωση του κόστους παραγωγής του. Η βελτίωση των ιδιοτήτων ενός πολυμερούς νανοσύνθετου διηλεκτρικού υλικού εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες που αφορούν το υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο διηλεκτρικό. Πιο συγκεκριμένα, οι παράγοντες αυτοί είναι η συγκέντρωση του υλικού πλήρωσης μέσα στο νανοσύνθετο διηλεκτρικό υλικό, η μορφολογία του υλικού πλήρωσης, ο βαθός διασποράς και ο προσανατολισμός του υλικού πλήρωσης μέσα στη πολυμερή μήτρα και ο βαθμός σύνδεσης του υλικού πλήρωσης με τις πολυμερικές αλυσίδες της μήτρας [55]. Η μορφολογία του υλικού πλήρωσης αναφέρεται στο μέγεθος των σωματιδίων που είναι τοποθετημένα στην πολυμερή μήτρα και στη δομή τους. Επιγραμματικά, αναφέρονται οι ιδιότητες των πολυμερών νανοσύνθετων υλικών, οι οποίες μπορούν να μεταβληθούν εξαιτίας της προσθήκης στα υλικά αυτά ενός κατάλληλου υλικού πλήρωσης. Οι ιδιότητες αυτές είναι η βελτίωση της υδροφοβικότητας της επιφάνειας ενός νανοσύνθετου υλικού, η βελτιωμένη ηλεκτρική αγωγιμότητα, η αυξημένη σχετική επιτρεπτότητα και η βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες κατηγορίες υλικών πλήρωσης, τα οποία χρησιμοποιούνται σε διηλεκτρικές εφαρμογές. Οι κύριες κατηγορίες των υλικών πλήρωσης είναι τα υλικά ανόργανων οξειδίων (inorganic oxide materials), τα ανθρακούχα υλικά (carbonaceous materials), τα οργανικά υλικά και τα μέταλλα [55]. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι σημαντικότεροι εκπρόσωποι των τεσσάρων αυτών κατηγοριών.

5.8.1 Υλικά ανόργανων οξειδίων

Στην κατηγορία αυτή των υλικών πλήρωσης περιλαμβάνεται το τριυδρικό οξείδιο του αργιλίου (alumina trihydrate) και το διοξείδιο του πυριτίου (silica). Το τριυδρικό οξείδιο του αργιλίου χρησιμοποιείται συνήθως ως υλικό πλήρωσης στη σιλικόνη. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται για την αύξηση της αντοχής των γραμμών μεταφοράς και επιβραδυντικό φλόγας στα μονωτικά υλικά. Το τριυδρικό οξείδιο του αργιλίου ακόμη, μετά από πειραματικές δοκιμές, φαίνεται να αυξάνει την αντοχή των νανοσύνθετων διηλεκτρικών υλικών τόσο όσον αφορά τη διάβρωση αλλά και την ανεπιθύμητη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου. Το διοξείδιο του πυριτίου το οποίο χαρακτηρίζεται ως

ένα υλικό πλήρωσης ημι-ενίσχυσης, βελτιώνει τις φυσικές κυρίως ιδιότητες των νανοσύνθετων υλικών από σιλικόνη. Η βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών αυτών επιτυγχάνεται λόγω των ισχυρών μοριακών δεσμών που αναπτύσσονται στην πολυμερή σιλικόνη. Η θερμική αγωγιμότητα του νανοσύνθετου υλικού εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα, τη συγκέντρωση των δύο αυτών υλικών πλήρωσης, το μέγεθός τους και από τους δεσμούς που αναπτύσσονται μεταξύ των συγκεκριμένων υλικών και της μήτρας από σιλικόνη. Η μελέτη της θερμικής αγωγιμότητας σε ένα νανοσύνθετο υλικό με υλικά πλήρωσης το τριωδικό οξείδιο του αργιλίου και το διοξείδιο του πυριτίου φαίνεται να είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει το δείκτη της αντοχής διάβρωσης του υλικού.

Ακόμη, ένα ανόργανο οξείδιο το οποίο χρησιμοποιείται ως υλικό πλήρωσης στα νανοσύνθετα διηλεκτρικά υλικά είναι το οξείδιο του ψευδαργύρου (zinc oxide, ZnO). Το οξείδιο του ψευδαργύρου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος συμπεριφέρεται ως ένα ημιαγωγικό υλικό. Όταν χρησιμοποιείται το υλικό αυτό ως υλικό πλήρωσης σε νανοσύνθετο υλικό αυξάνει τη σχετική επιτρεπτότητα και τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Επίσης, το οξείδιο του ψευδαργύρου όταν προστεθεί στη σιλικόνη βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες της.

Ως υλικό πλήρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το οξείδιο του τιτανίου (titanium oxide, TiO₂). Το οξείδιο του τιτανίου λειτουργεί ως ημιαγωγός και παρουσιάζει υψηλή φωτοκαταλυτική ικανότητα. Εξαιτίας των σταθερών ιδιοτήτων του και του χαμηλού κόστους παραγωγής του το οξείδιο του τιτανίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό πλήρωσης στα πολυμερικά υλικά για να αυξήσει την αντοχή τους. Ακόμη, η χρήση του οξειδίου του τιτανίου βελτιώνει τις θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των πολυμερών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια αυτού του υλικού πλήρωσης επιτυγχάνεται μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και σχετική επιτρεπτότητα των πολυμερών υλικών.

Ακόμη ένα υλικό πλήρωσης της κατηγορίας των ανόργανων οξειδίων είναι το ανθρακικό ασβέστιο (Calcium carbonate). Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το υλικό αυτό είναι το χαμηλό κόστος επεξεργασίας του και η αφθονία του υλικού αυτού στο φυσικό κόσμο. Τα νανοϋλικά που πρόερχονται από το ανθρακικό ασβέστιο διαθέτουν μεγάλη επιφάνεια γεγονός που το καθιστά ικανό να χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας ενίσχυσης σε ένα νανοσύνθετο υλικό. Ακόμη, το υλικό αυτό λειτουργεί ως μονωτής, διαθέτει μεγάλο ενεργειακό διάκενο και υψηλή διηλεκτρική σταθερά

(περίπου 8.19). Το ανθρακικό ασβέστιο μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές και ρεολογικές ιδιότητες ενός νανοσύνθετου διηλεκτρικού καθώς επίσης μπορεί να λειτουργήσει και ως επιβραδυντικό φλόγας για το υλικό αυτό.

Το τιτανικό βάριο (barium titanate, $BaTiO_3$) χρησιμοποιείται κυρίως ως υλικό πλήρωσης σε κεραμικά υλικά. Δύο από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του υλικού αυτού είναι η υψηλή διηλεκτρική σταθερά του και η υψηλή διηλεκτρική αντοχή βλάβης του. Εξαιτίας των παραπάνω ιδιοτήτων το τιτανικό βάριο έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται και ως υλικό πλήρωσης στα πολυμερή νανοσύνθετα υλικά. Η προσθήκη του τιτανικού βαρίου σε ένα πολυμερές υλικό βελτιώνει τη θερμική σταθερότητα του υλικού. Ακόμη, ανάλογα με την ποσότητα που προστίθεται σε ένα πολυμερές υλικό διαμορφώνεται και η διηλεκτρική σταθερά του νανοσύνθετου υλικού.

5.8.2 Ανθρακούχα υλικά

Τα σωματίδια αιθάλης χρησιμοποιούνται ευρέως ως αγώγιμα υλικά πλήρωσης στα πολυμερή υλικά. Τα αγώγιμα αυτά σωματίδια προστίθενται σε μία πολυμερή μήτρα με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα δίκτυο το οποίο άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Ωστόσο, τα σωματίδια αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί ως χρησιμοποιηθεί και ως επικαλύψεις σε υψηλής τάσης μονωτές από πορσελάνη. Η επικάλυψη των μονωτών με αυτά τα υλικά αυξάνει την αντοχή των μονωτών ενάντια στη διάβρωση καθώς παρατηρηθήκε ότι λειτουργούσαν αρκετά καλά σε αρκετά μολυσμένες συνθήκες. Ακόμη, η χρήση των σωματιδίων αιθάλης στους ηλεκτρικούς μονώτες υψηλής τάσης, οδηγεί στην άυξηση της τάσης στην οποία αρχίζουν να δημιουργούνται σπινθηρισμοί στο μονωτικό σύστημα.

Ο φυσικός γραφίτης παρουσιάζει εξαιρετικές ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες. Ο γραφίτης είναι ένα υλικό το οποίο αποτελείται από διαφορετικά στρώματα άνθρακα. Τα άτομα του άνθρακα συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς ενώ τα διαφορετικά επίπεδα γραφίτη συνδέονται μεταξύ τους με δεσμούς Van der Waals, οι οποίοι είναι ασθενέστεροι. Αυτή η σύνδεση των ατόμων του άνθρακα και των επιπέδων του γραφίτη επιτρέπει την ένωση περαμβολής. Ο γραφίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό πλήρωσης στη σιλικόνη έτσι ώστε να βελτιώσει τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες της.

5.8.3 Μεταλλικά υλικά

Τα μεταλλικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, επίσης ως υλικά πλήρωσης, σε μία πολυμερή μήτρα. Με την προσθήκη ορισμένων μεταλλικών νανοσωματιδίων, όπως είναι το νικέλιο, ο σίδηρος, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και το αλουμίνιο μέσα στο πολυμερές νανოსύνθετο υλικό βελτιώνονται οι θερμικές και ηλεκτρικές αγωγιμότητες των σύνθετων υλικών. Ακόμη, έχει μελετηθεί η επίδραση της προσθήκης σωματιδίων από σίδηρο, ασήμι και ψευδάργυρο με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των νανοςύνθετων υλικών. Επίσης, στην περίπτωση της προσθήκης αλουμινίου σε εποξειδικά νανοςύνθετα υλικά παρατηρήθηκε αύξηση της διηλεκτρικής τους σταθεράς.

5.8.4 Οργανικά υλικά

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο οργανικό υλικό πλήρωσης είναι ο οργανικός μοντμοριλλονίτης (organic montmorillonite, OMMT). Η σύνθεση του οργανικού αυτού υλικού αρχικά έγινε για να αντικαταστάσει του αεροπυριτίου (aerosilica) ένα υλικό πλήρωσης η κατασκευή του οποίου έχει πολύ μεγάλο κόστος και επιπλέον έχει κριθεί ότι είναι επικίνδυνο για τους ανθρώπους. Ο οργανικός μοντμοριλλονίτης είναι ένα υλικό πλήρωσης το οποίο φαίνεται να βελτιώνει κυρίως τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού στο οποίο προστίθεται. Ακόμη, η σύνθεση ενός πολυμερούς νανοςύνθετου υλικού με μοντμοριλλονίτη συνεπάγεται υψηλότερη θερμική σταθερότητα, άριστες μηχανικές ιδιότητες και φλογοεπιβραδυντικές ιδιότητες.

5.9 Διηλεκτρικά νανορευστά

Τα νανορευστά είναι μία νέα κατηγορία ρευστών τα οποία κατασκευάζονται με τη διασπορά νανοϋλικών (π.χ. νανοσωματιδίων, νανοϊνών, νανοσωλήνων, νανοκαλωδίων, κ.τ.λ.) σε ένα ρευστό βάσης. Με άλλα λόγια, ως νανορευστά θεωρούνται τα κολλοειδή εναιωρήματα τα οποία περιέχουν συμπυκνωμένα νανοϋλικά. Τα νανορευστά χαρακτηρίζονται επίσης ως συστήματα δύο φάσεων με τη μία φάση (στερεή φάση) να βρίσκεται μέσα στην άλλη (υγρή φάση). Ένα σημαντικό ζήτημα που αφορά την ανάπτυξη των νανορευστών είναι η σταθερότητα που παρουσιάζουν. Τα νανορευστά, γενικά, διαθέτουν βελτιωμένες θερμοφυσικές ιδιότητες, όπως είναι η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική διάχυση, κ.τ.λ. σε σχέση με τα ρευστά βάσης τους, που μπορεί να είναι το νερό ή κάποιο έλαιο. Εξαιτίας των βελτιωμένων ιδιοτήτων τους τα νανορευστά φαίνεται να βρίσκουν αρκετές εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Ενδεικτικά

αναφέρονται ότι τα νανορευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ηλεκτρονική, στις μεταφορές, στη μεταφορά θερμότητας, στις βιομηχανικές εφαρμογές ψύξης, στη θέρμανση των κτιρίων, στα πυρηνικά συστήματα ψύξης αλλά και στην ηλεκτρική μόνωση υψηλών τάσεων. Στον τελευταίο τομέα, έχει αρχίσει να μελετάται η αντικατάσταση των παραδοσιακών μονωτικών ελαίων με διηλεκτρικά νανορευστά.

Στον τομέα της ηλεκτρικής μόνωσης υψηλών τάσεων εκτός από τα στερεά διηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται και ρευστά διηλεκτρικά, όπως είναι το έλαιο μετασχηματισμού ή αλλιώς μονωτικό έλαιο. Τα μονωτικά έλαια χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις ηλεκτρικές εφαρμογές μόνωσης εξαιτίας του χαμηλού κόστους παρασκευής τους και των πολύ καλών θερμικών χαρακτηριστικών τους. Η χρήση μονωτικών ελαίων για τη μόνωση των ηλεκτρικών συστημάτων απαιτεί την κατασκευή μίας στεγανής θήκης στην οποία θα τοποθετηθεί το μονωτικό έλαιο. Το στεγανό αυτό περίβλημα θα πρέπει να είναι με τέτοιο τρόπο κατασκευασμένο ώστε να λαμβάνεται υπόψη η τυχόν διαστολή και συστολή του ελαίου μέσα σε αυτό. Ένα κύριο πρόβλημα που παρουσιάζουν τα παραδοσιακά μονωτικά έλαια είναι η μείωση των θερμικών και μονωτικών χαρακτηριστικών τους εξαιτίας της δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου από το ηλεκτρικό σύστημα υψηλής τάσης και της συσσώρευσης ξένων υλικών από τον περιβάλλοντα χώρο. Εκτός από την ηλεκτρική μόνωση υψηλών τάσεων τα μονωτικά έλαια χρησιμοποιούνται και ως μέσο ψύξης συσκευών ισχύος.

Η ευρεία χρήση των μονωτικών ελαίων στις παραπάνω εφαρμογές οδηγεί στη μελέτη και στην ανάπτυξη νέων τύπων μονωτικών ελαίων με βελτιωμένα θερμικά και διηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Ένα σημαντικό βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση έγινε με την ανάπτυξη των διηλεκτρικών νανορευστών. Τα υλικά αυτά κατασκευάζονται με την προσθήκη εναιωρημάτων νανοσωματιδίου στο μονωτικό έλαιο, με σκοπό τη βελτίωση ορισμένων θερμικών και διηλεκτρικών χαρακτηριστικών του.

Μία προσπάθεια ανάπτυξης ενός τέτοιου βελτιωμένου μονωτικού ελαίου έγινε από τον Segal [58] και τους συναδέλφους του. Αυτοί μελέτησαν ένα έλαιο μετασχηματισμού, στο οποίο έχει γίνει προσθήκη νανοσωματιδίων μαγνητίτη. Ο σκοπός της ερευνητικής αυτής διαδικασίας ήταν για να μελετηθεί η δυνατότητα εφαρμογής τους στην ψύξη του πυρήνα ενός μετασχηματιστή. Το νανορευστό μαγνητίτη φαίνεται να παρουσιάζει διπλάσια τάση διάσπασης για θετικά μέτωπα εκκένωσης σε σχέση με το αντίστοιχο μονωτικό έλαιο από το οποίο παράχθηκε. Ένα ηλεκτρικό μέτωπο εκκένωσης είναι ένα φαινόμενο το οποίο συμβαίνει σε ένα

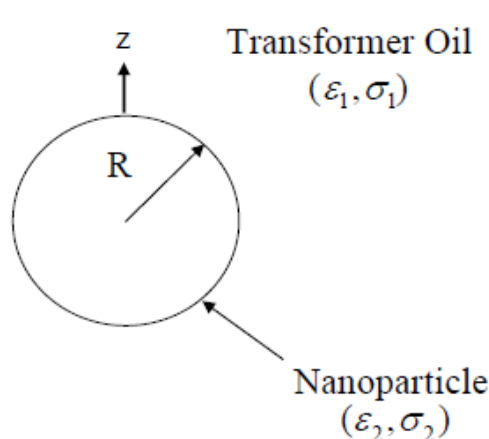
ηλεκτρικό σύστημα ακριβώς πριν τη δημιουργία του ηλεκτρικού τόξου, στο οποίο οφείλονται οι περισσότερες βλάβες του συστήματος αυτού [59]. Ακόμη, κατά τη δοκιμή του ναορευστού μαγνητίτη παρατηρήθηκε μείωση της ταχύτητας διάδοσης των θετικών μετώπων εκκένωσης, η οποία οφείλεται στην παρουσία των ναοσωματιδίων στο ναορευστό. Η μείωση της ταχύτητας μετάδοσης του μετώπου εκκένωσης, πρακτικά σημαίνει πως για να διασχίσει ένα μετώπο εκκένωσης το κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων του συστήματος και να προκαλέσει βλάβη σε αυτό απαιτείται περισσότερος χρόνος. Η αύξηση του χρόνου αυτού είναι αρκετή ώστε ο εφαρμοζόμενος παλμός τάσης, που είναι υπεύθυνος για τη βλάβη, να αποσβεστεί. Η παρουσία, λοιπόν, ναοσωματιδίων μαγνητίτη στο μονωτικό έλαιο αναστέλλει τις διαδικασίες, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την ηλεκτρική βλάβη του συστήματος.

5.9.1 Ηλεκτροδυναμική ανάλυση των διηλεκτρικών ναορευστών

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των διηλεκτρικών ναορευστών σε ένα ηλεκτρικό σύστημα υψηλής τάσης έχει αναπτυχθεί μία ολοκληρωμένη, ηλεκτροδυναμική ανάλυση. Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή τα αγωγίμα ναοσωματίδια σε ένα ηλεκτρικά κατοπονημένο διηλεκτρικό ρευστό δεσμεύουν τα γρήγορα ηλεκτρόνια μετατρέποντας τα σε αργά φορτισμένα σωματίδια [58]. Εξαιτίας της χαμηλής κινητικότητας των ναοσωματιδίων αυτών παρεμποδίζεται η ανάπτυξη μίας ζώνης φόρτισης στην κορυφή του μετώπου εκκένωσης. Με αυτόν τον τρόπο καταστέλλεται το πολλαπλασιαστικό κύμα του ηλεκτρικού πεδίου το οποίο είναι απαραίτητο για τη γρήγορη μετάδοση του μετώπου εκκίνησης μέσα στο μονωτικό έλαιο. Μία γενική έκφραση για τα δυναμικά φόρτισης ενός ναοσωματιδίου σε μονωτικό έλαιο με πεπερασμένη αγωγιμότητα χρησιμοποιείται για να δείξει η παγίδευση των «γρήγορων» ηλεκτρονίων από τα «αργά» ναοσωματίδια προκαλεί τη μείωση της ταχύτητας εξάπλωσης του θετικού μετώπου εκκένωσης και κατά συνέπεια την αύξηση της τάσης διάσπασης σε ένα διηλεκτρικό ναορευστό. Η ηλεκτροδυναμική μελέτη που παρουσιάζεται παρακάτω βασίζεται στο γεγονός ότι όταν εφαρμοστεί μία τάση σε ένα μονωτικό έλαιο τότε προκαλείται ιονισμός των μορίων του ελαίου σε θετικά ιόντα και γρήγορα ηλεκτρόνια. Τα γρήγορα ηλεκτρόνια προκαλούν ένα πολλαπλασιαστικό κύμα ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό στην εξάπλωση του μετώπου εκκένωσης και στη μόνιμη ηλεκτρική βλάβη του συστήματος.

Η παρουσία των νανοσωματιδίων σε ένα μονωτικό έλαιο είναι υπεύθυνη για τη μεταβολή των βασικών ηλεκτροδυναμικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή των ηλεκτροδυναμικών διαδικασιών σε ένα μονωτικό έλαιο εξαρτάται από τη σταθερά του χρόνου χαλάρωσης της φόρτισης ενός νανοσωματιδίου. Εάν η σταθερά αυτή είναι μικρότερη από το χρόνο που απαιτείται για τη διάδοση του μετώπου εκκένωσης στο μονωτικό έλαιο τότε παρατηρείται μεταβολή των ηλεκτροδυναμικών διαδικασιών. Σε αντίθετη περίπτωση, τα νανοσωματίδια δεν επηρεάζουν τις ηλεκτροδυναμικές διαδικασίες με αποτέλεσμα το νανοδιηλεκτρικό ρευστό να έχει παρόμοια συμπεριφορά με το απλό μονωτικό έλαιο.

Για να υπολογιστεί η σταθερά του χρόνου χαλάρωσης της φόρτισης ενός τυχαίου νανοσωματιδίου σε ένα μονωτικό έλαιο, το νανοσωματίδιο θεωρείται ως ένα σφαιρικό σωματίδιο με ακτίνα R , σχετική επιτρεπτότητα ϵ_2 και σχετική αγωγιμότητα σ_2 , το οποίο περιβάλλεται από ένα μονωτικό έλαιο με σχετική επιτρεπτότητα ϵ_1 και σχετική αγωγιμότητα σ_1 . Στο νανοσωματίδιο, εφαρμόζεται ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο, η ένταση του οποίου δίνεται από την εξίσωση:

$$\vec{E} = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ E_0 \vec{e}_z, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$


Σχήμα 5.5: Η μοντελοποίηση ενός νανοσωματιδίου σε ένα μονωτικό έλαιο [58].

Η σταθερά του χρόνου απόσβεσης της φόρτισης του νανοσωματιδίου υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\tau_f = \frac{2\epsilon_1 + \epsilon_2}{2\sigma_1 + \sigma_2} \quad (2)$$

Για τη μοντελοποίηση των δυναμικών φόρτισης ενός νανοσωματιδίου σε ένα νανορευστό ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται, το οποίο έχει τη μορφή της

εξίσωσης (1) και μία ομοιόμορφη πυκνότητα φόρτισης ηλεκτρονίων ρ_e , εγγέεται στο σύστημα του ιονισμού των ηλεκτρονίων και της κινητικότητάς τους, μ_e . Τα εγχέομενα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν κατά μήκος των ηλεκτρικών γραμμών του πεδίου και πλησιάζουν το νανοσωματίδιο εκεί όπου το ακτινικό ηλεκτρικό πεδίο είναι θετικό. Μόλις το νανοσωματίδιο έχει χαλαρώσει ηλεκτρικά, οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου θα τερματιστούν στο κάτω μέρος του νανοσωματιδίου, το οποίο θα έχει φορτιστεί αρνητικά. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στο μονωτικό έλαιο και γειτνιάζουν με ένα νανοσωματίδιο θα κινηθούν αντίθετα από την κατεύθυνση των ηλεκτρικών γραμμών και θα προσκολληθούν στην πλευρά του νανοσωματιδίου, η οποία είναι θετικά φορτισμένη. Τα δυναμικά φόρτισης ενός νανοσωματιδίου από την παγίδευση των ηλεκτρονίων μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$Q(t) = \frac{Q_s \frac{t}{\tau_{pc}}}{1 + \frac{t}{\tau_{pc}}} \quad (3)$$

όπου τ_{pc} είναι ο χρόνος χαλάρωσης ενός εξαιρετικά αγώγιμου νανοσωματιδίου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{pc} = \frac{4\epsilon_1}{|\rho_e| \mu_e} \quad (4)$$

και Q_s είναι το φορτίο κορεσμού του ηλεκτρονίου για το νανοσωματίδιο και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_s = -12\pi\epsilon_1 R^2 \epsilon_0 \quad (5)$$

Η ανάπτυξη του θετικού μετώπου εκκένωσης σε ένα διηλεκτρικό νανορευστό οφείλεται στο ιονισμό των μορίων του ρευστού. Με τον ιονισμό των μορίων του ελαίου σε «αργά» θετικά φορτία και «γρήγορα» ηλεκτρόνια δημιουργείται μία περιοχή θετικά φορτισμένη επειδή τα γρήγορα ηλεκτρόνια μετακινούνται προς το θετικό ηλεκτρόδιο από τη ζώνη ιονισμού αφήνοντας πίσω τους τα πιο αργά θετικά ιόντα. Αυτή η θετικά φορτισμένη περιοχή μεταβάλλει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο έλαιο έτσι ώστε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το θετικό ηλεκτρόδιο να μειώνεται και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στη θετικά φορτισμένη περιοχή του ελαίου να αυξάνεται. Η νέα κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί τον ιονισμό των μορίων που βρίσκονται πιο μακριά από το θετικό ηλεκτρόδιο με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται εκ νέου η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Το αποτέλεσμα των ηλεκτροδυναμικών

αυτών διαδικασιών είναι η δημιουργία ενός ιοντικού ηλεκτρικού κύματος. Το ηλεκτρικό αυτό κύμα με τη σειρά του προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στο έλαιο με αποτέλεσμα να εξατμίζονται τα μόρια του ελαίου με την υψηλότερη θερμοκρασία και δημιουργείται ένας χαμηλής πυκνότητας μέτωπο εκκένωσης στο μονωτικό έλαιο.

Η διάδοση του μετώπου εκκένωσης σε ένα διηλεκτρικό νανορευστό είναι παρόμοια με αυτή ενός παραδοσιακού μονωτικού ελαίου. Αυτό που διαφέρει ωστόσο είναι τα δυναμικά που αναπτύσσονται σε ένα διηλεκτρικό νανορευστό τα οποία εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται σε κάθε νανορευστό. Σε ένα νανορευστό, για παράδειγμα με νανοσωματίδια μαγνητίτη, οι εξαιρετικά μικροί χρόνοι φόρτισης των νανοσωματιδίων, δείχνουν ότι τα κινούμενα ηλεκτρόνια παγιδεύονται με μεγαλύτερο ρυθμό έτσι δεν προλαβαίνουν να διαφύγουν από τη ζώνη ιονισμού και να δημιουργήσουν το ανεπιθυμητό μέτωπο εκκένωσης. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση του θετικού μετώπου εκκένωσης παρουσιάζονται παρακάτω:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}) = \rho_p + \rho_n + \rho_e + \rho_{np} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \mu_p \vec{E}) = G_l + \frac{\rho_p \rho_e R_{pe}}{\varepsilon} + \frac{\rho_p (\rho_n + \rho_{np}) R_{pn}}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_n \mu_n \vec{E}) = \frac{\rho_e}{\tau_n} - \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_e \mu_e \vec{E}) = -G_l - \frac{\rho_p \rho_e R_{pe}}{\varepsilon} - \frac{\rho_e}{\tau_n} - \frac{\rho_e}{\tau_{np}} (1 - H(\rho_{np,stat} - \rho_{np})) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_{np}}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_{np} \mu_{np} \vec{E}) - \frac{\rho_e}{\tau_{np}} (1 - H(\rho_{np,stat} - \rho_{np})) - \frac{\rho_p \rho_{np} R_{pn}}{\varepsilon} \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho_l c_v} (k_T \nabla^2 T + \vec{E} \cdot \vec{j}) \quad (11)$$

όπου ρ_p η πυκνότητα του θετικού ιόντος, ρ_n η πυκνότητα του αρνητικού ιόντος, ρ_e η πυκνότητα του ηλεκτρονίου και ρ_{np} η πυκνότητα του φορτισμένου νανοσωματιδίου. Οι εξισώσεις (7), (8), (9), (10) συνδυάζονται στην εξίσωση (6). Η εξίσωση (11)

χρησιμοποιείται για τη μελέτη της αύξησης της θερμοκρασίας στο διηλεκτρικό νανορευστό. Ακόμη, μ_p , μ_n , μ_e , μ_{np} , είναι οι κινητικότητες αντίστοιχα των θετικών ιόντων, των αρνητικών ιόντων, των ηλεκτρονίων και των φορτισμένων νανοσωματιδίων. Τα μεγέθη \vec{v} , ϵ , k_T , ϵ_V και ρ_l είναι αντίστοιχα η ταχύτητα, η επιτρεπτότητα, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα και η πυκνότητα μάζας του μονωτικού ελαίου. Τα παραπάνω μεγέθη είναι χαρακτηριστικά για το μονωτικό έλαιο. Τα μεγέθη R_{pn} και R_{pe} αφορούν αντίστοιχα τους ρυθμούς επανασύνδεσης ιόντος – νανοσωματιδίου και ιόντος – ηλεκτρονίου. Οι ρυθμοί αυτοί επανασύνδεσης υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$R_{pn} = \frac{e (\mu_p + \mu_n)}{a} \quad (13)$$

$$R_{pe} = \frac{e (\mu_p + \mu_e)}{a} \quad (13)$$

Επίσης, στις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση του θετικού μετώπου εκκένωσης εμφανίζεται και ο όρος G_I . Ο όρος αυτός αναφέρεται στην πυκνότητα ιονισμού φόρτισης του ηλεκτρικού πεδίου και δίνεται από την εξίσωση:

$$G_I |\vec{E}| = \frac{e^2 n_0 a |\vec{E}|}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m^* a \Delta^2}{e h^2 |\vec{E}|}\right) \quad (14)$$

όπου a είναι η μοριακή απόσταση διαχωρισμού, m^* η ενεργός μάζα του ηλεκτρονίου στο ρευστό, n_0 είναι ο αριθμός των ατόμων ή των μορίων που μπορούν να ιονιστούν ανά μονάδα όγκου του ρευστού και Δ είναι η μοριακή ενέργεια ιονισμού. Ο όρος $H(\rho_{np,sat} - \rho_{np})$ που εμφανίζεται στις εξισώσεις (9) και (10) είναι μία συνάρτηση Heaviside και χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των ορίων φόρτισης του νανοσωματιδίου. Η συνάρτηση αυτή έχει την παρακάτω μορφή:

$$H(\rho_{np,sat} - \rho_{np}) = \begin{cases} 0, & |\rho_{np}| < |\rho_{np,sat}| \\ 1, & |\rho_{np}| > |\rho_{np,sat}| \end{cases} \quad (15)$$

5.9.2 Μέθοδοι παρασκευής των νανορευστών

Υπάρχουν δύο βασικοί μέθοδοι παρασκευής των νανορευστών. Αυτές είναι η μέθοδος ενός βήματος (Single – step method) και η μέθοδος δύο βημάτων (Two – step method) [60]. Η μέθοδος ενός βήματος αφορά την απευθείας εξάτμιση και συμύκνωση

των νανοϋλικών στο ρευστό βάσης με σκοπό τη δημιουργία σταθερών νανορευστών. Στη μέθοδο δύο βημάτων το νανοϋλικό που χρησιμοποιείται παράγεται αρχικά με μία από τις μεθόδους, που έχουν αναφερθεί στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, και στη συνέχεια διαχέεται στο ρευστό βάσης.

Η μέθοδος δύο βημάτων είναι η πιο ευρεία χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παραγωγή νανορευστών. Τα νανοσωματίδια, οι νανοϊνες, τα νανοκαλώδια και τα υπόλοιπα νανοϋλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτήν τη μέθοδο παράγονται αρχικά με διάφορες φυσικές ή χημικές μεθόδους και έχουν τη μορφή ξηρής σκόνης. Στο επόμενο βήμα της διαδικασίας παρασκευής του νανορευστού, η νανοσκόνη διαχέεται μέσα στο ρευστό. Αυτή η μέθοδος παρασκευής νανορευστών παρουσιάζει το χαμηλότερο κόστος, επειδή πλέον οι μέθοδοι παρασκευής νανοϋλικών έχουν περάσει στη βιομηχανική παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Εξαιτίας της μεγάλης επιφάνειας και της μεγάλης ενεργότητας της, τα νανοσωματίδια τείνουν να δημιουργούν συσσωματώματα. Τα συσσωματώματα μειώνουν τη σταθερότητα των παραγόμενων νανορευστών. Για να αποφευχθεί η δημιουργία συσσωματώματων συχνά κατά την παρασκευή νανορευστών χρησιμοποιούνται επιφανειοδραστικές ουσίες. Ωστόσο, η δράση αυτών των ουσιών μπορεί να κατασταλεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Γενικά, αυτή η μέθοδος παρασκευής δεν προσφέρει σταθερά νανορευστά. Γι' αυτόν το λόγο συνδυάζεται συνήθως και με άλλες τεχνικές ώστε να επιτευχθεί η σταθερότητα των νανορευστών.

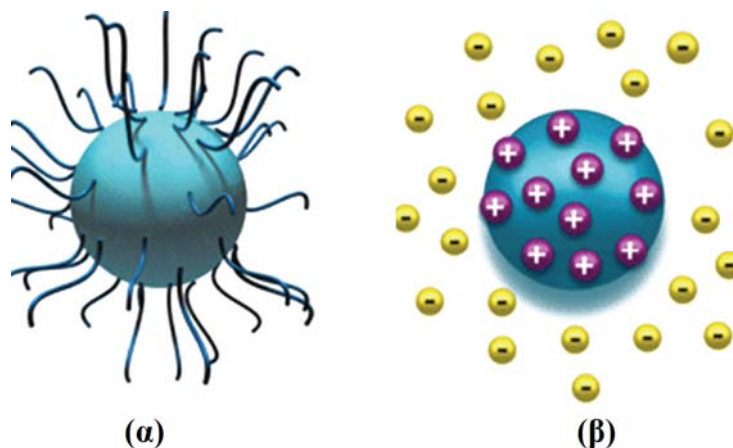
Από την άλλη μεριά, η μέθοδος ενός βήματος μπορεί να μειώσει την πιθανότητα δημιουργίας συσσωματωμάτων σε ένα νανοσωματίδιο. Κατά τη μέθοδο αυτή, τα νανοσωματίδια παράγονται και διαχέονται ταυτόχρονα μέσα στο ρευστό – βάση. Σε αυτή τη μέθοδο, οι διαδικασίες της ξήρανσης, της αποθήκευσης, της μεταφοράς και της διάχυσης των νανοσωματιδίων αγνοούνται, με αποτέλεσμα η συσσωμάτωσή τους να μειώνεται και να αυξάνεται η σταθερότητα των νανορευστών [61]. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Η μέθοδος αυτή, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μεγάλης κλίμακας νανορευστών και το κόστος παραγωγής είναι ακόμη αρκετά υψηλό. Επίσης, με τη μέθοδο αυτή δημιουργούνται ανεπιθύμητα κατάλοιπα στο παραγόμενο νανορευστό εξαιτίας της ημιτελής αντίδρασης που επιτελείται με αποτέλεσμα να μειώνεται η κρυσταλλικότητά του.

5.9.3 Η σταθερότητα των νανορευστών

Η δημιουργία συσσωματωμάτων σε ένα νανορευστό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση των ιδιοτήτων του. Γι' αυτόν το λόγο, κρίνεται σημαντική η παρασκευή ενός σταθερού νανορευστού. Επίσης, έχουν μελετηθεί και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερότητα διασποράς των νανορευστών. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι μέτρησης της σταθερότητας σε ένα νανορευστό, καθώς επίσης και διάφοροι τρόποι ώστε να βελτιωθεί η σταθερότητα του παραγόμενου νανορευστού.

Τα νανοσωματίδια καθώς διαχέονται σε ένα ρευστό υπάρχει η πιθανότητα να προσκολληθούν μεταξύ τους και να σχηματίσουν συσσωματώματα αυξημένου μεγέθους, τα οποία μπορεί να παραμείνουν στο παραγόμενο νανορευστό εξαιτίας της βαρύτητας. Ένα νανορευστό θεωρείται σταθερό όταν τα συσσωματώματα αυτά δε δημιουργούνται με συγκεκριμένο ρυθμό [62]. Γενικά, ο ρυθμός συσσωμάτωσης σε ένα νανορευστό καθορίζεται από το ρυθμό των συγκρούσεων μεταξύ των νανοσωματιδίων. Η σταθερότητα ενός νανοσωματιδίου σε ένα ρευστό καθορίζεται από το σύνολο των ελκτικών δυνάμεων Van der Waals και των απωστικών δυνάμεων του διπλού ηλεκτρικού στρώματος που εμφανίζονται ανάμεσα στα νανοσωματίδια καθώς πλησιάζουν μεταξύ τους [63]. Εάν οι ελκτικές δυνάμεις που εμφανίζονται ανάμεσα στα νανοσωματίδια είναι μεγαλύτερες από τις απωστικές τότε τα νανοσωματίδια συγκρούονται και το εναιώρημα που δημιουργείται είναι ασταθές. Από την άλλη μεριά, εάν οι απωστικές δυνάμεις διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα τότε τα εναιωρήματα θα δημιουργούνται με σταθερό ρυθμό. Όποτε, για την παραγωγή ενός σταθερού νανορευστού θα πρέπει οι απωστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των νανοσωματιδίων να υπερισχύουν. Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν τη σταθερότητα ενός νανορευστού η στερική και η ηλεκτροστατική απόθεση [62]. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται οι δύο αυτοί μηχανισμοί. Στην πρώτη περίπτωση, για τη σταθεροποίηση του νανορευστού χρησιμοποιούνται πολυμερή υλικά τα οποία απορροφώνται από την επιφάνεια των νανοσωματιδίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μίας επιπλέον απωστικής δύναμης μεταξύ των νανοσωματιδίων, της στερικής. Το στερικό φαινόμενο του πολυμερικού μέσου διασποράς καθορίζεται από τη συγκέντρωση του συγκεκριμένου μέσου. Κατά την ηλεκτροστατική σταθεροποίηση, η επιφάνεια των νανοσωματιδίων φορτίζεται με τη βοήθεια διαφόρων μηχανισμών. Η φόρτιση της επιφάνειας μπορεί να επιτευχθεί είτε με επιλεκτική απορρόφηση ιόντων, είτε με το διαχωρισμό των φορτισμένων σωματιδίων της επιφάνειας, είτε με την ισομορφική υποκατάσταση του ιονισμού στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων, είτε με

τη συσσώρευση ή την αποδέσμευση των ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του νανοσωματιδίου, ή τη φυσική απορρόφηση φορτισμένων σωματιδίων στην επιφάνεια του νανοσωματιδίου.



Σχήμα 5.6: (α) Στερική σταθεροποίηση νανοσωματιδίου, (β) ηλεκτροστατική σταθεροποίηση νανοσωματιδίου [62].

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση της σταθερότητας των νανορευστών. Μία από τις μεθόδους αυτές η μέθοδος της ιζήματοποίησης [64]. Το βάρος ή ο όγκος του ιζήματος των νανοσωματιδίων σε ένα νανορευστό αποτελεί ένα δείκτη σταθερότητας του. Τα νανορευστά θεωρούνται σταθερά όταν η συγκέντρωση των υπερκείμενων σωματιδίων διατηρείται σταθερή. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή είναι ότι απαιτείται αρκετός χρόνος ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη σταθερότητα των παραγόμενων νανορευστών. Ακόμη μία μέθοδος εκτίμησης της σταθερότητας ενός νανορευστού είναι η ανάλυση του ηλεκτροκινητικού δυναμικού των νανοσωματιδίων. Το ηλεκτροκινητικό δυναμικό αποτελεί τη διαφορά δυναμικού που εμφανίζεται μεταξύ του μέσου διασποράς και του στατικού επιπέδου του ρευστού, το οποίο είναι προσκολλημένο στα διεσπαρμένα νανοσωματίδια. Οπότε, τα νανοσωματίδια που εμφανίζουν υψηλό ηλεκτροκινητικό δυναμικό σε απόλυτη τιμή είναι ηλεκτρικά σταθεροποιημένα, ενώ τα νανοσωματίδια τα οποία εμφανίζουν χαμηλό ηλεκτροκινητικό δυναμικό τείνουν να δημιουργούν συσσωματώματα. Όταν το ηλεκτροκινητικό δυναμικό των νανοσωματιδίων κυμαίνεται από 40 έως 60 mV τότε τα νανορευστά θεωρούνται σταθερά. Εάν η τιμή του ηλεκτροκινητικού δυναμικού υπερβεί τα 60 mV τότε τα νανορευστά εμφανίζουν εξαιρετική σταθερότητα. Η ανάλυση της φασματικής απορρόφησης των νανοσωματιδίων σε ένα νανορευστό έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως ένα μέσο για τον

έλεγχου της σταθερότητάς του. Γενικά, η σχέση μεταξύ της έντασης της απορροφητικότητας και της συγκέντρωσης των νανοσωματιδίων σε ένα ρευστό είναι γραμμική. Εάν τα νανοσωματίδια τα οποία διαχέονται σε ένα ρευστό έχουν χαρακτηριστικά μήκη κύματος τα οποία κυμαίνονται από 190 – 1100 nm τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η υπεριώδης φασματική ανάλυση για τον έλεγχο της σταθερότητας τους. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή έναντι των υπολοίπων μεθόδων που αναπτύχθηκαν σε αυτήν την παράγραφο είναι ότι κατά την υπεριώδη φασματική ανάλυση μπορεί να εξαχθεί και η ποσοτική συγκέντρωση των νανοσωματιδίων σε ένα νανορευστό.

Εκτός από τις μεθόδους ελέγχου της σταθερότητας ενός νανορευστού έχουν αναπτυχθεί και ορισμένες μέθοδοι, οι οποίες ενισχύουν τη σταθερότητα αυτή. Μία μέθοδος ενίσχυσης της σταθερότητας ενός νανορευστού είναι η διάχυση επιφανειοδραστικών ουσιών στο ρευστό βάσης. Οι επιφανειοδραστικές ουσίες μπορούν να επηρεάσουν αποτελεσματικά τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ενός συστήματος σε μικρή ποσότητα. Οι ουσίες αυτές αποτελούνται από μία υδρόφοβη ουρά και από μία υδρόφιλη κεφαλή ενώ χρησιμοποιούνται συνήθως ως συνδετικό μέσο μεταξύ δύο υλικών. Σε ένα σύστημα δύο φάσεων, όπως είναι τα νανορευστά, η επιφανειοδραστική ουσία τοποθετείται στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων, όπου και σχηματίζει ένα σύνδεσμο μεταξύ των νανοσωματιδίων και του ρευστού βάσης. Οι επιφανειοδραστικές ουσίες που χρησιμοποιούνται συνήθως στα νανορευστά μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο της κεφαλής που διαθέτουν [62]. Υπάρχουν, λοιπόν, μη ιοντικές ουσίες χωρίς φορτισμένες ομάδες στην κεφαλή τους, ανιονικές ουσίες με αρνητικά φορτισμένα σωματίδια στην κεφαλή τους, κατιονικές ουσίες με θετικά φορτισμένα σωματίδια στην κεφαλή τους, και επαμφοτερίζουσες ουσίες που τα φορτία της κεφαλής τους εξαρτώνται από το βαθμό οξύτητας του νανορευστού. Αν και η προσθήκη επιφανειοδραστικών ουσιών φαίνεται να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ενίσχυσης της σταθερότητας των νανορευστών εντούτοις μπορεί να προκαλέσει και ορισμένα προβλήματα. Για παράδειγμα, η προσκόλληση των μορίων της επιφανειοδραστικής ουσίας στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων μπορεί να αυξήσει τη θερμική αντίσταση μεταξύ των νανοσωματιδίων και του ρευστού βάσης, με αποτέλεσμα να μειωθεί η θερμική αγωγιμότητα του νανορευστού. Μία ακόμη, μέθοδος ενίσχυσης της σταθερότητας ενός νανορευστού είναι η τεχνική τροποποίησης της επιφάνειας των νανοσωματιδίων. Σε αυτήν τη μέθοδο δε χρησιμοποιούνται

επιφανειοδραστικές ουσίες αλλά λειτουργικά νανοσωματίδια τα οποία αυξάνουν για μεγάλο χρονικό διάστημα τη σταθερότητα του νανορευστού στο οποίο διαχέονται.

Κεφάλαιο 6

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Κίνδυνοι και ζητήματα ηθικής στη Νανοτεχνολογία

Οι ραγδαίες εξελίξεις της επιστημονικής έρευνας στην ανάπτυξη νανοϋλικών και νανοσωματιδίων δε θα μπορούσαν να μην ακολουθηθούν αναπόφευκτα από την ανάπτυξη υβριδικών τεχνολογιών που συνδυάζουν νανοτεχνολογίες, επιστήμες υλικών, μηχανική, τεχνολογίες των πληροφοριών, ηλεκτρονική, βιοτεχνολογία και περιβαλλοντικές επιστήμες. Όμως, η είσοδος τέτοιων τεχνολογιών στην καθημερινότητα του ανθρώπου χωρίς τον κατάλληλο έλεγχο ή περιορισμό μπορεί να αποβεί επικίνδυνη για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Τα διάφορα προβλήματα και ερωτήματα που προκύπτουν σχετικά με την αλόγιστη χρήση και ένταξη των εφαρμογών της Νανοτεχνολογίας στην ανθρώπινη καθημερινότητα αφορούν την ασφάλεια του περιβάλλοντος και την υγεία του ανθρώπου, αλλά θίγουν και ζητήματα ηθικής και κοινωνικοοικονομικών αναταραχών.

Διάφοροι διεθνείς οργανισμοί και επιτροπές καταβάλουν προσπάθεια ελέγχου της χρήσης νανοσωματιδίων όταν υπάρχει κίνδυνος για αρνητικές επιπτώσεις, όμως ο παράγοντας του κέρδους αποτελεί κίνητρο για νομικές ασάφειες που αφήνουν μεγάλη ελευθερία στις διάφορες κατασκευαστικές εταιρίες. Η ειδική οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η γνωστή REACH που είναι υπεύθυνη για έρευνα και καταγραφή των χημικών ουσιών που παράγονται ή εισάγονται στις χώρες της Ευρώπης, έχει και αυτή νομικά κενά σε σχέση με την Νανοτεχνολογία, καθώς διευκρινίζει την υποχρέωση καταγραφής των τεχνητών ουσιών που παράγονται ή εισάγονται στην Ε.Ε. μόνον εφόσον αυτές ξεπερνούν ετησίως ένα τόνο βάρος. Έτσι διαφεύγουν από τον έλεγχο όλα τα νανοσωματίδια που παράγονται σε ποσότητες μερικών γραμμαρίων το πολύ [65].

Αναφορικά με την ανθρώπινη υγεία, τα νανοσωματίδια που δεν έχουν ιατρικές εφαρμογές μπορούν να εισαχθούν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της αναπνοής, απλής επαφής και πέψης. Είναι εύλογο πως τα νανοσωματίδια πιο μικρού μεγέθους εισέρχονται πιο εύκολα στον οργανισμό, συσσωρεύονται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε περίπτωση που η έκθεση είναι συνεχής, και προφανώς μπορούν να προκαλέσουν

μεγαλύτερη τοξικότητα. Ο πληθυσμός που ασχολείται συχνά με νανοσωματίδια σε επίπεδο κατασκευής, χειρισμού και χρήσης νανοσωματιδίων αντιμετωπίζει μεγαλύτερο κίνδυνο λόγω συστηματικής έκθεσης, ενώ δεν πρέπει να αγνοηθεί και η ιδιαίτερα σημαντική εξάπλωση των νανοσωματιδίων μέσω ρίψης απορριμμάτων που μπορεί εκτός από υγιείς ανθρώπους να πλήξει και ασθενείς με προϋπαρχοντα αναπνευστικά ή και καρδιαγγειακά προβλήματα. Η είσοδος των νανοσωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό ακολουθείται από την εξάπλωση τους μέσω του κυκλοφορικού συστήματος στον εγκέφαλο και τα υπόλοιπα ζωτικά όργανα, με πιθανότερες τις επιπλοκές που σχετίζονται με άσθμα, βρογχίτιδα, καρκίνο στο ήπαρ ή στους πνεύμονες κτλ. Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των σωματιδίων αυτών με τον οργανισμό δεν έχουν καθορισθεί ακόμα με μεγάλη ακρίβεια και πολλές αντιφατικές επιστημονικές απόψεις διέπουν το ζήτημα αυτό, με επικρατέστερη τη θεωρία πως προκαλούνται οξειδώσεις στα κύτταρα και παρεμποδίζεται η φυσιολογική τους λειτουργία λόγω παρεμβολών στο DNA, αλλά παρά τις αντιφάσεις δεν αμφισβητείται η άποψη πως η συγκέντρωση νανοσωματιδίων μέσω της αναπνοής στους πνεύμονες μπορεί να είναι πολύ επικίνδυνη. Με προσεκτική μελέτη των μηχανισμών αλληλεπίδρασης των νανοσωματιδίων με τον οργανισμό και με κατάλληλη τροποποίηση τους θα μπορούσαν να μετριαστούν οι παρενέργειες. Για παράδειγμα, με χρήση άλλων υλικών επικάλυψης θα μπορούσε να μειωθεί ο χρόνος «ζωής» του νανοϋλικού στον οργανισμό πριν τη φυσική αποβολή του.

Αναφορικά με τις επιπτώσεις της συσσώρευσης νανοσωματιδίων στο περιβάλλον, αυτά αλληλεπιδρούν με διάφορους φυτικούς και ζωικούς μικροοργανισμούς, ταράσσοντας σημαντικά οικοσυστήματα και οικολογικές τροφικές αλυσίδες, με άμεσες συνέπειες και στο ζωικό βασίλειο. Ο κυριότερος τρόπος για να οδηγηθούν στο ελεύθερο περιβάλλον τα νανοσωματίδια είναι μέσω των αποχετευτικών συστημάτων λόγω οικιακών συσκευών ή προϊόντων. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί το ασήμι που σε διαστάσεις nm περιέχεται σε πλυντήρια, σκεύη της κουζίνας, συσκευασίες τροφίμων και λόγω φυσιολογικής φθοράς του εκάστοτε προϊόντος ή απόρριψης του, το ασήμι αυτό απελευθερώνεται στο περιβάλλον.

Η αναμενόμενη και ίσως αναπόφευκτη ανάπτυξη και ευρεία χρήση των νανοτεχνολογιών και των εφαρμογών τους ενδεχομένως να έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας σειράς κοινωνικών, ηθικών και δεοντολογικών ζητημάτων. Τα τρέχοντα νομοθετικά συστήματα δεν έχουν καταφέρει ακόμα να συμβαδίσουν και να ανταπεξέλθουν αναλόγως με την ταχύτατη ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών,

αφήνοντας περιθώρια για κατάχρηση και έκθεση του ανθρώπου και του περιβάλλοντος σε κίνδυνο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω σχετικά με την οδηγία REACH. Κατόπιν σωστής πληροφόρησης και μελέτης σχετικά με την ενδεχόμενη επικινδυνότητα των νανοσωματιδίων, τα ηθικά και νομικά όρια πρέπει να τεθούν υπό μορφή κατάλληλης περιοριστικής νομοθεσίας. Χωρίς κάποιο σύστημα κανονισμών ασφαλείας για τον άνθρωπο και νομικών περιορισμών, υπάρχει κίνδυνος οι αναπτυσσόμενες χώρες να αποτελέσουν χώρο για τη ρίψη των νανοαπορριμμάτων ή χώρο συμφέρουσας αγοράς και φτηνού εργατικού δυναμικού χωρίς νομικούς περιορισμούς, ενώ οι χώρες που χρησιμοποιούν προϊόντα της Νανοτεχνολογίας, αδυνατούν να ελέγξουν τη ραγδαία είσοδο των νανοπροϊόντων και των νανοϋλικών πριν να γίνει εξακριβωθεί το αν είναι ακίνδυνα ή όχι [65].

Σχετικά με τη χρηματοδότηση της έρευνας, ενώ τεράστια χρηματικά ποσά επενδύονται στην έρευνα και την ανάπτυξη των νανοτεχνολογιών, τα ποσά που διατίθενται για τη μελέτη των επιπτώσεων στο περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων είναι πολύ περιορισμένα. Ο παράγοντας του κέρδους κατέχει κύριο ρόλο και η πρόοδος στους διάφορους τομείς της νανοτεχνολογίας δεν καθοδηγείται πάντα από ουσιαστικές και κρίσιμες ανάγκες του ανθρώπου και του περιβάλλοντος, κι ενώ σε πολλές εφαρμογές τα πιθανά οφέλη είναι πολλά υποσχόμενα, η τεχνολογία προς το παρόν λόγω του υψηλού κόστους, ελέγχεται κυρίως από τις ανεπτυγμένες χώρες και τις πολυεθνικές εταιρείες [59]. Ως αποτέλεσμα, λόγω του υψηλού αυτού κόστους είναι προφανές πως εφαρμογές που αφορούν για παράδειγμα, την ανθρώπινη υγεία, δε θα είναι προσιτές για το ευρύ κοινό, εδραιώνοντας περισσότερο το διαχωρισμό ανάμεσα στους κατοίκους αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών. Ο παράγοντας του κέρδους όμως εκτός από το κόστος των νανοπροϊόντων έχει επεκτάσεις και στη γενικότερη οικονομία. Αν και πιθανές κοινωνικοοικονομικές αναταράξεις που θα οφείλονται στην εξάπλωση των βιομηχανιών της Νανοτεχνολογίας είναι ενδεχόμενο ιδιαίτερα μακροπρόθεσμο, δεν είναι απίθανη μια διαταραχή των αγορών καθημερινών αγαθών και όλων των εφοδιαστικών αλυσίδων, ελαχιστοποιώντας τις θέσεις εργασίας σε σχεδόν κάθε επιχείρηση. Για παράδειγμα, χώρες των οποίων η οικονομία βασίζεται στο εμπόριο πρώτων υλών όπως βαμβάκι ή χαλκό, θα πληγούν λόγω της αντικατάστασης των υλικών αυτών από νανοϋλικά.

Φυσικά, όπως συμβαίνει με όλες τις καινοτόμες επιστημονικές ανακαλύψεις και εξελίξεις, τα όρια της ηθικής που διέπουν τις ενδεχόμενες χρήσεις της Νανοτεχνολογίας

είναι ακόμα ασαφή. Συχνά αναφέρεται από ερευνητές η ανησυχία πως επιτεύγματα της Νανοτεχνολογίας μελλοντικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αρνητικά για στρατιωτικούς σκοπούς ή για κακόβουλη υποκλοπή προσωπικών πληροφοριών. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη ευφύων και μικροσκοπικών ρομποτικών όπλων, πυρομαχικών που εντοπίζουν αυτόματα το στόχο τους, συστημάτων παρακολούθησης που λόγω μεγέθους θα είναι αδύνατον να γίνουν αντιληπτά. εμπεριέχουν σοβαρούς κινδύνους για την υγεία των ανθρώπων και την ασφάλεια των προσωπικών τους δεδομένων, την ακεραιότητα της ηθικής της κοινωνίας, καθώς και για το περιβάλλον [59].

6.2 Συμπεράσματα

Η Νανοτεχνολογία, δηλαδή ο επιστημονικός κλάδος που μελετά και αναπτύσσει δομές στη νανομετρική κλίμακα, αποτελεί ένα πεδίο τεράστιου επιστημονικού ενδιαφέροντος. Από το 1974, που πρωτοεισήχθηκε η έννοια της νανοτεχνολογίας, μέχρι και σήμερα η Νανοτεχνολογία συνεχίζει να αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς αναπτύσσοντας διατάξεις και υλικά τα οποία διαθέτουν μοναδικές ιδιότητες. Η παρασκευή των νανοϋλικών επιτυγχάνεται με δύο κύριες τεχνικές, την τεχνική Bottom-up και την τεχνική Top-down. Με τη βοήθεια πολύπλοκων απεικονιστικών διατάξεων και εργαλείων χειρισμού, όπως είναι το μικροσκόπιο μετάδοσης ηλεκτρονίων και οι οπτικές λαβίδες, οι νανοδομές που συνθέτονται μπορούν να ελεγχθούν και να μελετηθούν με απόλυτη ακρίβεια. Τα νανοϋλικά, στη συγκεκριμένη εργασία χωρίστηκαν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες, που είναι τα νανοσωματίδια, οι νανοσωλήνες, τα νανοστρώματα και οι νανοπόροι.

Με αφετηρία τα νανοϋλικά, οι εφαρμογές της Νανοτεχνολογίας εκτείνονται σε ένα τεράστιο φάσμα. Έτσι, η Νανοτεχνολογία βρίσκει εφαρμογή στον τομέα της Ηλεκτρονικής, όπου αναπτύσσονται ηλεκτρονικά στοιχεία ακόμη και ολόκληρα κυκλώματα με μέγεθος μερικών nm. Μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτόν μπορεί να οδηγήσει και στην κατασκευή ολόκληρων υπολογιστικών συστημάτων εξ' ολοκλήρου από νανοηλεκτρονικές συσκευές, αυξάνοντας τις επιδόσεις τους και μειώνοντας δραματικά το μέγεθός τους. Σημαντικές, όμως, είναι και οι εξελίξεις στην Ιατρική, καθώς έχουν αναπτυχθεί μεταφορείς για στοχευμένη και ελεγχόμενη αποδέσμευση φαρμάκων, και διατάξεις μοριακής απεικόνισης που ανιχνεύουν την ασθένεια πριν ακόμη εκδηλωθούν τα συμπτώματά της. Τέλος, σημαντική είναι η συμβολή της Νανοτεχνολογίας στον ενεργειακό τομέα, καθώς έχουν αναπτυχθεί νανοδομές που

χρησιμοποιούνται από το στάδιο της παραγωγής ενέργειας μέχρι και την τελική χρήση της από τους καταναλωτές. Μελλοντικά, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να καταστούν πιο αποδοτικές από τις συμβατικές πηγές εξαιτίας των εξελίξεων στη Νανοτεχνολογία.

Τα νανοσωματίδια έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον από πολλούς επιστήμονες καθώς η μεγάλη επιφάνεια που διαθέτουν σε σχέση με τον όγκο τους ευθύνεται για τις μοναδικές ιδιότητες των υλικών που σχηματίζουν. Οι επιστήμονες έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν την επιφάνεια των νανοσωματιδίων και έτσι με κάποιον τρόπο μπορούν να «επιλέξουν» με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που θα έχει το κάθε νανοϋλικό. Τα νανοσωματίδια αποτελούν τα βασικά δομικά συστατικά των νανოსύνθετων υλικών. Τα νανοςύνθετα υλικά, όπως και τα νανοσωματίδια έχουν γίνει αντικείμενο επιστημονικής έρευνας εξαιτίας των αμέτρητων δυνατοτήτων που προσφέρουν. Στο τομέα της ηλεκτρικής μόνωσης υψηλών τάσεων χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον νανοςύνθετα διηλεκτρικά υλικά. Στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν κυρίως τα πολυμερή νανοςύνθετα διηλεκτρικά υλικά. Σημαντικό στοιχείο, σε ένα νανοςύνθετο υλικό είναι το υλικό πλήρωσης του. Η μορφολογία του υλικού πλήρωσης, η ποσότητα που εγχέεται στο νανοςύνθετο υλικό και άλλα χαρακτηριστικά του γνωρίσματα είναι υπεύθυνα για τη μεταβολή των μηχανικών, ηλεκτρικών και θερμικών ιδιοτήτων. Μία πολύ μικρή μεταβολή σε ένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορεί να επιφέρει τεράστιες αλλαγές στις ιδιότητες του νανοςύνθετου υλικού. Ακόμη, ένα μέσο μόνωσης των ηλεκτρικών συστημάτων υψηλής τάσης είναι τα διηλεκτρικά νανορεύστα. Τα διηλεκτρικά ρεύστα αποτελούνται κυρίως από ένα μονωτικό έλαιο και από αγώγιμα νανοσωματίδια τα οποία προστίθενται στο έλαιο αυτό. Η βελτιωμένη διηλεκτρική ικανότητα που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά έναντι των παραδοσιακών μονωτικών ελαίων οφείλεται εξ' ολοκλήρου στα αγώγιμα νανοσωματίδια που απαρτίζουν το διηλεκτρικό ρευστό.

Βιβλιογραφία

- [1] Meridian Institute, *Nanotechnology and the Poor: Opportunities and Risks*, Jan. 2005. <http://www.nanoandthepoor.org>.
- [2] http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/nanobrochure/nano_brochure_el.pdf
- [3] A. C. Schultz, *Nanotechnology: Industrial Revolution or Emerging Hazard?*, *Environmental Claims Journal*, 19(3):199–205.
- [4] <http://www.nano.gov/timeline>
- [5] http://www.mio-ecsde.org/_uploaded_files/nanovirtualium/html/el/basics.html
- [6] <http://www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm>
- [7] M. Joshi, A. Bhattacharyya, S. Wazed Ali, *Characterization techniques for nanotechnology applications in textiles*, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, Vol. 33, pp. 304-317, Sep. 2008.
- [8] Wilson R, Bullen H, *Introduction to Scanning Probe Microscopy (SPM), Basic Theory, Atomic Force Microscopy (AFM)*, Department of Chemistry, Northern Kentucky University.
- [9] <http://www.econano.org/nt.php?nc=23>
- [10] <http://www.answers.com/topic/scanning-tunneling-microscope?cat=technology>
- [11] <http://opto.braggcell.com/uploads/files/OPTICAL-TWEEZERS1.pdf>.
- [12] Ν. Κονοφάος, *Νανοτεχνολογία & Βιοηλεκτρονική Ι*, 2011.
- [13] <http://www.zukuenftigetechologien.de/11.pdf>
- [14] <http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/>
- [15] Μπαμπαβέα Ε, Μπιμπλή Α, Κακουλίδου Α, *Νανοϋλικά: Φουλερένια και Νανοσωλήνες Άνθρακα. Δομή, Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες-Βιολογικές και Θεραπευτικές Εφαρμογές*, *Φαρμακευτική* 21, Ι, 10-21,2008.
- [16] http://www.sps.aero/Key_ComSpace_Articles/TSA-001_Dendrimers_White%20Paper.pdf
- [17] J. K. Gimzewski, *Nanoelectronics*, in *AccessScience@McGraw-Hill*.

- [18] J. C. Ellenbogen, *A Brief Overview of Nanoelectronic Devices*, Jan 1998. http://www.eet.bme.hu/~mizsei/Nanoelektronika/polimer/Brief_Ovw_of_Nanodevices.pdf
- [19] D. Goldhaber-Gordon, M.S. Montemerlo, J.C. Love, G.J. Opiteck, J. C. Ellenbogen, *Overview of Nanoelectronic Devices*, Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 4, April 1997, pp. 521-540.
- [20] <http://wolfweb.unr.edu/homepage/bruch/Phys461/6.pdf>
- [21] <http://www.iwe.rwth-aachen.de/nanobook/samples/sample2.pdf>
- [22] A. Rasmi, U. Hashim, *Single-Electron Transistor (SET):Literature review*,2005.
- [23] J. R. Heath, M. A. Ratner, *Molecular Electronics*, 2003 American Institute of Physics.
- [24] D. Vuillaume, *Molecular Nanoelectronics*, Proceedings of the IEEE, pp. 1-12, 2010.
- [25] W. Lu, C. M. Lieber, *Nanoelectronics from the bottom up*, nature materials, Vol. 6, pp. 841-850, Nov. 2007.
- [26] D. Nedra Karunaratne, *Nanotechnology in medicine*, J. Natn.Sci.Foundation Sri Lanka 200735(3): 149-152.
- [27] http://blog.biocision.com/wp-content/uploads/2011/04/nanomedicine_NEJM2010.pdf
- [28] A. H. de Vries, B. E. Krenn, R. van Driel, J. S. Kanger, *Micro Magnetic Tweezers for Nanomanipulation Inside Live Cells*, Biophys. J. 88, 2137 (2005).
- [29] G. D. M. Jeffries, J. S. Edgar, Y. Zhao, et al., *Using Polarization Shaped Optical Vortex Traps for SingleCell Nanosurgery*, Nano Lett. 7, 415 (2007).
- [30] http://www.iea.org/papers/2006/renewable_factsheet.pdf.
- [31] http://www.hessen-nanotech.de/mm/NanoEnergy_web.pdf.
- [32] E. Serrano, G. Rus, J. Garcia-Martinez, *Nanotechnology for sustainable energy*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 2373-2384, Dec. 2009.
- [33] <http://www.future-alternative-energy.net/fuel-cell-cars.html>.
- [34] <http://www.ic.gc.ca/eic/site/wei-iee.nsf/eng/00177.html#figure8.3.1>
- [35] A. C. Dillon, M. J. Heben, *Hydrogen storage using carbon adsorbents: past, present and future*. Appl Phys A 2001; 72:133–42.
- [36] <http://electronics.howstuffworks.com/oled1.htm>

- [37] <http://www.observatorynano.eu/project/filesystem/files/ObservatoryNANO%20Briefing%20No.3%20Nano-Enabled%20Insulation%20Materials.pdf>.
- [38] C. Buzea, I. I. Pacheco-Blandino, K. Robbie, *Nanomaterials and nanoparticles: Sources and Toxicity*, Biointerphases vol. 2, issue 4, (2007), pp. MR17-MR172.
- [39] M. Abhilash, *Potential application of Nanoparticles*, International Journal of Pharma and Bio Sciences, V1(1) 2010, pp. 1-10.
- [40] http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PPP_NanotechnologiesNanoparticles.pdf.
- [41] <http://online-media.uni-marburg.de/chemie/bioorganic/vorlesung1/kapitel1e.html?/chemie/bioorganic/vorlesung1/k1e-16.html>.
- [42] <http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/161Ahydrogenbond.html>.
- [43] R. Nagarajan, *Nanoparticles: Building Blocks for Nanotechnology*, ACS Symposium Series, Washington, DC, pp. 1-14, Sep. 2008.
- [44] J. K. Nelson, *Background, Principles and Promise of Nanodielectrics*, Springer Science+Business Media, pp. 1-30, 2010.
- [45] Y. Cao, P. C. Irwin, *The Future of Nanodielectrics in the Electrical Power Industry*, IEEE Trans Dielectr Electr Insul, 11(5):797-807, 2004.
- [46] A. Olad, *Polymer/Clay Nanocomposites*, Advances in Diverse Industrial Applications of Nanocomposites, pp.113-138.
- [47] F. Hussain, M. Hojjati, M. Okamoto, R. E. Gorga, *Review article: Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and Application: An Overview*, Journal of Composite Materials, Vol.40, No. 17, pp. 1511-1565, 2006.
- [48] M. Takala, *Electrical Insulation Material towards Nanodielectrics*, 2010.
- [49] M. Roy, J. K. Nelson, R. K. MacCrone, L. S. Schandler, C. W. Reed, R. Keefe, W. Zenger, *Polymer Nanocomposite Dielectrics – The Role of the Interface*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, pp. 629-643, 2005.
- [50] J. K. Nelson, *The Promise of Dielectric Nanocomposites*, IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul. (ISEI), pp. 452-457, 2006.
- [51] M. Roy, J. K. Nelson, R. K. MacCrone, L. S. Schandler, *Candidate mechanisms controlling the electrical characteristics of silica/XPLE nanodielectrics*, J. Mater. Sci., Vol. 42, pp. 3789-3799, 2007.
- [52] T. Andritsch, *Epoxy Based Nanodielectrics for High Voltage DC-Applications – Synthesis, Dielectric Properties and Space Charge Dynamics*, 2010.

- [53] S. Raetzke, J. Kindersberger, *Resistance to High Voltage Arcing and the Resistance to Tracking and Erosion for Silicone/SiO₂ Nanocomposites*, Intern. Symp. High Voltage Eng. (ISH), F-10, 2009.
- [54] K. Y. Lau, M. A. Piah, *Polymer Nanocomposites in High Voltage Electrical Insulation Perspective: A Review*, Malaysian Polymer Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 58-69, 2011.
- [55] G. Momen, M. Farzaneh, *Survey of Micro/Nano filler use to improve silicone rubber for outdoor insulators*, Rev. Adv. Mater. Sci. 27, 1-13, 2011.
- [56] <http://www.metal.ntua.gr/uploads/3456/390/Chap1gr.pdf>
- [57] S. Singha, M. J. Thomas, *Properties of Epoxy Nanocomposites*, IEEE, Vol 15, No. 1, 2008.
- [58] J. G. Hwang, M. Zahn, F. M. O' Sullivan, L. A. Petterson, O. Hjorstam, R. Liu, *Electron Scavenging by Conductive Nanoparticles in Oil Insulated Power Transformers*, Electr. Joint. Conf, 2009.
- [59] N. Lavesson, J. Fors, O. Widlund, *Modeling of Streamers in Transformer Oil using OpenFoam*.
- [60] V. Sridhara, L. N. Satapathy, *Al₂O₃-based nanofluids: a review*, Sridhara and Satapathy Nanoscale Research Letters, 6:456, 2011.
- [61] Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, S. Xi, *A review on development of nanofluid preparation and characterization*, Elsevier, Powder Technology (196), pp. 89-101, Jul. 2009.
- [62] W. Yu, H. Xie, *A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications*, Journal of Nanomaterials, 2012.
- [63] O. Popa, G. Gillies, G. Papastavrou, M. Borkovec, *Attractive and Repulsive Electrostatic Forces between Positively Charged Latex Particles in the Presence of Anionic Linear Polyelectrolytes*, J. Phys. Chem. B. 114, pp. 3170-3177, 2010.
- [64] X. Wei, L. Wang, *Synthesis and thermal conductivity of microfluidic copper nanofluids*, Elsevier, Particology 8, pp. 262-271, 2010.
- [65] Allhoff F, Lin P (eds). *Nanotechnology & Society. Current and Emerging Ethical Issues*. Springer Netherlands, 2008