



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ & ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
ΤΗΣ
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ
ΣΤΗ
ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ
ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

Λομβαρδιά Άννα

Αριθμός Μητρώου: 09108403

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Παπαγιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Α. Παπαγιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Μ. Μακροπούλου, Ομ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Γ. Παναγιάρης, Καθηγητής ΠΑΔΑ

ΑΘΗΝΑ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας πάνω στις εφαρμογές της Τομογραφίας Οπτικής Συμφωνίας (Optical Coherence Tomography, OCT) σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς: την κ.Μυρσίνη Μακροπούλου, Ομότιμη Καθηγήτρια ΕΜΠ, τον κ.Αλέξανδρο Παπαγιάννη, Καθηγητή ΕΜΠ και τον κ. Γεώργιο Παναγιάρη, Καθηγητή του τμήματος Συντήρησης Αρχαιοτήτων και Έργων Τέχνης του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Ιδιαίτερα, θέλω να ευχαριστήσω την κ. Μυρσίνη Μακροπούλου που με καθοδήγησε σε όλη την πορεία εκπόνησης της εργασίας, τόσο στο πειραματικό όσο και στο βιβλιογραφικό μέρος της. Θα της είμαι πάντα ευγνώμων για τις υποδείξεις και παρατηρήσεις της καθώς και για την αμέριστη συμπαράσταση που έδειξε στις προσπάθειές μου.

Ευχαριστώ τον κ. Αλέξανδρο Παπαγιάννη, για την επίβλεψη της διπλωματικής αυτής εργασίας και την άμεση ανταπόκρισή του σε όλα τα ζητήματα που προέκυψαν στα στάδια ολοκλήρωσής της.

Ευχαριστώ τον κ. Αλέξανδρο Σεραφετινίδη, Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ, που μέσα από την ενασχόλησή του με τις εφαρμογές των LASER στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς, μου επέτρεψε να μελετήσω το αντικείμενο της διπλωματικής μου εργασίας. Η πρόθεση μελέτης τμημάτων από πίνακες του ζωγράφου Κωνσταντίνου Παρθένη που είχαν υποστεί φθορές σε συνδυασμό με προηγούμενη συνεργασία της Ομάδας Ανάπτυξης και Εφαρμογών LASER του Τομέα Φυσικής ΕΜΠ με το ΤΕΙ Αθηνών στη μελέτη βιολογικών δειγμάτων με OCT, ενέπνευσε το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ηλία Ζώη, Επίκουρο Καθηγητή Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την φιλοξενία στο εργαστήριο καθώς και την καθοδήγηση και συνεργασία στον χειρισμό της διάταξης OCT για την καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων.

Θέλω να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες ΕΜΠ, Ιωάννη Τσιλίκα και Αναστάσιο Γουσέτη για την εργαστηριακή εμπειρία που μου παρείχαν στο ευρύτερο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας εργασίας καθώς και τους καθηγητές της σχολής και τα μέλη του Τομέα Φυσικής για τις γνώσεις που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου, τους γονείς μου Μαρία και Γιώργο και τη θεία μου Ειρήνη, για όσα μου έχουν προσφέρει καθώς και σε όλους εκείνους από το στενό και ευρύτερο κοινωνικό κύκλο μου, που με στηρίζουν ώστε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Τομογραφία Οπτικής Συμφωνίας (Optical Coherence Tomography- OCT) είναι μια μη επεμβατική, μεγάλης ταχύτητας και υψηλής διακριτικής ικανότητας τεχνική δισδιάστατης και τρισδιάστατης απεικόνισης της εσωτερικής δομής διαφανών και ημιδιαφανών αντικειμένων.

Ο σχεδιασμός της διάταξης OCT στηρίζεται στις αρχές ενός συμβολόμετρου τύπου Michelson, με πηγή φωτός υψηλής χωρικής αλλά χαμηλής χρονικής συμφωνίας στην φασματική περιοχή του ερυθρού και υπέρυθρου.

Αυτή η απεικονιστική τεχνική δεν απαιτεί καμία προετοιμασία του υπό μελέτη αντικειμένου, γίνεται από μια ασφαλή απόσταση, ακτινοβολεί το δείγμα με φως χαμηλής έντασης και συνεπώς δεν δημιουργεί αλλοιώσεις. Πρόκειται για μια πραγματικά χρήσιμη διαγνωστική τεχνική για υλικά στα οποία δεν παρουσιάζονται έντονα φαινόμενα σκέδασης ή απορρόφησης, για ακτινοβολίες στην περιοχή του φάσματος της πηγής της διάταξης, και για αντικείμενα έντονης διαστρωμάτωσης αφού προσφέρει υψηλή διακριτική ικανότητα κατά τη διεύθυνση της δέσμης διερεύνησης.

Αποτελεί καθιερωμένη τεχνική στον τομέα της βιοϊατρικής και τις τελευταίες δύο δεκαετίες η εφαρμογή της έχει επεκταθεί στη μελέτη και συντήρηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται μια ιστορική αναδρομή στην πορεία των εφαρμογών της τομογραφίας οπτικής συμφωνίας σε αντικείμενα τέχνης, καθώς και μια παρουσίαση των στοιχείων θεωρίας της Φυσικής και της υλοποίησης της τεχνικής OCT. Ένα κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην ερμηνεία δισδιάστατων εικόνων OCT που συνέλεξα από πρότυπα δείγματα στρωμάτων ακρυλικών χρωμάτων και ελαιοχρωμάτων με εμπορικά διαθέσιμη διάταξη ενώ ακολουθεί αναφορά σε εφαρμογές και μεθόδους με τις οποίες συνδυάζεται η OCT στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς. Τέλος, παραθέτουμε βιβλιογραφική έρευνα πάνω στις OCT διατάξεις των διαφόρων ερευνητικών ομάδων σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις των εκάστοτε εφαρμογών.

ABSTRACT

Optical Coherence Tomography (OCT) is a non-invasive, high-speed, high-resolution technique for cross-sectional and 3D imaging of the internal structure of transparent and semi-transparent objects.

A typical OCT device consists of a Michelson interferometer, with a light source of high spatial but low temporal coherence, emitting light in the red or infrared spectral region.

Examination with OCT is non-contact, does not require any sample preparation and uses light of low intensity, therefore it does not cause any harm to the imaged object. Due to its high axial resolution, OCT is a really useful diagnostic technique for objects with a rich stratigraphy, when the materials involved do not exhibit strong scattering or absorption of the probing radiation.

Already established as a technique in the biomedical field, the last two decades its implementation has expanded towards that of investigation and restoration of cultural heritage objects.

The following chapters provide a historical overview of the applications of optical coherence tomography in the examination of artworks and present the fundamental concept of the technique, as well as the principles of operation and parameters of OCT systems. A chapter is devoted to the interpretation of cross-sectional OCT images that were collected from mock-up samples of acrylic and oil paints, using a commercially available OCT device. This is then followed by an extensive presentation of the various applications of OCT, on its own and in combination with other techniques, in the field of cultural heritage. Tables containing information on the characteristics of OCT apparatuses, used in imaging of different types of artworks, are also included.

Περιεχόμενα

- 1 Ιστορική αναδρομή
- 2 Στοιχεία θεωρίας
 - 2.1 Αρχές λειτουργίας της Τομογραφίας Οπτικής Συμφωνίας
 - 2.2 Είδη διατάξεων τομογραφίας Οπτικής Συμφωνίας
 - 2.2.1 Time-domain OCT (Td-OCT)
 - 2.2.2 Fourier-domain OCT (Fd-OCT)
 - 2.2.2.1.1 Spectral domain OCT
 - 2.2.2.1.2 Swept-source OCT
- 3 Παράγοντες ποιότητας μιας OCT μέτρησης
 - 3.1 Αξονική και πλευρική διακριτική ικανότητα
 - 3.2 Εύρος αξονικής απεικόνισης
 - 3.3 Ευαισθησία (sensitivity)
 - 3.4 Ταχύτητα λήψης δεδομένων
 - 3.5 Ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας
- 4 Προκαταρτικές πειραματικές μετρήσεις
 - 4.1 Στόχος πειραμάτων
 - 4.2 Υλικά και Μέθοδοι
 - 4.2.1 Πειραματικά δοκίμια
 - 4.2.2 Σύστημα OCT
 - 4.3 Προκαταρτικές πειραματικές μετρήσεις
 - 4.4 Συμπεράσματα
- 5 Εφαρμογές της OCT σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς και Μέθοδοι με τις οποίες συνδυάστηκε η OCT στο πλαίσιο της μελέτης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς
 - 5.1 Εφαρμογές της OCT σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς
 - 5.1.1 Εφαρμογές της OCT σε πίνακες ζωγραφικής
 - 5.1.1.1 Εισαγωγικά
 - 5.1.1.2 Απεικόνιση στρωμάτων βερνικιών
 - 5.1.1.3 Απεικόνιση στρωμάτων λαζούρας
 - 5.1.1.4 Απεικόνιση χρωματικών στρωμάτων
 - 5.1.1.5 Απεικόνιση προσχεδίων
 - 5.1.1.6 Μελέτη επίδρασης υγρασίας στη δομή των πινάκων
 - 5.1.2 Εφαρμογές της OCT σε αντικείμενα από γυαλί
 - 5.1.3 Εφαρμογές της OCT σε κεραμικά αντικείμενα
 - 5.1.4 Εφαρμογές της OCT σε αντικείμενα από ίασπι
 - 5.1.5 Εφαρμογές της OCT σε ξύλινα έργα τέχνης
 - 5.1.6 Εφαρμογές της OCT σε άλλα υλικά
 - 5.2 Τεχνικές με τις οποίες συνδυάστηκε η OCT στο πλαίσιο της μελέτης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς
 - 5.2.1 Εφαρμογή OCT στην επίβλεψη διαδικασιών καθαρισμού αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

5.2.2 Συνδυασμός με Φασματοσκοπία Εκπομπής Φάσματος Επαγόμενου από LASER
(LASER Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)

5.2.3 Συνδυασμός με άλλες τεχνικές

5.3 Μεθοδολογία συλλογής βιβλιογραφίας του κεφαλαίου

6 Συμπεράσματα και προοπτικές

Αναφορές βιβλιογραφίας

OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY- OCT

ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ OCT ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

Κεφάλαιο 1

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η τεχνολογία της OCT εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 (Fercher et al., 1991) και παρουσιάστηκε ως μια μη καταστροφική τεχνική απεικόνισης που μπορούσε να δώσει τομογραφικές εικόνες του αμφιβληστροειδούς χιτώνα και της στεφανιαίας αρτηρίας (Huang, et al., 1991). Επιπλέον, η ικανοποιητική αξονική και πλευρική διακριτική ικανότητα, η δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων από απόσταση χωρίς προετοιμασία δείγματος, καθώς και η χαμηλής έντασης υπέρυθη ακτινοβολία διερεύνησης, κατέστησαν την OCT ιδανική για μελέτη ευαίσθητων βιολογικών δειγμάτων, παρέχοντας την δυνατότητα χρήσης σε *in vivo* μετρήσεις. Διατάξεις που υλοποιούν την OCT είναι πλέον και εμπορικά διαθέσιμες για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών σε τομείς της βιοϊατρικής, πέραν αυτού της οφθαλμολογίας, όπως για παράδειγμα στη δερματολογία, τη γαστρεντερολογία, την ουρολογία, τη γυναικολογία, τη νευροχειρουργική και τη ρευματολογία.

Λόγω της μοναδικότητας ορισμένων έργων τέχνης, όταν κρίνεται απαραίτητη η εξέταση της δομής τους, απαιτείται η επιλογή μεθόδων που επιφέρουν τις ελάχιστες δυνατές βλάβες. Μια οπτική μέθοδος με εφαρμογές στη διαγνωστική ιατρική φάνηκε να καλύπτει αυτή την ανάγκη. Οι πρώτες έρευνες για την εφαρμογή της τομογραφίας οπτικής συμφωνίας σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς δημοσιεύτηκαν το 2004 από τους Yang et al., Targowski et al. και Liang et al. (Yang et al., 2004, Targowski et al., 2004, Liang et al., 2004). Σε αυτές τις εργασίες η OCT χρησιμοποιήθηκε στην απεικόνιση αντικειμένων από νεφρίτη, στιλβωτικών στρωμάτων σε πορσελάνη και φαγεντιανή, καθώς και στρωμάτων βερνικιού και λαζούρας¹ σε πίνακες ζωγραφικής, ενώ προτάθηκε και ως τεχνική εντοπισμού πλαστογραφιών σε αντικείμενα από νεφρίτη.

Για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της OCT στην απεικόνιση της διαστρωμάτωσης σε πίνακες ζωγραφικής, συγκρίθηκε η εικόνα που λαμβάνεται μέσω της OCT με αυτήν που προκύπτει από την μικροσκοπική παρατήρηση της διατομής του αντιστοίχου φυσικού δείγματος και διαπιστώθηκε ικανοποιητική συμφωνία για τα ημιδιαφανή

¹ Λαζούρα: η ελληνική μετάφραση του όρου glaze όταν αυτός αναφέρεται σε πίνακες ζωγραφικής. Αποτελείται από μια ποσότητα συνδετικού μέσου ζωγραφικής με μικρή συγκέντρωση χρωστικής ουσίας, είναι ένα ημιδιαφανές στρώμα χρώματος που εφαρμόζεται συνήθως πάνω σε στεγνό χρώμα αλλάζοντας την εικόνα του.

στρώματα βερνικιού και λαζούρας στα ανώτερα επίπεδα των πινάκων (Arecchi et al. 2004, 2005), Πάνω σε αυτή την παρατήρηση, προτάθηκε η σταδιακή αντικατάσταση της επεμβατικής δειγματοληψίας από την OCT, η οποία είχε επιπλέον τη δυνατότητα πολλαπλών σημείων ελέγχου, παρέχοντας μια αντιπροσωπευτικότερη απεικόνιση του υπό μελέτη αντικειμένου (Liang et al.2005 a).

Η τομογραφία οπτικής συμφωνίας αποτέλεσε κατάλληλη τεχνική για την παρακολούθηση της διαδικασίας στεγνώματος του βερνικιού, ώστε να ελεγχθεί το κατά πόσο η εκάστοτε στρώση ακολουθεί την τραχύτητα του υποστρώματος (Liang et al.2005 b) και πως κάτι τέτοιο εξαρτάται από το μοριακό βάρος του βερνικιού (Targowski et al.2006).

Άλλες δυνατότητες της OCT που ερευνήθηκαν ήταν η απεικόνιση της αποδόμησης που έχει υποστεί περγαμινή κάτω από στρώμα μελάνης (Góga et al. 2006), η καταγραφή των σημαδιών διάτρησης φύλλων χρυσού σε πίνακα (Adler et al. 2007) και ο εντοπισμός προπαρασκευαστικών σκίτσων κάτω από στρώματα μπογιάς. Σε πολλές περιπτώσεις, η τεχνολογία OCT παρέχει εικόνα μεγαλύτερης αντίθεσης από την ανακλαστογραφία υπερύθρου, λόγω της ικανότητας απεικόνισης της διαστρωμάτωσης (Liang et al.2005 a, Liang et al. 2005 b , Adler et al. 2007, Liang et al. 2008, Spring et al.2008)

Από την αρχή της εφαρμογής της τεχνολογίας OCT σε πίνακες ζωγραφικής είχε γίνει αντιληπτό το βασικό μειονέκτημα της έντονης σκέδασης που υφίσταται η ακτινοβολία διερεύνησης στα χρωματικά στρώματα του πίνακα, μειώνοντας έτσι το βάθος διείσδυσης της τεχνικής. Σε μια πρώτη συστηματική εξέταση της αποτελεσματικότητας της OCT στην απεικόνιση στρωμάτων χρώματος, 47 εμπορικά διαθέσιμα χρώματα αναλύθηκαν με OCT σε δύο διαφορετικά κεντρικά μήκη κύματος, $\lambda=0,83 \mu\text{m}$ και $\lambda=1,55 \mu\text{m}$, και διαπιστώθηκε ότι η ποιότητα απεικόνισης ήταν καλύτερη όταν χρησιμοποιήθηκε ακτινοβολία με το μεγαλύτερο κεντρικό μήκος κύματος. Αυξάνοντας όμως το μήκος κύματος, μειώθηκε η αξονική διακριτική ικανότητα (Szkulmowska et al. 2007)

Παραμένοντας στην περιοχή των χαμηλών μηκών κύματος για την ακτινοβολία διερεύνησης (κόκκινη περιοχή του ορατού) και επιλέγοντας την καλύτερη αξονική διακριτική ικανότητα αντί του μεγαλύτερου βάθους διείσδυσης, οι Latour et al. με διάταξη FF-OCT συμβολομέτρου τύπου Mirau κατόρθωσαν να πάρουν αξονική διακριτική ικανότητα $1,5 \mu\text{m}$ και πλευρική $1,0 \mu\text{m}$ (ενώ μέχρι τότε η αξονική διακριτική ικανότητα ήταν μερικών μm) στην απεικόνιση χρωματιστής λάκας σε πλάκες και του εξωτερικού στρώματος ενός ιστορικού βιολιού. (Latour et. al, 2007).

Για πολλά έργα τέχνης, μια συνηθισμένη τεχνική συντήρησης είναι η αφαίρεση του αλλοιωμένου στρώματος βερνικιού, το οποίο συνήθως υποβαθμίζει την εικόνα τους, με μηχανικό ή χημικό τρόπο, από την εξωτερική τους επιφάνεια. Η OCT, λόγω της ικανότητάς της να δίνει καλές εικόνες ημιδιαφανών στρωμάτων, προτάθηκε για έναν πιο ενεργό ρόλο στην διαδικασία συντήρησης, μετρώντας το βάθος καθαρισμού και

υπολογίζοντας το πάχος του εναπομείναντος στρώματος βερνικιού κατά τον χημικό καθαρισμό, ώστε αυτός να τερματιστεί πριν την πρόκληση βλάβης στο υπόστρωμα (Fontana et al., 2007, Liang et al., 2008). Πειραματικά έχει γίνει αποδόμηση του φθαρμένου βερνικιού από πίνακες ζωγραφικής με χρήση λέιζερ, κατά την οποία έχει γίνει προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί η OCT για την παρακολούθηση της κατάστασης των στρωματώσεων κατά τα στάδια της ακτινοβόλησης (Góra et al. 2007 a, Góra et al. 2007 b, Targowski et al. 2008, Targowski et al. 2009).

Διευρύνοντας την έρευνα πάνω στην αποτελεσματικότητα της OCT στην απεικόνιση χρωματικών στρωμάτων, οι Liang et al. δημοσίευσαν το 2007 μια πειραματική εκτίμηση του βέλτιστου φασματικού παραθύρου για την τεχνική, γύρω στα 2,2 μm, πραγματοποιώντας μετρήσεις σε μια σειρά από ελαιοχρώματα (Liang et al., 2007). Στην ίδια τιμή κατέληξαν και αργότερα το 2013, μετά από μια πιο εκτεταμένη έρευνα σε ελαιοχρώματα και χρώματα τέμπρας (Liang et al., 2013)

Το γυαλί είναι ένα ιδανικό υλικό για την OCT και έτσι το 2007 ξεκίνησε μια πιο εντατική έρευνα με σκοπό την απεικόνιση της εσωτερικής δομής, της διαστρωμάτωσης, των θέσεων πιθανών βλαβών και του σταδίου διάβρωσής τους (Liang et al., 2007, Liang et al., 2008 b, Targowski et al., 2008, Hughes et al., 2010).

Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή της OCT σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς ήταν η εφαρμογή της σε διαγνωστικά πειράματα ως βοηθητική τεχνική της στρωματογραφίας με LIBS (Laser-Induced Breakdown spectroscopy). Μετρώντας το βάθος αποδόμησης πριν και μετά από κάθε διαδοχικό παλμό λέιζερ, μπορεί να αντιστοιχηθεί κάθε μέτρηση σε συγκεκριμένο βάθος του δείγματος, κάτι πολύ σημαντικό σε περιπτώσεις όπου η σύσταση αλλάζει έντονα κατά μήκος της κατεύθυνσης της δέσμης με αποτέλεσμα η ταχύτητα αποδόμησης να μην παραμένει σταθερή (Kwiatkowska et al., 2009, Targowski, et al., 2009 b).

Το 2011 παρουσιάστηκαν αποτελέσματα της εφαρμογής της OCT στον εντοπισμό σημείων ευαισθησίας σε πέτρινα έργα τέχνης (Bemand et al., 2011).

Σε πειραματικά αποτελέσματα που δημοσιεύτηκαν, το 2015, σε 2 άρθρα από την ίδια ερευνητική ομάδα (Cheung et al. 2015, 2015 b) έγιναν εμφανείς οι περιορισμοί, αλλά και οι δυνατότητες βελτίωσης των διατάξεων OCT στην κάλυψη δύο στόχων, αυτού της βέλτιστης αξονικής διακριτικής ικανότητας και του βέλτιστου βάθους απεικόνισης σε ζωγραφικούς πίνακες. Μια διάταξη Fd-OCT κεντρικού μήκους κύματος $\lambda=810$ nm υψηλής διακριτικής ικανότητας και καλύτερης ευαισθησίας κατόρθωσε να συλλέξει τομογραφίες έντονης αντίθεσης με αξονική διακριτική ικανότητα 1,2 μm (στο βερνίκι και στο χρώμα) με βελτιωμένη αντίθεση εικόνας. Ενώ μια άλλη διάταξη Fd-OCT κεντρικού μήκους κύματος στα 1960 nm επέτρεψε μεγάλο βάθος διερεύνησης σε υλικά που παρουσιάζουν έντονη σκέδαση (και χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό), ωστόσο με αξονική διακριτική ικανότητα 9 μm (στο χρώμα).

Σταδιακά, η OCT άρχισε να χρησιμοποιείται στην μελέτη έργων τέχνης όλο και περισσότερο συνδυαστικά με άλλες τεχνικές. Συνδυάστηκε με την MA-XRF (macro

X-ray fluorescence- μακροσκοπική φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X), μια τεχνική προσδιορισμού της χημικής σύστασης δειγμάτων και μαζί εφαρμόστηκαν στην απεικόνιση υλικών εικονογράφησης ιστορημένων χειρόγραφων (Targowski et al., 2015) αλλά και στον εντοπισμό, σε πίνακα του 17ου αιώνα, της θέσης χρώματος που βρίσκεται σε χρήση από το 2ο μισό του 19ου αιώνα, ώστε να διαπιστωθεί αν πρόκειται για απόδειξη πλαστογραφίας ή μεταγενέστερης διαδικασίας συντήρησης (Iwanicka et al., 2016, 2018). Αν και η NLM (Non-linear microscopy -μη γραμμική μικροσκοπία) πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσοχή, ώστε να μην βλάψει φωτοευαίσθητα δείγματα, εφαρμόστηκε με την OCT και ο συνδυασμός τους κατάφερε σε ορισμένες περιπτώσεις να δώσει εικόνες των στρωμάτων βερνικιών με καλύτερη αντίθεση (Liang et al., 2017). Η OCT επίσης συνδυάστηκε με την τεχνική της πολυφασματικής υπέρυθρης ανακλαστογραφίας (multispectral infrared reflectography) για την διερεύνηση ενός αντικειμένου, συνήθως πίνακα, και σε άλλα μήκη κύματος πέρα από αυτό της OCT (Liang et al., 2014, Targowski et al., 2018, Striova et al., 2018). Η εφαρμογή της OCT μαζί με την τεχνική της απεικόνισης THz στο πεδίο του χρόνου (terahertz time domain imaging) αν και μειώνει την διακριτική ικανότητα και την αντίθεση εικόνας, επιτρέπει βάθος απεικόνισης μέχρι το κατώτατο στρώμα ενός πίνακα (Koch Dandolo et al., 2019). Για την μελέτη των στρωμάτων επικάλυψης ξύλου επιστρατεύτηκε η μικροσκοπία OCT (Gurov et al., 2018) καθώς και διατάξεις που συνδυάζουν την OCT και την υπερφασματική απεικόνιση (hyperspectral imaging) (Dingemas et al., 2015), αλλά και την OCT με την μικρο-υπολογιστική τομογραφία ακτινοβολίας σύγχροτρον (synchrotron radiation micro-computed tomography) (Fiocco et al., 2019).

Με την καθιέρωση της OCT στον τομέα της έρευνας αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς, η τεχνική άρχισε να εφαρμόζεται και από τους συντηρητές τέχνης σε περιπτώσεις όπου τα υλικά το επέτρεπαν. Έτσι χρησιμοποιήθηκε για διερευνητικές μετρήσεις πάνω στην επονομαζόμενη ‘σταυροθήκη του Βησσαρίωνα’, σε στιλβωτικά πορσελάνης κινέζικων σκευών τύπου Song Jun, ενώ ήταν και μια από τις πολλές τεχνικές που εφαρμόστηκαν σε πίνακες όπως ο ημιτελής πίνακας του Leonardo Da Vinci “Adoration of the Magi”, ο πίνακας του ιδίου “Madonna dei Fusi” και η εκδοχή του Άμστερνταμ από την σειρά των Ηλιοτροπίων του Vincent Van Gogh.

Όσο εξελίσσονται οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται η OCT, τόσο αυξάνονται και οι ανάγκες για γρηγορότερη ανάλυση δεδομένων. Η OCT είναι μια χρήσιμη απεικονιστική τεχνική κυρίως για δομές με έντονη διαστρωμάτωση και η ένταξη της σε κάποια προχωρημένη εφαρμογή, όπως ο καθαρισμός πινάκων ζωγραφικής με ακτινοβολία λέιζερ, χρειάζεται αυτοματοποιημένη διαδικασία επεξεργασίας των μετρήσεων. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στις ιατρικές εφαρμογές δεν είναι εφαρμόσιμοι σε μετρήσεις πολύ λεπτών ακανόνιστων στρωμάτων, οπότε οι διάφορες ερευνητικές ομάδες έχουν αναζητήσει και προτείνει αριθμητικές μεθόδους που υπολογίζουν το πάχος του κάθε στρώματος (Callewaert et al., 2017, Sylwestrzak et al., 2017).

Από την ένταξη της τομογραφίας οπτικής συμφωνίας στον κλάδο των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς γίνεται προσπάθεια βελτίωσης των πειραματικών

διατάξεων, των πηγών ακτινοβολίας και των αλγορίθμων επεξεργασίας των δεδομένων, ενώ παρακινείται η ενεργός δράση στον τομέα της συντήρησης. Αν και η τεχνολογία αυτή αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος ενός μικρού αριθμού ερευνητών, το επιστημονικό πλαίσιο στο οποίο συμμετέχει διευρύνεται σταθερά.

Κεφάλαιο 2

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

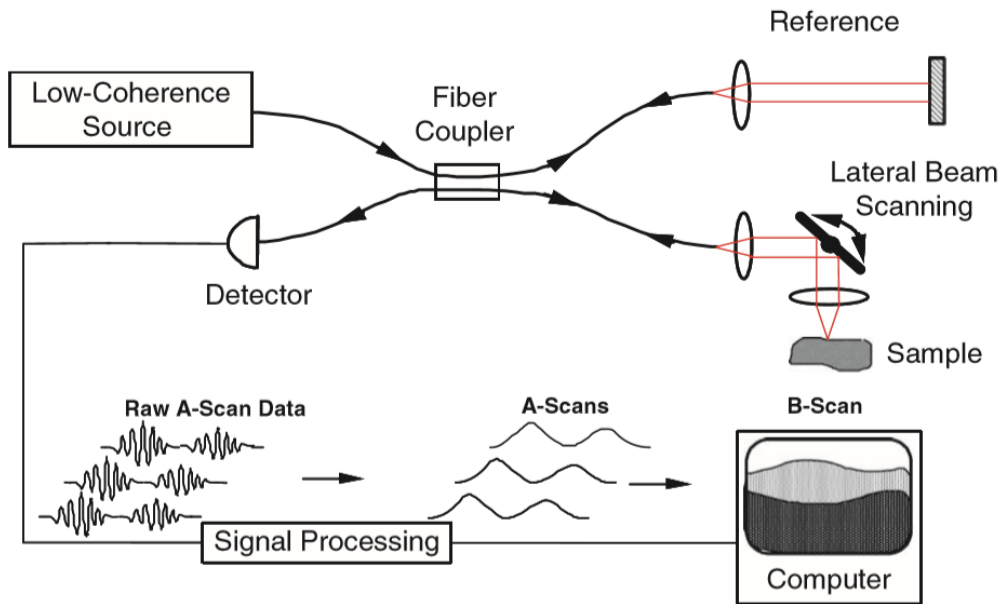
2.1 Αρχές λειτουργίας της Τομογραφίας Οπτικής Συμφωνίας

Ένα τυπικό σύστημα τομογραφίας οπτικής συμφωνίας που βασίζεται στο συμβολόμετρο τύπου Michelson οπτικών ινών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1. Σε αυτήν την περίπτωση, μια δέσμη φωτός που εκπέμπεται από πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας με ένα εύρος μηκών κύματος, Δλ, κατευθύνεται σε διαχωριστή δέσμης/ συζεύκτη 2x2 από όπου διαιρείται σε δύο δέσμες. Η μία από αυτές κατευθύνεται σε ένα κάτοπτρο αναφοράς, όπου ανακλάται και επιστρέφει, ενώ η δεύτερη οδηγείται προς το υπό μελέτη αντικείμενο. Στη διαδρομή πριν το αντικείμενο, υπάρχει σύστημα που επιτρέπει την εστίαση και τη σάρωση της δέσμης στα σημεία ενδιαφέροντος του δείγματος. Το φως που ανακλάται ή οπισθοσκεδάζεται από την εσωτερική δομή του δείγματος, επιστρέφει στον συζεύκτη και επανασυνδυάζεται με αυτό που ανακλάται από το κάτοπτρο αναφοράς παρέχοντας έτσι ένα σήμα συμβολής στο φωτοανιχνευτή, ο οποίος συνδέεται με ένα σύστημα καταγραφής δεδομένων.

Το σήμα που καταγράφεται, μετά από επεξεργασία, αποδίδει σε κάθε σημείο κατά την διεύθυνση της κατακόρυφης δέσμης διερεύνησης, που έχει εστιαστεί σε συγκεκριμένη θέση οριζόντιου επιπέδου, τη σχετική ένταση με την οποία αυτό οπισθοσκεδάζει το φως. Η αντιστοίχιση αυτή αποτελεί μια αναπαράσταση των οπτικών ιδιοτήτων και κατ' επέκταση της εσωτερικής δομής του δείγματος συναρτήσει του βάθους. Αυτό είναι και το A-scan της OCT. Μετακινώντας την δέσμη πλευρικά και καταγράφοντας διαδοχικά τα A-scan για γειτονικές θέσεις εστίασης, παίρνουμε διδιάστατη εικόνα, που αποτελεί το τομογράφημα του δείγματος και ονομάζεται B-scan. Η παράθεση πολλαπλών B-scan οδηγεί στην τρισδιάστατη απεικόνιση ενός επιλεγμένου όγκου. (Εικ. 2.1)

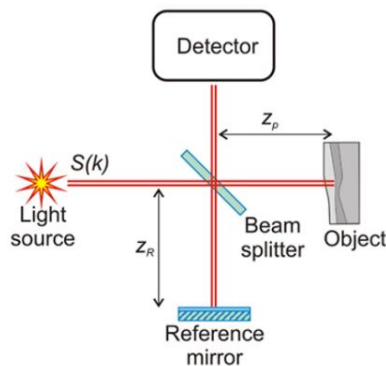
Η ιδέα της τομογραφίας οπτικής συμφωνίας θεωρείται ανάλογη με αυτή του radar, ή σε μικρότερη κλίμακα με αυτή της υπερηχογραφίας, όπου για να υπολογιστεί η απόσταση ενός κέντρου σκέδασης μετράται ο χρόνος που χρειάζεται το κύμα για να ταξιδέψει από τον πομπό μέχρι να σκεδαστεί και πάλι πίσω σε ανιχνευτή όπου και καταγράφεται η έντασή του.

Στην τομογραφία οπτικής συμφωνίας, όπου το ενδιαφέρον εστιάζεται στην εσωτερική δομή ημιδιαφανών αντικειμένων, χρησιμοποιείται συνήθως ακτινοβολία στην περιοχή του υπέρυθρου. Η μεγάλη ταχύτητα των κυμάτων και οι μικρές αποστάσεις καθιστούν την καταγραφή των χρόνων «αντήχησης» με απλά ηλεκτρονικά μέσα αδύνατη και έτσι επιστρατεύεται η τεχνική της συμβολομετρίας χαμηλής συμφωνίας (low coherence interferometry- LCI)



Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος OCT που δείχνει τη διαδρομή μιας δέσμης φωτός από την φωτεινή πηγή μέχρι τον ανιχνευτή και την τελική απεικόνιση μιας διατομής. Οι μαύρες γραμμές αντιπροσωπεύουν οπτικές ίνες, ενώ οι κόκκινες οπτικές δέσμες στο χώρο. (Izatt & Choma, 2008)

Θυμίζουμε ότι στη συμβολομετρία φωτός μια φωτεινή δέσμη διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους δέσμες, καθεμιά από τις οποίες διανύει μια διαφορετική διαδρομή, στο βραχίονα αναφοράς και στο βραχίονα δείγματος, αποκτώντας πλέον διαφορετική φάση. Όταν οι δύο αυτές δέσμες, που προηγουμένως ήταν όμοιες, συμβάλλουν, αυτή η μεταβολή στη φάση, που αποδίδεται στην διαφορά των οπτικών δρόμων μέχρι να επανασυνδεθούν, καθορίζει και το αν θα παρατηρηθεί καταστροφική ή ενισχυτική συμβολή. Στην περίπτωση της συμβολομετρίας χαμηλής συμφωνίας, η ενισχυτική συμβολή συμβαίνει για διαφορές μεταξύ των οπτικών δρόμων που δεν ξεπερνούν κατά πολύ το μήκος συμφωνίας της πηγής της δέσμης.



Εικόνα 2.2: Απλοποιημένη διάταξη OCT (Targowski et al., 2012)

Χρησιμοποιώντας ως βάση την απλοποιημένη διάταξη OCT που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2 και θεωρώντας ότι ο διαχωριστής δέσμης (beam splitter-BS) χωρίζει τη δέσμη φωτός σε δύο ίσες έντασης μέρη, ότι το κάτοπτρο ανακλαστικότητας R_R βρίσκεται σε απόσταση z_R από το BS και ότι το δείγμα αποτελείται από N εσωτερικά στρώματα, καθένα σε οπτική απόσταση z_{p_n} από το διαχωριστή δέσμης, προκύπτει η παρακάτω σχέση για την ένταση της συμβολής από διατύπωση των Izatt & Choma (2008):

$$I(k) = \frac{1}{4} S(k) \left[R_R + \sum_{n=1}^N R_{p_n} + \sum_{n \neq m=1}^N \sqrt{R_{p_n}} \sqrt{R_{p_m}} \cos[2k(z_{p_n} - z_{p_m})] \right. \\ \left. + 2 \sum_{n=1}^N \sqrt{R_{p_n}} \sqrt{R_R} \cos[2k(z_{p_n} - z_R)] \right] \quad (1)$$

όπου $S(k)$: η φασματική πυκνότητα του φωτός της πηγής και R_{p_n} : ο συντελεστής ανάκλασης/οπισθοσκέδασης του n -οστού στρώματος του δείγματος.

Ο πρώτος όρος του αθροίσματος εκφράζει την ανακλώμενη ένταση από το κάτοπτρο αναφοράς ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει το άθροισμα των ανακλώμενων εντάσεων του δείγματος. Ο τέταρτος όρος είναι αυτός που παρουσιάζει ενδιαφέρον για την OCT γιατί περιγράφει την εξάρτηση του σήματος συμβολής από την διαφορά μεταξύ των οπτικών δρόμων στο σκέλος αναφοράς και στο σκέλος του δείγματος. Ο τρίτος όρος αθροίσματος αφορά τη συσχέτιση των κυμάτων που ανακλώνται από διαφορετικά βάρη του δείγματος και δεν είναι επιθυμητός γιατί εμφανίζει ψευδείς εικόνες σε τυπικά συστήματα OCT.

Από την παραπάνω σχέση γίνεται εμφανές ότι κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος OCT ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη δυνατότητα επιλογής της ανακλαστικότητας R_R του κατόπτρου αναφοράς, ώστε η ανακλώμενη από αυτό ένταση να μην κυριαρχεί εξαλείφοντας τους άλλους όρους, ενώ ταυτόχρονα να ενισχύεται ο τέταρτος όρος, μέσω του $\sqrt{R_R}$, επιτρέποντας έτσι στον τρίτο όρο να θεωρηθεί αμελητέος.

2.2 Είδη διατάξεων τομογραφίας Οπτικής Συμφωνίας

Οι διατάξεις OCT χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιούν για την μετατροπή των πληροφοριών του σήματος συμβολής σε πληροφορίες για την αξονική κατανομή των οπτικών ιδιοτήτων του δείγματος.

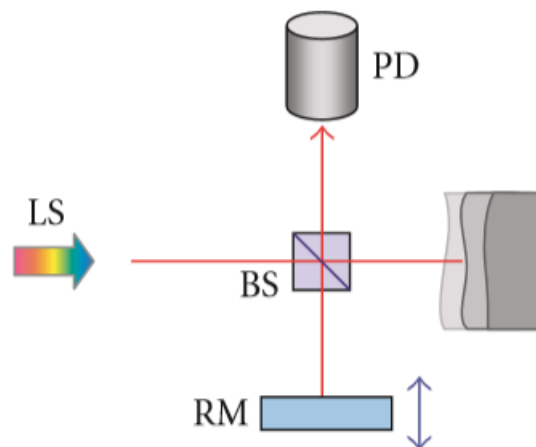
Η πρώτη κατηγορία διατάξεων OCT, που ονομάζεται Time-domain OCT (Td-OCT), χαρακτηρίζεται από την κίνηση του κατόπτρου αναφοράς με μηχανικό τρόπο, ενώ συγχρόνως καταγράφεται η ένταση του σήματος συμβολής. Στη δεύτερη κατηγορία, την Fourier-domain OCT (Fd-OCT), υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Fourier της

φασματικής κατανομής του σήματος συμβολής, πάντα διατηρώντας το κάτοπτρο αναφοράς σταθερό.

2.2.1 Time-domain OCT (Td-OCT)

Στην διάταξη Td-OCT, τα όρια, στα οποία κινείται το κάτοπτρο αναφοράς, καθορίζουν το πόσο μεγάλο θα είναι το εύρος του βάθους του αντικειμένου που είναι προσβάσιμο στην τεχνική, αν η προσπίπτουσα δέσμη παραμένει κάθε φορά επαρκώς εστιασμένη στο επιθυμητό επίπεδο. Αυτό το θεωρητικά απεριόριστο βάθος απεικόνισης είναι από τα πλεονεκτήματα της τεχνικής μαζί με την απλότητα της λειτουργίας και του σχεδιασμού της, λόγω της οποίας η χρήση της για μετρήσεις προηγήθηκε αυτής των άλλων κατηγοριών OCT.

Μια τυπική διάταξη Time-domain OCT παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3 .Σε αυτή τη διάταξη, η πηγή (LS) είναι μια πηγή ευρέως φάσματος, το κάτοπτρο αναφοράς βρίσκεται σε θέση z_R από το διαχωριστή δέσμης, BS, η οποία μεταβάλλεται με σταθερή ταχύτητα ενώ συγχρόνως ο ανιχνευτής καταγράφει το σήμα συμβολής για κάθε z_R ως ολοκλήρωμα του $I(\omega)$ πάνω σε όλη τη συχνότητα ω .



Εικόνα 2.3: Τυπική διάταξη Td-OCT (Targowski et al., 2006)

Σε αυτήν την περίπτωση (Targowski et al., 2008), θεωρώντας ότι το κάτοπτρο αναφοράς έχει ανακλαστικότητα R_r και το δείγμα μια μόνο επιφάνεια ανακλαστικότητας R_s , η ένταση του σήματος συμβολής για μία μόνο φασματική συνιστώσα στο βραχίονα ανίχνευσης της OCT, δίνεται από τη σχέση:

$$I(\omega) = I_r(\omega) + I_s(\omega) + 2\sqrt{I_r(\omega)I_s(\omega)} \cos(\omega \tau_{rs}) = S(\omega)(R_r + R_s + 2\sqrt{R_r R_s} \cos(\omega \tau_{rs})) \quad (2)$$

όπου τ_{rs} : η χρονική καθυστέρηση μεταξύ της δέσμης αναφοράς και της δέσμης διερεύνησης λόγω της διαφοράς των οπτικών δρόμων. ($\tau_{rs} = 2 \frac{z_R - z_S}{c}$) και

z_S : οπτική απόσταση της επιφάνειας του δείγματος από τον διαχωριστή δέσμης

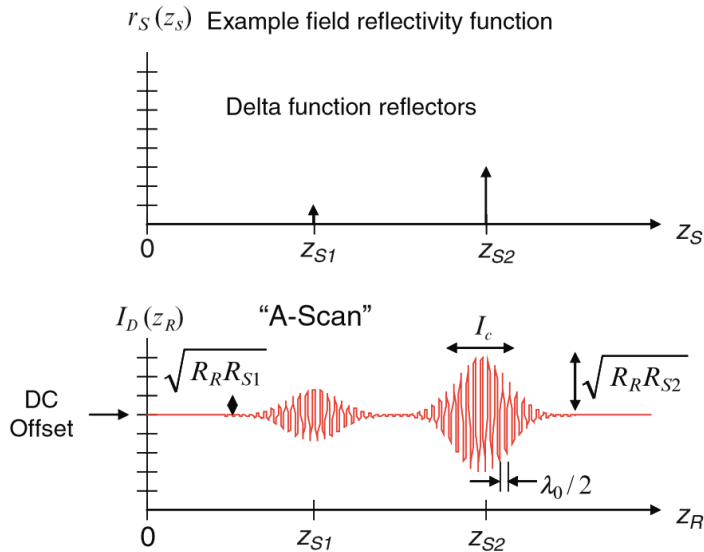
Όπως διατυπώθηκε από τον Targowski et al. (2008), το σήμα καταγράφεται από τον ανιχνευτή ως ολοκλήρωμα σε όλη την ω , παίρνοντας τη μορφή:

$$\begin{aligned} I_D &= \int I(\omega) d\omega = (R_r + R_s) \int S(\omega) d\omega + 2\sqrt{R_r R_s} \operatorname{Re} \left[\int S(\omega) \exp(i\omega \tau_{rs}) d\omega \right] \\ &= (R_r + R_s) \int S(\omega) d\omega + 2\sqrt{R_r R_s} \operatorname{Re}[\Gamma(\tau_{rs})] \quad (3) \end{aligned}$$

Με τη μεταβολή του z_R , οι δύο πρώτοι όροι του αθροίσματος παραμένουν σταθεροί ενώ η συνάρτηση $\operatorname{Re}[\Gamma(\tau_{rs})]$ μεταβάλλεται, με την τελευταία να είναι μη μηδενική σε μία περιοχή του $\tau_{rs} = 0$ ($z_R = z_S$), το εύρος της οποίας καθορίζεται από αυτό της συνάρτησης φακέλου της $\operatorname{Re}[\Gamma(\tau_{rs})]$. Σύμφωνα με το θεώρημα Wiener-Khinchine, η φασματική πυκνότητα $S(\omega)$, που χαρακτηρίζει την πηγή είναι ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης $\Gamma(\tau)$.

Μεταβάλλοντας το z_R του κατόπτρου μπορούμε να βρούμε την τιμή για την οποία ισχύει $z_R = z_S$, δηλαδή $\tau_{rs} = 0$, προσδιορίζοντας έτσι την οπτική απόσταση από το διαχωριστή δέσμης (BS), κατά την διεύθυνση της δέσμης διερεύνησης στην οποία βρίσκεται η δομή που προκάλεσε την ανάκλαση. Όσο μικρότερο είναι το μήκος συμφωνίας μιας πηγής τόσο καλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα με την οποία εντοπίζεται το z_S .

Κατά την εφαρμογή της Td-OCT, στις μετρήσεις του σήματος I_D συναρτήσει της θέσης του κατόπτρου αναφοράς (Εικ. 2.4) εκτός από τον προσδιορισμό των θέσεων των ανακλαστών, μπορεί να καταγραφεί επιπλέον το σχετικό πλάτος του σήματος, το οποίο είναι ανάλογο της ρίζας του συντελεστή ανάκλασης των δομών που μας ενδιαφέρουν. Η απεικόνιση των συντελεστών ανάκλασης για κάθε θέση z_S στο εσωτερικό του δείγματος κατά τη διεύθυνση της δέσμης διερεύνησης αποτελεί το A-scan της OCT. Μετακινώντας πλευρικά τη δέσμη σε διαδοχικές θέσεις πάνω στο δείγμα, λαμβάνεται το B-scan.



Εικόνα 2.4: Μετρήσεις σήματος συμβολής I_D , στην περίπτωση δύο ανακλαστών, συναρτήσει της θέσης του κατόπτρου αναφοράς (Izatt & Choma, 2008)

2.2.2 Fourier-domain OCT (Fd-OCT)

Στις διατάξεις Fd-OCT, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το κάτοπτρο αναφοράς παραμένει σταθερό σε θέση που απέχει από το διαχωριστή δέσμης απόσταση περίπου ίση με αυτήν που απέχει και το δείγμα. Στη διάταξη Fd-OCT γίνεται καταγραφή του σήματος συμβολής συναρτήσει του λ και έπειτα εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier. Πριν την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier, γίνεται επεξεργασία της φασματικής κατανομής του σήματος συμβολής, ώστε να προκύψει συνάρτηση με μια ομοιόμορφη δειγματοληψία ως προς τον κυματριθμό (k) ή την συχνότητα (ω). Επιπλέον, αν κριθεί απαραίτητο, εφαρμόζεται σε αυτή μια συνάρτηση παραθύρου επειδή η φασματική πυκνότητα δεν είναι πάντοτε στην κατάλληλη μορφή για τον μετασχηματισμό.

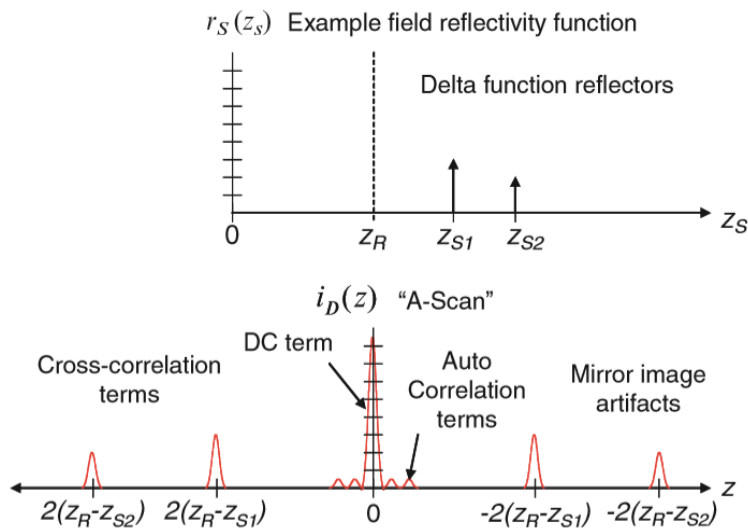
Όπως φαίνεται από τη σχέση (2) που περιγράφηκε στο πλαίσιο της Td-OCT και λαμβάνει υπόψη την ανάκλαση από μία μόνο επιφάνεια δείγματος, στο σήμα $I(\omega)$, η φασματική πυκνότητα έχει υποστεί διαμόρφωση από συνάρτηση συνημιτόνου με περιοδικότητα που εξαρτάται από την διαφορά της οπτικής διαδρομής. Στην περίπτωση πολλαπλών επιφανειών στο εσωτερικό του δείγματος, θα υπήρχε μια υπέρθεση τέτοιων διαμορφώσεων, όπου η εκάστοτε περιοδικότητα εμπεριέχει την πληροφορία της διαφοράς της οπτικής διαδρομής που αντιστοιχεί στην κάθε επιφάνεια. Επομένως ένας μετασχηματισμός Fourier θα έδινε ένα φάσμα διαφορών των οπτικών διαδρομών που θα μπορούσε να αντιστοιχηθεί με τις θέσεις των διαφόρων επιπέδων στο εσωτερικό του δείγματος.

Η σχέση για τον μετασχηματισμό Fourier της φασματικής κατανομής του σήματος συμβολής της OCT, όπως έχει προκύψει από τη (2) και έχει διατυπωθεί από τον Targowski et al. (2008) είναι:

$$\begin{aligned}
FT[I(\omega)] &= (R_s + R_r)FT[S(\omega)] + 2\sqrt{R_s R_r} FT[S(\omega) \cos(\omega \tau_{rs})] \\
&= (R_s + R_r)\Gamma(\tau) + 2\sqrt{R_s R_r} \Gamma(\tau \pm \tau_{rs}) \quad (4)
\end{aligned}$$

Η έξοδος $FT[I(\omega)]$ είναι μη μηδενική στις περιοχές των $\tau = 0$ και $\tau = \pm \tau_{rs}$ με το εύρος κάθε περιοχής να εξαρτάται και πάλι από το μήκος συμφωνίας της πηγής. Επομένως θεωρητικά, στο κενό και για πηγές του ίδιου κεντρικού μήκους κύματος, η διακριτική ικανότητα των διατάξεων Td-OCT και Fd-OCT ως προς τον προσδιορισμό της θέσης των κέντρων οπισθοσκέδασης/ ανάκλασης στο εσωτερικό του δείγματος κατά την διεύθυνση της δέσμης διερεύνησης, είναι η ίδια.

Θεωρώντας δύο κέντρα οπισθοσκέδασης στις θέσεις z_{s1} , z_{s2} στο εσωτερικό ενός αντικειμένου που μελετάται, η εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier στην κατανομή του σήματος συμβολής της OCT συναρτήσει του κυματάρθμου (Εικ. 2.5) παρουσιάζει κορυφές στις θέσεις $2(z_R - z_{s2})$, $2(z_R - z_{s1})$, 0 , $-2(z_R - z_{s1})$, $-2(z_R - z_{s2})$ το ύψος των οποίων είναι ανάλογο των $\sqrt{R_{s2}}$, $\sqrt{R_{s1}}$, $\sqrt{R_r + R_{s1} + R_{s2}}$, $\sqrt{R_{s1}}$, $\sqrt{R_{s2}}$ αντίστοιχα.



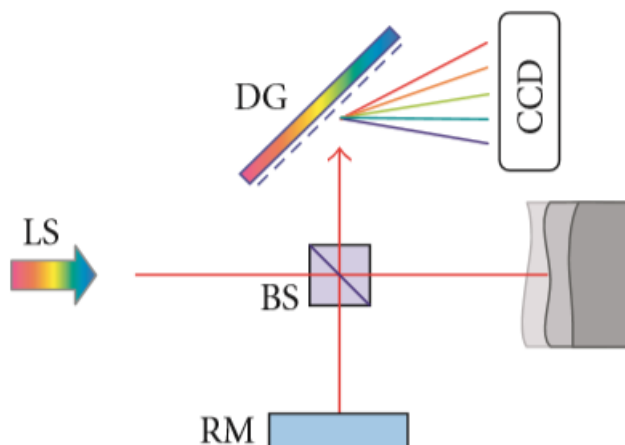
Εικόνα 2.5: Μετασχηματισμός Fourier του σήματος συμβολής της OCT (Izatt & Choma, 2015)

Με τη αφαίρεση του κεντρικού και των κατοπτρικά συμμετρικών όρων, καθώς και την κατάλληλη αντιστοίχιση των τιμών στον z άξονα του διαγράμματος, μπορούμε να λάβουμε την κατανομή των τιμών της ανακλαστικότητα των διαφόρων δομών στο εσωτερικό του δείγματος συναρτήσει της οπτικής τους απόστασης από το διαχωριστή δέσμης, δηλαδή το A-scan.

Τα συστήματα Fd-OCT χωρίζονται και αυτά σε δύο υποκατηγορίες, την Spectral-domain OCT και την Swept-source OCT.

2.2.2.1 Spectral domain OCT

Στην περίπτωση της Spectral-domain OCT, το κάτοπτρο αναφοράς (RM) παραμένει σταθερό, η πηγή φωτός είναι ευρέως φάσματος ενώ το ανιχνευτικό σύστημα αποτελείται από μια φασματομετρική διάταξη, συνήθως ένα φράγμα περίθλασης (diffraction grating -DG), που αναλύει το σήμα συμβολής στις επιμέρους φασματικές του συνιστώσες, οι οποίες και καταγράφονται από μία γραμμική συστοιχία φωτοανιχνευτών. (Εικ. 2.6)

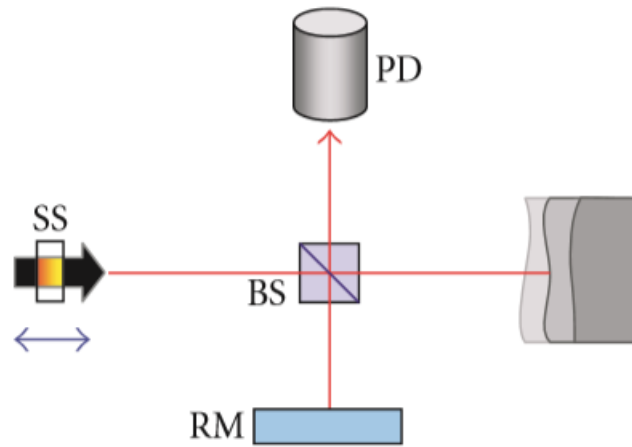


Εικόνα 2.6: Διάταξη Fd-OCT (spectral OCT) (Targowski et al., 2006)

Με το κάτοπτρο σταθερό, το μερικό φάσμα του σήματος συμβολής καταγράφεται σε κάθε μέτρηση και η απεικόνιση βασίζεται στον προσδιορισμό της διαμόρφωσης που έχει υποστεί, με τις επιφάνειες από μεγαλύτερα βάθη του δείγματος να προκαλούν διαμόρφωση μεγαλύτερης συχνότητας. Η ταχύτητα μετρήσεων και επεξεργασίας των δεδομένων, στην Spectral OCT, επιτρέπει την άμεση απεικόνιση της εσωτερικής δομής του όγκου που μας ενδιαφέρει.

2.2.2.2 Swept-source OCT

Στα συστήματα Swept Source OCT το κύριο χαρακτηριστικό είναι η πηγή, η οποία μεταβάλλει με το χρόνο το μήκος κύματος εκπομπής της. Πάντα με σταθερό κάτοπτρο (RM), καταγράφεται από απλό ανιχνευτή το σήμα συμβολής της OCT συναρτήσεως του λ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, καθώς αυτό παίρνει τιμές μέσα σε ένα εύρος $\Delta\lambda$ (Εικ. 2.7)



Εικόνα 2.7: Διάταξη Fd-OCT (swept-source) (Targowski et al., 2006)

Σε αυτήν την περίπτωση, η πηγή παράγει φως μικρού εύρους ζώνης, σαρώνοντας μια περιοχή μηκών κύματος με ταχύτατο ρυθμό. Επιτυγχάνονται έτσι, εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες απεικόνισης, ανάλογες αυτών της Spectral domain OCT.

Κεφάλαιο 3

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΜΙΑΣ OCT ΜΕΤΡΗΣΗΣ

3.1 Αξονική και πλευρική διακριτική ικανότητα

3.1.1 Αξονική διακριτική ικανότητα

Η αξονική διακριτική ικανότητα εκφράζει την ελάχιστη οπτική απόσταση δύο κέντρων σκέδασης, κατά τον άξονα διάδοσης της δέσμης διερεύνησης, ώστε να είναι δυνατή η διάκριση σε ένα A-scan των δύο διαδοχικών κορυφών που τους αντιστοιχούν.

Εξαρτάται από το μήκος χρονικής συμφωνίας της ακτινοβολίας διερεύνησης, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο του εύρους ζώνης της. Σε παλμικές πηγές, ως μήκος συμφωνίας μπορεί να θεωρηθεί το μήκος του παλμού, ενώ σε πηγές CW, ως αυτό που αντιστοιχεί σε χρονική περίοδο κατά την οποία οι ιδιότητες της δέσμης παραμένουν σταθερές.

Ως αξονική διακριτική ικανότητα ορίζεται συνήθως το πλήρες εύρος στο μισό του μεγίστου (Full width half maximum, FWHM) του τελευταίου όρου των αθροισμάτων

$$\begin{aligned} I_D &= \int I(\omega) d\omega = (R_r + R_s) \int S(\omega) d\omega + 2\sqrt{R_r R_s} \operatorname{Re} \left[\int S(\omega) \exp(i\omega \tau_{rs}) d\omega \right] \\ &= (R_r + R_s) \int S(\omega) d\omega + 2\sqrt{R_r R_s} \operatorname{Re}[\Gamma(\tau_{rs})] \quad (3) \end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned} FT[I(\omega)] &= (R_s + R_r) FT[S(\omega)] + 2\sqrt{R_s R_r} FT[S(\omega) \cos(\omega \tau_{rs})] \\ &= (R_s + R_r) \Gamma(\tau) + 2\sqrt{R_s R_r} \Gamma(\tau \pm \tau_{rs}) \quad (4) \end{aligned}$$

που όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 αντιπροσωπεύουν σήμα συμβολής σε σύστημα Td-OCT και τον μετασχηματισμό Fourier του φάσματος του σήματος συμβολής σε σύστημα Fd-OCT αντίστοιχα, όταν έχει θεωρηθεί σε θέση του βραχίονα δείγματος σκεδαστής, ανακλαστικότητας R_s . Το εύρος αυτό είναι συσχετισμένο με την συνάρτηση χρονικής συμφωνίας $\Gamma(\tau)$, που αποτελεί τον μετασχηματισμό Fourier της φασματικής πυκνότητας της πηγής.

Η αξονική διακριτική ικανότητα είναι χαρακτηριστική των ιδιοτήτων της ακτινοβολίας διερεύνησης και για συγκεκριμένη πηγή αναμένεται να είναι η ίδια για κάθε σύστημα που υλοποιεί την μέθοδο είτε αυτό είναι Td-OCT είτε Fd-OCT.

Για πηγή ακτινοβολίας διερεύνησης με γκαουσιανή φασματική πυκνότητα, η αξονική διακριτική ικανότητα στον αέρα, δίνεται από την σχέση (Aumann et al., 2019):

$$\delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \left(\frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda_{FWHM}} \right) \quad (5)$$

όπου λ_0 : το κεντρικό μήκος κύματος της πηγής

και $\Delta \lambda_{FWHM}$: το FWHM εύρος της φασματικής πυκνότητας.

Ο παραπάνω τύπος αντιστοιχεί σε οπτική απόσταση, επομένως η αξονική διακριτική ικανότητα στο εσωτερικό του υλικού που μελετάται δίνεται διαιρώντας την (5) με τον αντίστοιχο δείκτη διάθλασης ομάδας.

Η αξονική διακριτική ικανότητα, όπως φαίνεται στον τύπο (5), βελτιώνεται με την μείωση του κεντρικού μήκους κύματος, λ_0 , και την αύξηση του εύρους ζώνης της πηγής, ωστόσο για μεγάλα Δl , υπεισέρχονται επιπλέον παράμετροι που εμποδίζουν την δυνατότητα βελτίωσής της με περεταίρω διεύρυνση του φάσματος.

Καθώς το εύρος ζώνης αυξάνει, το φάσμα αποκλίνει περισσότερο από μια γκαουσιανή μορφή, κάτι το οποίο οδηγεί στην εμφάνιση έντονων πλευρικών λοβών στην $\Gamma(\tau)$ και σε αδυναμία ανίχνευσης κέντρων ασθενούς σκέδασης που βρίσκονται κοντά σε άλλα μεγάλης ανακλαστικότητας. Επιπλέον, η πιθανή απορρόφηση φασματικών περιοχών, αλλά κυρίως ο διασκεδασμός στον οποίο υπόκειται η δέσμη μεγάλου Δl κατά την διέλευσή της μέσα από ένα υλικό, αλλοιώνουν τη μορφή της φασματικής πυκνότητας και οδηγούν σε απώλεια της αξονικής διακριτικής ικανότητας.

3.1.2 Πλευρική διακριτική ικανότητα

Ως πλευρική διακριτική ικανότητα θεωρείται η διάμετρος της κηλίδας της δέσμης διερεύνησης σε επίπεδο κάθετο στην διεύθυνση διάδοσής, και εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο η δέσμη αυτή εστιάζεται από τα οπτικά στοιχεία του βραχίονα δείγματος του συστήματος OCT.

Για γκαουσιανή δέσμη, μια προσέγγιση της πλευρικής διακριτικής ικανότητας, στο επίπεδο εστίασης, δίνεται από τις σχέσεις που ακολουθούν (Aumann et al., 2019), για διάμετρο κηλίδας στην οποία η ένταση της ακτινοβολίας δεν πέφτει κάτω από το μισό της μέγιστης τιμής στο κέντρο της (FWHM διάμετρος κηλίδας):

$$\delta x = \sqrt{2 \ln 2} w_0 = \sqrt{2 \ln 2} \frac{2 \lambda_0 f_{sys}}{\pi n d} = \sqrt{2 \ln 2} \frac{\lambda_0}{\pi (NA)} \quad (6)$$

όπου w_0 : η ακτίνα στην οσφή της γκαουσιανής δέσμης (εδώ ως ακτίνα ορίζεται η απόσταση από τη θέση μέγιστης έντασης στο κέντρο της κηλίδας μέχρι τα σημεία στα οποία η ένταση έχει ελαττωθεί κατά παράγοντα $1/e^2$)

f_{sys} : η εστιακή απόσταση του οπτικού συστήματος του βραχίονα δείγματος

d : διάμετρος της δέσμης στο φακό εστίασης (και εδώ ως όρια της δέσμης έχουν θεωρηθεί τα σημεία στα οποία η ένταση έχει ελαττωθεί κατά ένα παράγοντα $1/e^2$ ως προς τη μέγιστη τιμή στο κέντρο της κηλίδας)

n : δείκτης διάθλασης του υλικού

(NA) : αριθμητικό άνοιγμα του φακού εστίασης.

Ως δx ορίζεται η FWHM διάμετρος της δέσμης, στο υπόλοιπο κεφάλαιο ως όρια της κηλίδας της δέσμης θεωρούνται τα σημεία εκείνα στα οποία η ένταση έχει ελαττωθεί κατά ένα παράγοντα $1/e^2$ ως προς τη μέγιστη τιμή στο κέντρο της.

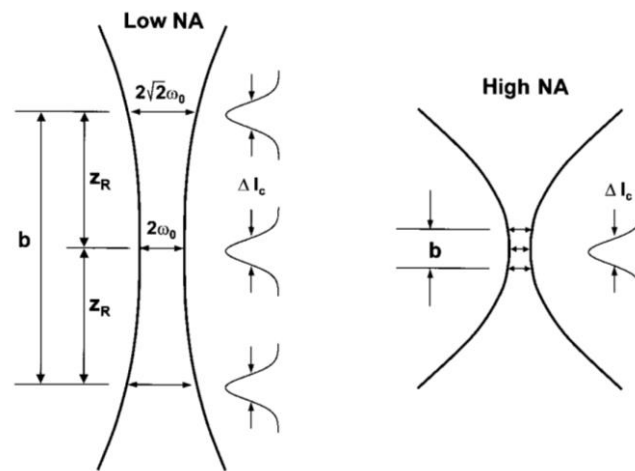
Η πλευρική διακριτική ικανότητα μειώνεται, καθώς απομακρυνόμαστε, κατά τον άξονα διάδοσης z , από την οσφύ της δέσμης, με το εύρος για το οποίο διατηρείται σε μια ικανοποιητική τιμή να ονομάζεται βάθος εστίασης (depth of focus).

Σύμφωνα με την προηγούμενη προσέγγιση για γκαουσιανή δέσμη ακτινοβολίας, αν το βάθος εστίασης οριστεί ως η περιοχή του άξονα διάδοσης για την οποία η ακτίνα της δέσμης διατηρείται μικρότερη ή ίση με $\sqrt{2} w_0$ τότε αυτό δίνεται από την σχέση (Aumann et al., 2019):

$$b = \frac{2\pi n}{\lambda_0} w_0^2 = \frac{n \lambda_0}{2\pi(NA)^2} \quad (7)$$

Όπως φαίνεται και από τις σχέσεις (6) και (7), όσο βελτιώνεται η πλευρική διακριτική ικανότητα στο επίπεδο εστίασης, με αύξηση του αριθμητικού ανοίγματος του φακού του βραχίονα δείγματος, τόσο μειώνεται το εύρος κατά τον άξονα διάδοσης για το οποίο η δέσμη παραμένει επαρκώς εστιασμένη, τόσο μειώνεται δηλαδή το βάθος εστίασης.

Οι τιμές δx , της πλευρικής διακριτικής ικανότητας, και b , του βάθους εστίασης, καθορίζουν το λεγόμενο όγκο εστίασης, με την ακτινοβολία διερεύνησης που επιστρέφει από περιοχές εκτός αυτού, να θεωρείται ασθενής για ανίχνευση. Επομένως, για να επιτευχθεί η εκτενής απεικόνιση της διατομής ενός δείγματος, είναι επιθυμητό ένα μεγάλο βάθος εστίασης.



Εικόνα 3.1: Η διάμετρος της δέσμης και το βάθος εστίασης για μικρό και μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα του συστήματος εστίασης. Στα περισσότερα συστήματα OCT επιλέγεται χαμηλό αριθμητικό άνοιγμα ώστε το βάθος εστίασης, b , να είναι πολύ μεγαλύτερο από το μήκος συμφωνίας, Δl_c , που καθορίζει την αξονική διακριτική ικανότητα (Bouma & Tearney, 2002). Το πόσο υψηλή πλευρική διακριτική ικανότητα μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται από το βάθος εστίασης που επιδιώκεται.

Κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος OCT επιλέγεται ο συνδυασμός εκείνος των επιμέρους παραμέτρων που συμβιβάζει την απαίτηση για ικανοποιητική πλευρική διακριτική ικανότητα με αυτή για επαρκή όγκο εστίασης. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να παρακαμφθεί σε συστήματα Td-OCT δυναμικής εστίασης, όπου κατά τη σάρωση της θέσης του κατόπτρου αναφοράς μετατοπίζεται και το σημείο εστίασης, και κατ' επέκταση η θέση του εστιακού όγκου, μέσα στο υπό μελέτη αντικείμενο.

Η αξονική και πλευρική διακριτική ικανότητα εξαρτώνται από διαφορετικούς μηχανισμούς και για αυτό το λόγο είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.

3.2 Εύρος αξονικής απεικόνισης

Ως εύρος αξονικής απεικόνισης αναφέρεται το εύρος, κατά τον άξονα της δέσμης διερεύνησης, που είναι δυνατόν να απεικονιστεί σε ένα b-scan.

Στην περίπτωση των συστημάτων Td-OCT, η απόσταση μετατόπισης του κατόπτρου αναφοράς, κατά τη διάρκεια καταγραφής της διατομής του μελετώμενου αντικειμένου είναι και αυτή που καθορίζει και το μέγιστο εύρος, κατά τον άξονα των z, που απεικονίζεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι το βάθος εστίασης του οπτικού συστήματος του βραχίονα δείγματος περιορίζει στην πράξη αυτό το εύρος, κάτι το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί όπως ήδη αναφέρθηκε με τη χρήση διατάξεων που επιτρέπουν δυναμική εστίαση της δέσμης διερεύνησης, κατά τη διάρκεια της σάρωσης του δείγματος ως προς το βάθος.

Στην περίπτωση των συστημάτων Fd-OCT, εκτός από το βάθος εστίασης που εισάγει και εδώ περιορισμούς, το εύρος αξονικής απεικόνισης εξαρτάται από την μέγιστη συχνότητα ταλάντωσης που είναι δυνατόν να ανιχνευτεί στην φασματική ανάλυση του σήματος συμβολής της OCT. Στο φάσμα του σήματος συμβολής, οι συνιστώσες με μεγαλύτερες συχνότητες είναι και αυτές που φέρουν την πληροφορία για τα μεγαλύτερα βάθη της μελετώμενης δομής. Συνήθως στις διατάξεις Fd-OCT, η φασματική ανάλυση γίνεται ως προς το μήκος κύματος και μια προσέγγιση του εύρους της αξονικής απεικόνισης δίνεται από τον τύπο (Aumann et al., 2019):

$$z_{max} = \frac{1}{4} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} N$$

όπου N: είναι το πλήθος των δειγματοληπτικών μετρήσεων του φάσματος συμβολής σε ένα καταγεγραμμένο εύρος μηκών κύματος $\Delta\lambda$. Σε διατάξεις spectral OCT, το N αντιστοιχεί στο πλήθος των pixel του γραμμικού ανιχνευτή που καταγράφει το φάσμα συμβολής, ενώ στις διατάξεις Swept Source OCT, δίνεται από το πλήθος των μετρήσεων του σήματος συμβολής που πραγματοποιούνται από τον ανιχνευτή κατά την μεταβολή της συχνότητας ακτινοβολίας της πηγής.

3.3 Ευαισθησία

Η ευαισθησία ενός συστήματος OCT καθορίζεται από την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ανακλαστικότητα, R, του δείγματος όταν επιτευχθεί λόγος σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio, SNR) ίσος με 1. Η τιμή της ισούται με τον SNR του συστήματος όταν το σήμα OCT οφείλεται σε ανάκλαση της ακτινοβολίας διερεύνησης από κατοπτρικό ανακλαστή με R=1 στο βραχίονα του δείγματος (Aumann et al., 2019).

Στην OCT, λόγος σήματος προς θόρυβο δίνεται από τον λόγο της τιμής της ισχύος σήματος OCT προς την τυπική απόκλιση της ισχύος σήματος υποβάθρου και αναμένεται να είναι ανάλογος της ανακλαστικότητας του δείγματος, με μια σταθερά

αναλογίας, έστω K (Agrawal et al., 2017). Η K εμπεριέχει σαν πληροφορίες την ένταση της πηγής ακτινοβολίας διερεύνησης και τις ιδιότητες θορύβου του συστήματος.

$$SNR = K \cdot R$$

Για τη μέγιστη τιμή του SNR ισχύει: $SNR_{max} = K \cdot 1$

Για την ελάχιστη ανιχνεύσιμη ανακλαστικότητα δείγματος R_{min} ισχύει: $1 = K \cdot R_{min}$

$$\text{άρα } R_{min} = \frac{1}{SNR_{max}}.$$

Τα συστήματα Fd-OCT παρουσιάζουν, κατά κανόνα, μεγαλύτερη ευαισθησία από συστήματα Td-OCT και όπως έχει παρουσιαστεί σε θεωρητικές μελέτες (Izatt & Choma, 2008, Choma et al., 2003) οι λόγοι του σήματος προς το θόρυβο στις διάφορες υλοποιήσεις της OCT, μπορεί να θεωρηθεί ότι σχετίζονται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$SNR_{SDOCT} = SNR_{SSOCT} \cong SNR_{TDOCT} \cdot \frac{M}{2}$$

για ορθογώνιο φάσμα ακτινοβολίας διερεύνησης, όπου

SNR_{SDOCT} : λόγος σήματος προς θόρυβο για Spectral OCT,

SNR_{SSOCT} : λόγος σήματος προς θόρυβο για Swept Source OCT,

SNR_{TDOCT} : λόγος σήματος προς θόρυβο για Time-domain OCT και

M : το πλήθος των pixels στη γραμμή ανιχνευτών του φασματογράφου συστήματος Spectral OCT ή ο αριθμός των μετρήσεων του φάσματος συμβολής κατά τη σάρωση του μήκους κύματος της πηγής σε ένα εύρος $\Delta\lambda$, σε συστήματα Swept Source OCT.

Για γκαουσιανό φάσμα ακτινοβολίας διερεύνησης, ο SNR της Fd-OCT υπερτερεί αυτού της Td-OCT κατά ένα παράγοντα $\frac{M}{4}$ και επομένως σε συστήματα Fd-OCT η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ανακλαστικότητα είναι κατά παράγοντα $\frac{4}{M}$ μικρότερη και η ευαισθησία μεγαλύτερη απ' ότι σε συγκρίσιμο σύστημα Td-OCT.

Στα συστήματα Fd-OCT παρατηρείται μείωση της ευαισθησίας καθώς κινούμαστε σε μεγαλύτερα βάθη απεικόνισης, ένα φαινόμενο που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως "roll-off" και σχετίζεται με την περιορισμένη φασματική διακριτική ικανότητα που παρουσιάζει μια διάταξη στην καταγραφή του φάσματος σήματος συμβολής (Aumann et al., 2019).

Για συστήματα Spectral OCT, το roll-off ευαισθησίας εξαρτάται από το εύρος του μήκους κύματος που καταγράφεται από ένα pixel της γραμμής ανιχνευτών του φασματομέτρου, ενώ για συστήματα Swept Source OCT, επηρεάζεται από το εύρος ζώνης για κάθε διαδοχική τιμή μήκους κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας διερεύνησης και πιθανώς από το εύρος μηκών κύματος της μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A-D conversion).

3.4 Ταχύτητα λήψης δεδομένων

Για την μελέτη έργων τέχνης δεν απαιτούνται ταχύτητες λήψης εικόνων τόσο υψηλές όσο σε βιοϊατρικές εφαρμογές, όπου επιδιώκεται η αποφυγή παραμορφώσεων που εισάγονται στις εικόνες, εξαιτίας της κίνησης ζωντανών οργανισμών. Ωστόσο, μια μεγάλη ταχύτητα καταγραφής δεδομένων είναι επιθυμητή όχι μόνο για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο διαδικασιών συντήρησης αλλά και για την τρισδιάστατη απεικόνιση περιοχών ενδιαφέροντος μεγάλης έκτασης, όπως αυτών πινάκων ζωγραφικής.

Ο ρυθμός καταγραφής A-scan είναι ένα από τα κριτήρια επιλογής συστημάτων OCT για εφαρμογές στο πλαίσιο της έρευνας μεθόδων διάγνωσης και συντήρησης έργων τέχνης.

Ο χρόνος λήψης ενός A-scan είναι, κατά κανόνα, μεγαλύτερος στα συστήματα Td-OCT απ' ό τι στα Fd-OCT, καθώς σε αυτά πραγματοποιείται με μηχανικά μέσα η μεταβολή της διαφοράς των οπτικών δρόμων μεταξύ των βραχιόνων δείγματος και αναφοράς.

Στην περίπτωση των συστημάτων Spectral OCT, ο ρυθμός λήψεων A-scan εξαρτάται από εκείνον της καταγραφής του φάσματος του σήματος συμβολής από το ανιχνευτικό σύστημα του φασματογράφου, που συνήθως αποτελείται από μια διάταξη συζευγμένου φορτίου μιας διάστασης (Charge Coupled Device, CCD). Ο χρόνος για την καταγραφή του φάσματος από μια CCD διάταξη μπορεί να ελαττωθεί, όμως τότε μειώνεται ο αριθμός των ανιχνευόμενων φωτονίων και κατά συνέπεια η ευαισθησία της διάταξης. Αυτό απαιτεί για την διατήρηση της ευαισθησίας, αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διερεύνησης, η οποία πρέπει πάντα να παραμένει μέσα στα όρια ασφαλείας για ευαίσθητα αντικείμενα, όπως είναι κάποια έργα τέχνης.

Για συστήματα Swept Source OCT, ο αριθμός των A-scan που λαμβάνονται στη μονάδα του χρόνου, εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο η πηγή πραγματοποιεί ένα πέρασμα από το εύρος ζώνης, μέσα στο οποίο μεταβάλλεται το εκπεμπόμενο μήκος κύματος και από το ρυθμό μετατροπής του αναλογικού σήματος του ανιχνευτή σε ψηφιακό.

Ο χρόνος καταγραφής μιας εικόνας μέτρησης εξαρτάται, επιπλέον, από το σύστημα που χρησιμοποιείται για την πλευρική μετατόπιση της δέσμης διερεύνησης ώστε να σαρωθεί η περιοχή ενδιαφέροντος και από την έκταση της περιοχής αυτής. Η πυκνότητα των πλευρικών βημάτων αλλά και ο αριθμός των A-scan μετρήσεων που λαμβάνονται για την ίδια θέση μεταβάλλει το χρόνο λήψης και επηρεάζει την ποιότητα των εικόνων.

3.5 Ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Λόγω της μοναδικότητας ορισμένων αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς, η ισχύς της ακτινοβολίας διερεύνησης οφείλει να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να μην προκαλούνται καταστροφικές αλλοιώσεις. Μια μεγάλη έντασης ακτινοβολίας, προσπίπτουσας σε σκεδαστικά υλικά μπορεί να προκαλέσει τον κορεσμό των ανιχνευτικών διατάξεων της OCT και να υποβαθμίσει την ευκρίνεια των εικόνων που

συλλέγονται. Σε γενικές γραμμές τα συστήματα OCT παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία, οπότε μια ακτινοβολία διερεύνησης χαμηλής έντασης επαρκεί για την διενέργεια των μετρήσεων.

Κεφάλαιο 4

ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

4.1 Στόχος πειραμάτων

Στόχος των πειραματικών μετρήσεων που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η απόκτηση εμπειρίας στην ερμηνεία εικόνων διατομής που συλλέγονται με τη μέθοδο της τομογραφίας οπτικής συμφωνίας και ο έλεγχος των δυνατοτήτων και των περιορισμών, συγκεκριμένης διάταξης OCT, στην απεικόνιση λεπτών στρωμάτων που αποτελούν δομικά στοιχεία πινάκων ζωγραφικής.

Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκαν στρώματα επιλεγμένων χρωμάτων όπου το συνδετικό μέσο ήταν έλαιο ή ακρυλικό, σε δοκίμια που κατασκεύασα με εμπορικά διαθέσιμα υλικά.

Τα πειράματα εκτελέστηκαν με την προοπτική εφαρμογής της μεθόδου για διαγνωστικές μετρήσεις σε τμήματα διασωζόμενων πινάκων του ζωγράφου Κωνσταντίνου Παρθένη που είχαν υποστεί φθορές λόγω πυρκαγιάς και στα οποία είχε πρόσβαση η ερευνητική ομάδα των καθηγητών μου μέσω της συνεργασίας τους με την Εθνική Πινακοθήκη.

4.2 Υλικά και μέθοδοι

4.2.1 Πειραματικά δοκίμια

Στο πλαίσιο των πειραματικών μετρήσεων κατασκεύασα 3 δοκίμια με στρώσεις ελαιοχρωμάτων σε καμβά και 2 δοκίμια με στρώσεις ακρυλικών χρωμάτων, με το ένα να έχει ως υπόστρωμα καμβά και το άλλο χαρτόνι μακέτας.

Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 1:



Εικόνα 4.1: Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 1 (ελαιοχρώματα σε καμβά)

Το δοκίμιο αυτό αποτελείται από καμβά τεντωμένο και στερεωμένο σε ξύλινο πλαίσιο, πάνω στον οποίο απλώθηκε με πινέλο μία στρώση των παρακάτω χρωμάτων:

- #1 Rose Lake (PV19- Quinacridone Violet σε παπαρουνέλαιο, BLOCKX)
- #2 Caput Mortuum Deep (252 της σειράς LUKAS STUDIO)
- #3 Rose Madder Lake (PR149- Perylene Red σε παπαρουνέλαιο, BLOCKX)
- #4 Burnt Yellow Ochre (279 της σειράς LUKAS STUDIO)

Στη βιβλιογραφία για την μέθοδο OCT (Liang et al., 2013) αναφέρεται ότι το Quinacridone Violet και το Perylene Red παρουσιάζουν έναν ικανοποιητικό βαθμό διαφάνειας στο μήκος κύματος $\lambda=1300\text{nm}$ σε περιοχή του οποίου λειτουργεί η συγκεκριμένη διάταξη OCT. Δεν είχαμε αναλυτικές πληροφορίες για τη σύνθεση των δύο άλλων χρωμάτων.

Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 2:



Εικόνα 4.2: Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 2 (ελαιοχρώματα σε καμβά)

Το δοκίμιο αυτό αποτελείται από μικρό (εμπορικά διαθέσιμο) τελάρο με καμβά που προμηθεύτηκε από κατάστημα ειδών ζωγραφικής, πάνω στον οποίο απλώθηκαν με πινέλο σε μία στρώση τα παρακάτω χρώματα ζωγραφικής:

- #1 Transparent Gold Ochre (PY42/PY43 σε λινέλαιο, WINSOR & NEWTON)
- #2 Transparent Brown Oxide (PR101 σε λινέλαιο και έλαιο safflower, WINSOR & NEWTON)

Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 3:



Εικόνα 4.3: Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 3 (ελαιοχρώματα σε καμβά)

Το δοκίμιο αυτό αποτελείται από μικρό τελάρο με καμβά, όπως και το δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 2, πάνω στον οποίο απλώθηκε με πινέλο μία στρώση των παρακάτω χρωμάτων:

#1 Viridian (PG18 σε λινέλαιο, WINSOR & NEWTON)

#2 Ultramarine (PB29 σε έλαιο, ROYAL TALENS)

Από βιβλιογραφία (Liang et al., 2013) γνωρίζουμε ότι το viridian και το ultramarine παρουσιάζουν ικανοποιητική διαπερατότητα για μήκος κύματος $\lambda=1300\text{nm}$ σε περιοχή του οποίου λειτουργεί η συγκεκριμένη διάταξη OCT.

Δοκίμιο ακρυλικών χρωμάτων 1:



Εικόνα 4.4: Δοκίμιο ακρυλικών χρωμάτων (ακρυλικά σε χαρτόνι μακέτας)

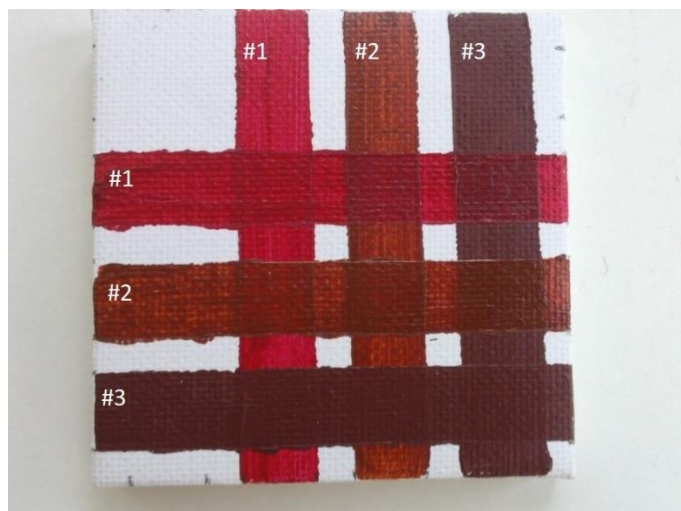
Ως υπόστρωμα σε αυτό το δοκίμιο επιλέχθηκε το χαρτόνι μακέτας, για την παρατήρηση χρωματικών στρωμάτων σε επιφάνεια πιο λεία από αυτή ενός καμβά. Πάνω στο χαρτί μακέτας απλώθηκαν με πινέλο αρχικά σε κάθετες, και έπειτα σε οριζόντιες λωρίδες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4, μονές στρώσεις των ακρυλικών χρωμάτων:

#1 perm. rose (PV19, WINSOR & NEWTON)

#2 burnt sienna (PR101, WINSOR & NEWTON)

#3 violet iron oxide (PR101, WINSOR & NEWTON)

Δοκίμιο ακρυλικών χρωμάτων 2:



Εικόνα 4.5: Δοκίμιο ακρυλικών χρωμάτων (ακρυλικά σε καμβά)

Τα ακρυλικά χρώματα είναι ίδια με αυτά του δοκιμίου ακρυλικών χρωμάτων 1, εδώ όμως το υπόστρωμα είναι καμβάς. Πάνω στον καμβά μικρού τελάρου, πρώτα απλώθηκαν με πινέλο τα χρώματα σε κάθετες λωρίδες και αφού αυτές στέγνωσαν τα ίδια χρώματα εφαρμόστηκαν και σε οριζόντιες λωρίδες, όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 4.5. Στις περιοχές που υπάρχουν δύο στρώσεις, η κατώτερη αντιστοιχεί στην κάθετη λωρίδα και η ανώτερη στην οριζόντια. Τα χρώματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι και πάλι τα:

#1 perm. rose (PV19, WINSOR & NEWTON)

#2 burnt sienna (PR101, WINSOR & NEWTON)

#3 violet iron oxide (PR101, WINSOR & NEWTON)

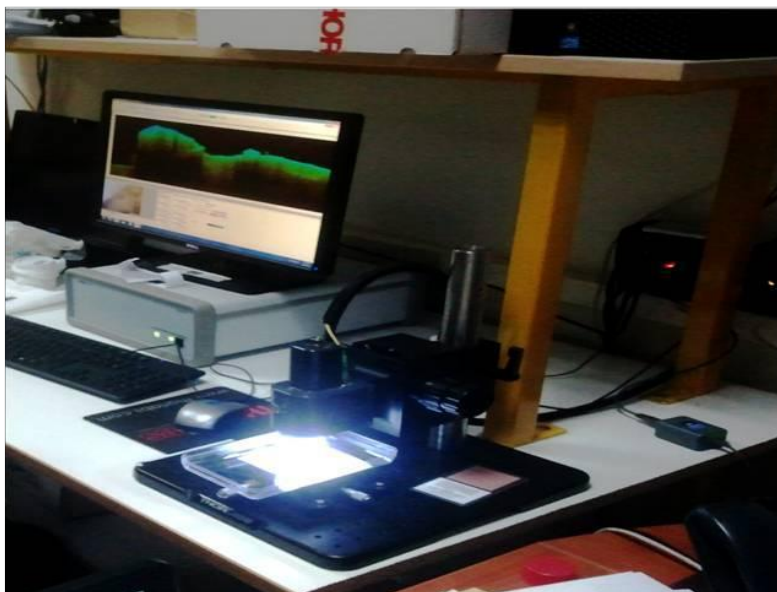
Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας στεγνώματος των ελαιοχρωμάτων χρειάζεται ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Αν και κατά την διενέργεια των μετρήσεων παρουσίαζαν σταθερότητα, γνωρίζω ότι δεν είχαν στερεοποιηθεί σε όλο τους τον όγκο. Αυτό με απέτρεψε από το να εφαρμόσω και ένα δεύτερο επίπεδο χρωμάτων πάνω στις αρχικές στρώσεις.

Σε αντίθεση, τα ακρυλικά χρώματα στέγνωσαν άμεσα πάνω στο υπόστρωμα και ήμουν σε θέση να περάσω και τις επόμενες στρώσεις μετά από μικρό χρονικό διάστημα.

4.2.2 Σύστημα OCT

Η συσκευή Spectral OCT που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις ήταν μια εμπορικά διαθέσιμη διάταξη TELESTO SD-OCT της εταιρίας Thorlabs (Εικόνα 4.6). Η συσκευή έχει ως πηγή ακτινοβολίας διερεύνησης έναν συνδυασμό διόδων υπερφωταύγειας (Superluminescent diodes, SLDs) με κεντρικό μήκος κύματος $\lambda \cong 1300\text{nm}$ και εύρος ζώνης $\Delta\lambda > 170\text{nm}$, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή (<https://thorlabs.com>), ενώ παρουσιάζει αξονική διακριτική ικανότητα

καλύτερη των $7,5\mu\text{m}$ (Drakaki et al., 2017). Η συσκευή βρισκόταν στο εργαστήριο μετρολογίας του τότε ΤΕΙ Αθηνών.



Εικόνα 4.6: Φωτογραφία της διάταξης Τομογραφίας Οπτικής Συμφωνίας TELESTO SD-OCT της Thorlabs που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις αυτού του κεφαλαίου (οι μετρήσεις στην διάταξη αυτή έγιναν σε εργαστήριο του τότε ΤΕΙ Αθηνών, υπό την επίβλεψη του Επίκ. Καθ. κ. Ηλία Ζώη).

4.3 Προκαταρκτικές Πειραματικές Μετρήσεις

Βασικές ρυθμίσεις της διάταξης κατά τη διενέργεια των μετρήσεων:

Μετά την τοποθέτηση κάθε νέου δοκιμίου στη βάση δείγματος, με τη συσκευή σε λειτουργία, έγινε έλεγχος και διόρθωση της εστίασης της δέσμης διερεύνησης καθώς και ρύθμιση της θέσης στην οποία θα παρέμενε σταθερό το κάτοπτρο αναφοράς κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, έτσι ώστε οι αποστάσεις κατόπτρου και του δείγματος από το διαχωριστή δέσμης να είναι παρόμοιες και η διατομή του δείγματος να εμφανίζεται στην οθόνη.

Για κάθε νέα περιοχή μέτρησης πάνω σε ένα δοκίμιο, επιλέχθηκε τιμή της έντασης της ακτινοβολίας που επιστρέφει από το βραχίονα αναφοράς τέτοια ώστε να επαρκεί για το σήμα συμβολής χωρίς να προκαλεί κορεσμό του ανιχνευτή.

Από το παράθυρο διαλόγου του λογισμικού που συνοδεύει τη διάταξη, για κάθε καταγραφή μέτρησης, ρυθμιζόταν το δυναμικό εύρος ώστε να αποδίδονται όσο το δυνατόν καλύτερα οι διακυμάνσεις στην ένταση οπισθοσκέδασης από τις περιοχές του μελετώμενου αντικειμένου.

Κάθε b-scan αποθηκεύτηκε ως αρχείο bitmap 3000×512 pixels ενώ για την πληρέστερη ερμηνεία των μετρήσεων καταγράφηκαν χρήσιμες παράμετροι λειτουργίας καθώς και το φυσικό πλάτος και οπτικό βάθος της μετρούμενης περιοχής στα οποία αντιστοιχούν οι διαστάσεις της εικόνας.

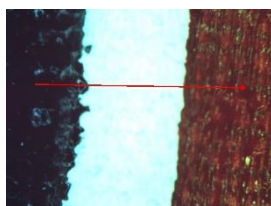
Πειραματικές μετρήσεις:

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, πραγματοποιήσα έναν μεγάλο αριθμό μετρήσεων τόσο στα δοκίμια ελαιοχρωμάτων όσο και σε αυτά των ακρυλικών. Στην μελέτη των δοκιμίων με ελαιοχρώματα φρόντισα να καταγράψω b-scans που απεικονίζουν συνδυαστικά, στρώματα όσο το δυνατόν περισσότερων διαφορετικών χρωμάτων ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των οπτικών τους ιδιοτήτων. Στην περίπτωση των δοκιμίων ακρυλικών χρωμάτων, συνέλεξα εικόνες διατομής για σχεδόν όλους τους συνδυασμούς δύο στρώσεων των τριών διαφορετικών χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή τους.

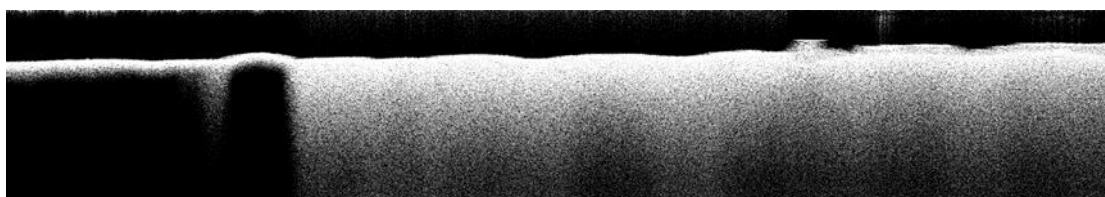
Εδώ επέλεξα να παραθέσω, επιλεκτικά, μερικές μόνο από τις μετρήσεις που εκτελέστηκαν και παρουσίασαν εικόνες χαρακτηριστικές των δομών που ανιχνεύτηκαν στο σύνολο των καταγεγραμμένων εικόνων b-scan.

Όλα τα b-scans που ακολουθούν, πλην ενός που απεικονίζεται με ψευδοχρώματα αποδίδονται στην κλίμακα του γκρι, όπου το λευκό αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή οπισθοσκέδασης, το μαύρο αντιπροσωπεύει περιοχές από τις οποίες δεν επιστρέφει ακτινοβολία με τις ενδιάμεσες τιμές φωτεινότητας των pixels να αποδίδουν τις υπόλοιπες εντάσεις οπισθοσκέδασης.

Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 1- χρώματα #2 και #1:



Εικόνα 4.7: Φωτογραφία από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 1, με τα χρώματα #2 στα αριστερά και #1 στα δεξιά. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην θέση από την οποία συλλέχθηκε το b-scan της Εικόνας 4.8.



Εικόνα 4.8: Το b-scan από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 1 που υποδεικνύεται στην εικόνα 4.7, όπου αριστερά διακρίνεται το χρώμα #2 και δεξιά το χρώμα #1. Το ύψος της εικόνας αντιστοιχεί σε 2,610mm και το πλάτος σε 9,98mm.

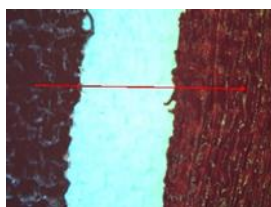
Η Εικόνα 4.8 είναι η εικόνα διατομής OCT που συλλέχθηκε από θέση του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 1 που υποδεικνύεται στην φωτογραφία της Εικόνας 4.7 με μια κόκκινη γραμμή. Η θέση του b-scan επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να απεικονίζονται ταυτόχρονα τόσο το στρώμα χρώματος #2 (αριστερά) όσο και αυτό του χρώματος #1 (δεξιά) πάνω στον καμβά.

Στα δεξιά της εικόνας φαίνεται το στρώμα του χρώματος #1 με έντονες διακυμάνσεις πάχους λόγω του τρόπου εφαρμογής του με την χρήση πινέλου, ενώ στα αριστερά το χρώμα #2 δίνει μια τελείως διαφορετική εικόνα. Διακρίνεται η διαχωριστική επιφάνεια

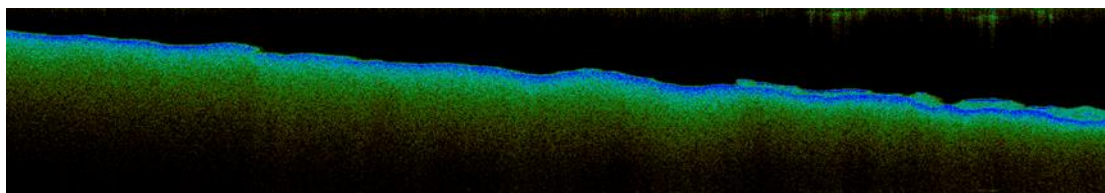
αέρα- χρώματος #2 αλλά κάτω από αυτή, η περιοχή της εικόνας παραμένει μαύρη που σημαίνει ότι δεν υπάρχει επιστροφή ακτινοβολίας από αυτήν. Στα αριστερά επομένως έχουμε μια χαρακτηριστική εικόνα απορρόφησης της ακτινοβολίας διερεύνησης από το χρώμα #2.

Με την πρόσπτωσή της στην επιφάνεια του καμβά, η ακτινοβολία υπόκειται σε πολλαπλές σκεδάσεις και έτσι η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία που τελικά ανιχνεύεται αποδίδεται σε κέντρα σκέδασης που βρίσκονται φαινομενικά σε μεγαλύτερο βάθος απ' ό τι στην πραγματικότητα. Σε αυτό οφείλεται η εμφάνιση 'ουρών' που δίνουν μια ψευδή αίσθηση για το πάχος του.

Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 1- χρώματα #4 και #3



Εικόνα 4.9: Φωτογραφία από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 1, με τα χρώματα #4 στα αριστερά και #3 στα δεξιά. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην θέση από την οποία συλλέχθηκε το b-scan της Εικόνας 4.10, έτσι ώστε να απεικονίζεται τόσο το στρώμα χρώματος #4, όσο και αυτό του #3.

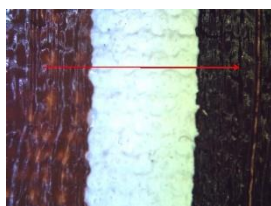


Εικόνα 4.10: Το b-scan από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 1 η οποία υποδεικνύεται στην εικόνα 4.9, όπου αριστερά διακρίνεται το χρώμα #4, ενώ δεξιά το χρώμα #3. Το ύψος της εικόνας αντιστοιχεί σε 2,610mm και το πλάτος σε 9,98mm.

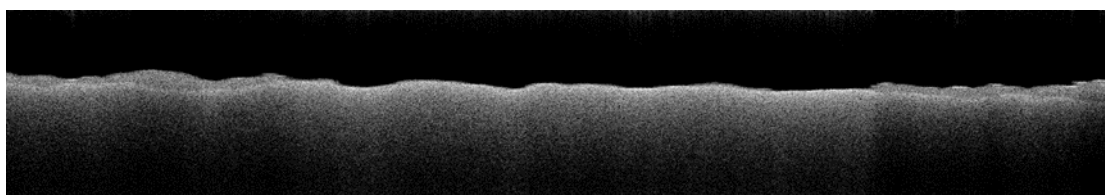
Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, στην περιοχή πάνω από το χρώμα #4, εμφανίζονταν στα b-scans ψευδείς εικόνες, οι οποίες εξασθένησαν όταν έθεσα το δοκίμιο υπό κλίση ως προς τη βάση στήριξης δείγματος. Τις ψευδείς εικόνες απέδωσα σε έντονη κατοπτρική ανάκλαση της ακτινοβολίας διερεύνησης από την επιφάνεια του χρώματος #4 και στον επακόλουθο κορεσμό των ανιχνευτικών διατάξεων. Η κλίση δεν ορίστηκε αυστηρά, με αποτέλεσμα να μην μπορώ να δώσω μια συγκεκριμένη για αυτήν τιμή.

Στην Εικόνα 4.10, υπάρχει ένδειξη διαφοροποίησης της επιφάνειας του δοκιμίου στην περιοχή του ορίου στρώματος χρώματος #4, όμως λόγω της έντονης σκέδασης στην οποία υπόκειται η ακτινοβολία διερεύνησης, εκτός από την επιφάνειά του δεν διακρίνεται κάποιο άλλο στοιχείο της δομής του στρώματος. Αντίθετα είναι εφικτή η διάκριση του πάχους του χρωματικού στρώματος #3 όπως αυτό παρουσιάζεται στα δεξιά της εικόνας.

Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 2- χρώματα #1 και #2



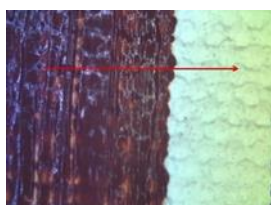
Εικόνα 4.11: Φωτογραφία από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 2, με τα χρώματα #1 στα αριστερά και #2 στα δεξιά. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στη θέση από την οποία συλλέχθηκε το b-scan της Εικόνας 4.12, έτσι ώστε να απεικονίζεται τόσο το στρώμα χρώματος #1, όσο και αυτό του #1.



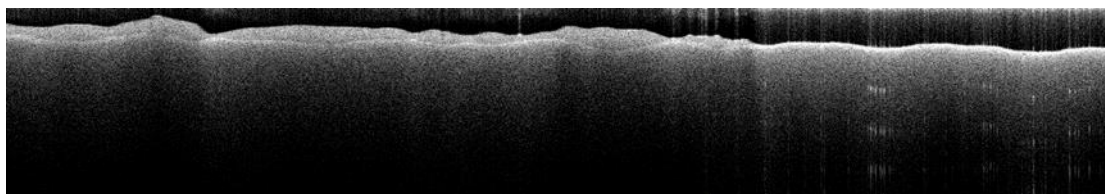
Εικόνα 4.12: Το b-scan από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 2 η οποία υποδεικνύεται στην εικόνα 4.11, όπου αριστερά διακρίνεται το στρώμα χρώματος #1, ενώ δεξιά το χρώμα #2. Το ύψος της εικόνας αντιστοιχεί σε 2,610 mm και το πλάτος σε 9,30 mm.

Στην Εικόνα 4.12 διακρίνεται το οπτικό πάχος τόσο του χρώματος #1 όσο και αυτό του #2. Το στρώμα χρώματος #2 παρουσιάζει μεγαλύτερη σχετική απορρόφηση της ακτινοβολίας από αυτό του χρώματος #1, αφού λιγότερο ποσοστό της δέσμης διερεύνησης διαπερνά το χρωματικό στρώμα για να υποστεί πολλαπλή σκέδαση στον υποκείμενο καμβά.

Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 2- χρώμα #1:



Εικόνα 4.13: Φωτογραφία από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 2, με το χρώμα #1 στα αριστερά και γυμνό καμβά στα δεξιά. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει τη θέση από την οποία συλλέχθηκε το b-scan της Εικόνας 4.14.

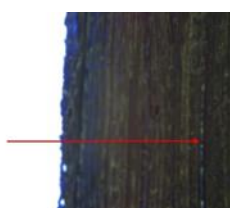


Εικόνα 4.14: Το b-scan από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 2 την οποία υποδεικνύει η κόκκινη γραμμή στην εικόνα 4.13. Αριστερά διακρίνεται το στρώμα χρώματος #1, ενώ δεξιά απλώς η επιφάνεια του καμβά. Το ύψος του αντιστοιχεί σε 2,610 mm και το πλάτος σε 9,30 mm.

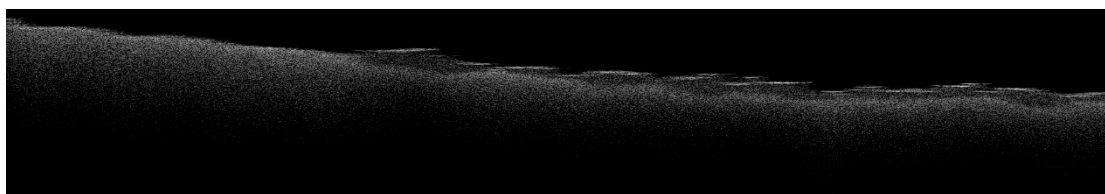
Στο b-scan της Εικόνας 4.14 του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 2, αποδίδεται η εσωτερική δομή του στρώματος χρώματος #1 και παρατηρείται συσχετισμός ανάμεσα στο πάχος του χρωματικού στρώματος και τις καμπυλώσεις της επιφάνειας του υποκείμενου καμβά, κάτι το οποίο μπορεί εν μέρει να αποδοθεί στην ιδιαιτερότητα της μεθόδου να απεικονίζει οπτικές αποστάσεις κατά τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας διερεύνησης.

Στο δεξί μέρος του b-scan εμφανίζονται ψευδείς εικόνες πάνω από την περιοχή του γυμνού καμβά, όμοιες με αυτές που προκαλούνται λόγω έντονων κατοπτρικών ανακλάσεων από την επιφάνεια του δείγματος.

Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 3 – χρώμα #2



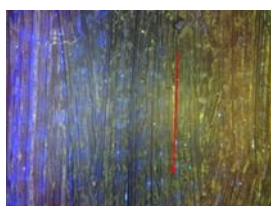
Εικόνα 4.15: Φωτογραφία από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 3, με το χρώμα #2 στα δεξιά και γυμνό καμβά στα αριστερά. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει τη θέση από την οποία συλλέχθηκε το b-scan της Εικόνας 4.16.



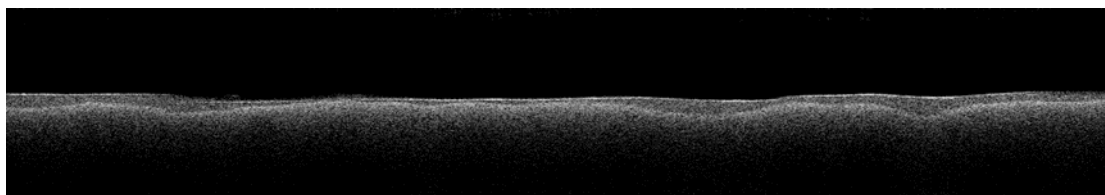
Εικόνα 4.16: Το b-scan από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 3, την οποία υποδεικνύει η κόκκινη γραμμή στην εικόνα 4.15. Δεξιά, διακρίνεται το στρώμα χρώματος #2, ενώ αριστερά, η επιφάνεια του καμβά. Η κλίση της επιφάνειας του καμβά δεν είναι αποτέλεσμα πλάγιας τοποθέτησης του δείγματος. Το ύψος του b-scan αντιστοιχεί σε 2,610 mm και το πλάτος του σε 9,12 mm.

Η πλευρική διακριτική ικανότητα και το βήμα μετατόπισης της δέσμης διερεύνησης μεταξύ διαδοχικών θέσεων συλλογής A-scan, περιορίζουν την ευκρίνεια με την οποία η συσκευή απεικονίζει απότομες διακυμάνσεις της επιφάνειας του δείγματος. Το χρωματικό στρώμα #2 απλώθηκε στο υπόστρωμα με πινέλο, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται έντονες αυλακώσεις που διακρίνονται στην διατομή της εικόνας 4.16, της οποίας το επίπεδο είναι κάθετο της κατεύθυνσης κίνησης του πινέλου.

Δοκίμιο ελαιοχρωμάτων 3 – χρώμα #2



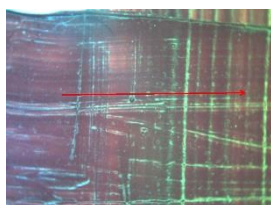
Εικόνα 4.17: Φωτογραφία από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 3, καλυμμένη με το χρώμα #2. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει τη θέση από την οποία συλλέχθηκε το b-scan της Εικόνας 4.18 και ακολουθεί τη μέση διεύθυνση των αυλακώσεων που σχημάτισε το πινέλο κατά την εφαρμογή του χρώματος #2.



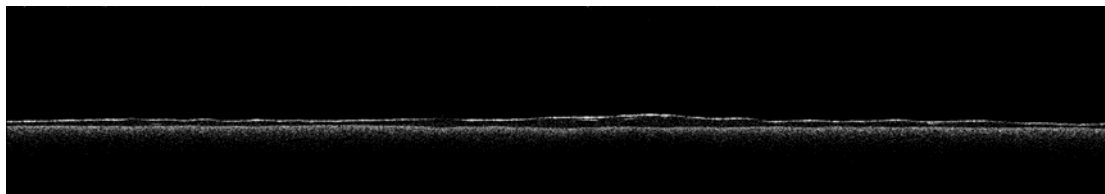
Εικόνα 4.18: Το b-scan από περιοχή του δοκιμίου ελαιοχρωμάτων 3, την οποία υποδεικνύει η κόκκινη γραμμή στην εικόνα 4.17. Το ύψος του b-scan αντιστοιχεί σε 2,610 mm και το πλάτος σε 5,78 mm.

Το επίπεδο της διατομής της Εικόνας 4.18 είναι παράλληλο στη μέση διεύθυνση των αυλακώσεων που σχηματίστηκαν κατά την εφαρμογή του χρωματικού στρώματος στο υπόστρωμα, με πινέλο. Στη συγκεκριμένη μέτρηση, επιλέχθηκε μικρότερο βήμα μετατόπισης της δέσμης διερεύνησης μεταξύ δύο διαδοχικών A-scans, από αυτό κατά τη διάρκεια των μετρήσεων της εικόνας 4.16. Οι δύο παραπάνω συνθήκες είχαν ως αποτέλεσμα την απόδοση των διεπιφανειών του δείγματος με καλύτερη ευκρίνεια απ' ότι στην 4.16. Η απόδοση των επιμέρους διεπιφανειών (αέρα-χρώματος, χρώματος-υποβάθρου) με μια ευκρινή συνεχή καμπύλη είναι επιθυμητή γιατί διευκολύνει την χρήση αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας για τον υπολογισμό του πάχους του στρώματος.

Δοκίμιο ακρυλικών 1– δύο στρώσεις χρώματος #1



Εικόνα 4.19: Φωτογραφία από περιοχή του δοκιμίου ακρυλικών 1, με δύο στρώσεις του χρώματος #1. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην θέση από την οποία συλλέχθηκε το b-scan της Εικόνας 4.20.

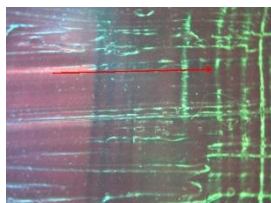


Εικόνα 4.20: Το b-scan από περιοχή του δοκιμίου ακρυλικών 1 στην οποία έχουν εφαρμοστεί δύο στρώσεις χρώματος #1, και η θέση του οποίου υποδεικνύεται στην εικόνα 4.19 με μια κόκκινη γραμμή. Το ύψος του αντιστοιχεί σε 2,610 mm και το πλάτος σε 8,68 mm.

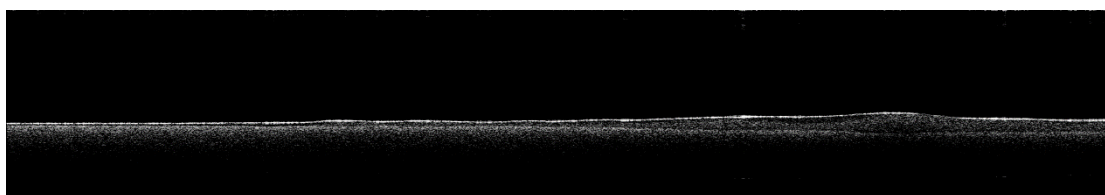
Στο b-scan της Εικόνας 4.20, δεν διακρίνονται οι 2 στρώσεων του ίδιου χρώματος #1. Η αδυναμία αυτή διαχωρισμού μεταξύ των στρώσεων ήταν αναμενόμενη, όχι μόνο λόγω της περιορισμένης διακριτικής ικανότητας του οργάνου, αλλά κυρίως λόγω του

κοινού δείκτη διάθλασης τους και της μικρής χρονικής διαφοράς με την οποία εφαρμόστηκαν στο δοκίμιο.

Δοκίμιο ακρυλικών χρωμάτων 1- στρώση χρώματος #1 πάνω σε στρώση χρώματος #2



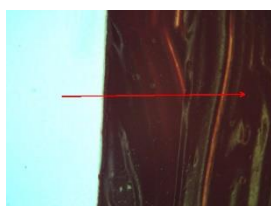
Εικόνα 4.21: Φωτογραφία περιοχής του δοκιμίου ακρυλικών χρωμάτων 1, με την κόκκινη γραμμή να υποδεικνύει την θέση από την οποία συλλέχθηκε το b-scan της Εικόνας 4.22. Στα αριστερά το χαρτόνι μακέτας είναι καλυμμένο με μονή στρώση του χρώματος #1, ενώ στα δεξιά η στρώση του χρώματος #1 βρίσκεται πάνω σε μια άλλη του χρώματος #2.



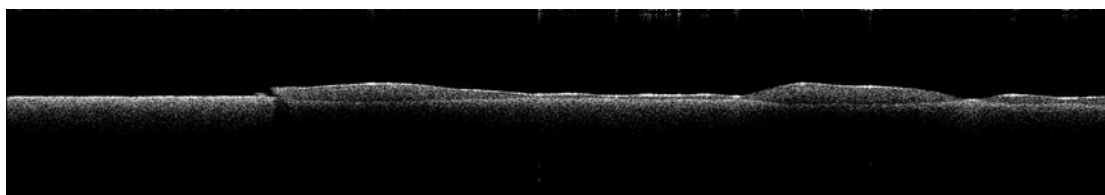
Εικόνα 4.22: B-scan από θέση του δοκιμίου ακρυλικών χρωμάτων 1 όπως αυτή υποδεικνύεται στην 4.21. Στο αριστερό μέρος μόλις διακρίνεται το στρώμα του χρώματος #1, ενώ στα αριστερά, απεικονίζεται χρωματικό στρώμα που αποτελείται από στρώση χρώματος #1 πάνω σε άλλη χρώματος #2. Το ύψος του b-scan αντιστοιχεί σε 2,610mm ενώ το πλάτος του σε 7,52mm.

Σε μια πολύ μικρή περιοχή της Εικόνας 4.22 είναι δυνατό να παρατηρηθεί διαφοροποίηση μεταξύ των στρώσεων δύο διαφορετικών χρωμάτων (χρώματος #1 και #2), καθώς διακρίνονται ως περιοχές με διαφορετική πυκνότητα κέντρων σκέδασης.

Δοκίμιο ακρυλικών χρωμάτων 1- χρώμα #2



Εικόνα 4.23: Φωτογραφία από περιοχή του δοκιμίου ακρυλικών χρωμάτων 1, με το χρώμα #2 στα δεξιά και γυμνό χαρτόνι μακέτας στα αριστερά. Η κόκκινη γραμμή δείχνει τη θέση από την οποία συλλέχθηκε το b-scan της Εικόνας 4.24.

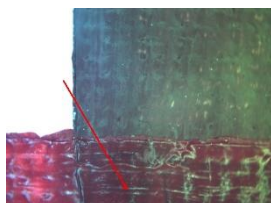


Εικόνα 4.24: Το b-scan από περιοχή του δοκιμίου ακρυλικών χρωμάτων 1, την οποία υποδεικνύει η κόκκινη γραμμή στην εικόνα 4.13. Δεξιά διακρίνεται το στρώμα χρώματος #2,

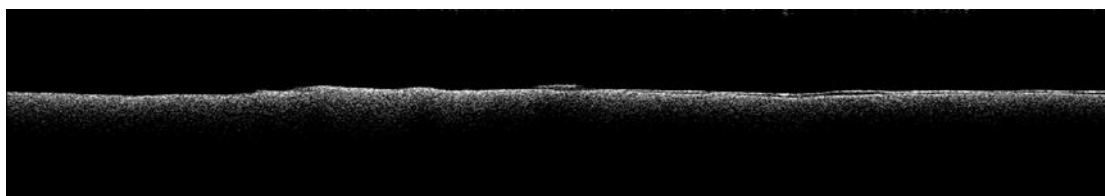
και αριστερά η επιφάνεια του υποστρώματος. Το ύψος της εικόνας αντιστοιχεί σε 2,610 mm και το πλάτος σε 8,68 mm.

Στην Εικόνα 4.24, η επιφάνεια του υποστρώματος κάτω από το χρωματικό στρώμα, απεικονίζεται σε επίπεδο κατώτερου αυτού της γυμνής επιφανείας του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η OCT καταγράφει οπτικές αποστάσεις κατά τη διεύθυνση της δέσμης διερεύνησης και έτσι το οπτικό πάχος του χρώματος παρουσιάζεται μεγαλύτερο του αντίστοιχου φυσικού. Η φαινομενική παραμόρφωση της υποκείμενης του χρωματικού στρώματος επιφάνειας διακρίνεται πιο καθαρά στην περίπτωση ενός λείου υποστρώματος (όπως το χαρτόνι μακέτας) απ' ό τι στην περίπτωση της Εικόνας 4.14.

Δοκίμιο ακρυλικών χρωμάτων 2- χρώμα #3 και στρώση χρώματος #1 πάνω στο χρώμα #3



Εικόνα 4.25: Φωτογραφία περιοχής του δοκιμίου ακρυλικών χρωμάτων 2. Πάνω δεξιά διακρίνεται το χρώμα #3 το οποίο στην κάτω δεξιά πλευρά καλύπτεται από στρώμα χρώματος #1. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει τη θέση του b-scan της Εικόνας 4.26



Εικόνα 4.26: B-scan από θέση του δοκιμίου ακρυλικών χρωμάτων 2, όπως αυτή υποδεικνύεται στην 4.25. Από τα αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζεται η περιοχή του γυμνού καμβά, το αδιαφανές χρώμα #3 και στρώμα χρώματος #1 πάνω από το #3.

Στην Εικόνα 4.26 το αδιαφανές στην ακτινοβολία διερεύνησης στρώμα του χρώματος #3, στο κέντρο, αποδίδεται ως μια περιοχή της οποίας η επιφάνεια είναι σε επίπεδο ανώτερο του υποστρώματος στα αριστερά, ενώ στα δεξιά, διακρίνεται ποιοτικά η λεπτή στρώση του ημιδιαφανούς χρώματος #1.

4.4 Συμπεράσματα

Η απεικόνιση της κατανομής των στρώσεων χρώματος είναι δυνατή με την τεχνική της τομογραφίας οπτικής συμφωνίας, στο βαθμό που η ακτινοβολία διερεύνησης είναι ικανή να διέλθει διαμέσου τους χωρίς να υφίσταται έντονη σκέδαση ή απορρόφηση.

Αυτό που καταγράφει η τεχνική OCT είναι ο οπτικός δρόμος που διένυσε η δέσμη διερεύνησης μέχρι να οπισθοσκεδαστεί από στοιχείο στο εσωτερικό της δομής που

μελετάται καθώς και η ανακλαστικότητα του στοιχείου αυτού. Ένα αρχικό b-scan, δεν αποτελεί απεικόνιση μιας φυσικής διατομής αλλά μια αναπαράστασή της, η οποία έχει επηρεαστεί από την αλλαγή στην ταχύτητα και τη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης διερεύνησης που λαμβάνει χώρα κατά το φαινόμενο της διάθλασης. Οι εικόνες b-scan που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο αυτό, χρειάζονται περεταίρω επεξεργασία για να αποτελέσουν ακριβή απόδοση της εσωτερικής δομής των χρωματικών στρωμάτων.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, οι έντονες ανακλάσεις από την επιφάνεια των χρωματικών στρωμάτων δημιούργησαν ψευδείς εικόνες που αλλοίωσαν την ποιότητα αρκετών μετρήσεων. Ως λύση υιοθέτησα την τοποθέτηση των δοκιμίων με τέτοιο τρόπο ώστε η δέσμη διερεύνησης να προσπίπτει στην επιφάνεια τους υπό μια μικρή κλίση. Το γεγονός όμως ότι αυτή η κλίση δεν ορίστηκε με αυστηρό τρόπο κατέστησε την πιθανή περεταίρω επεξεργασία των συγκεκριμένων εικόνων b-scan ιδιαίτερα περίπλοκη.

Η απεικόνιση πολύ λεπτών χρωματικών στρωμάτων με πάχος κοντά στη διακριτική ικανότητα του οργάνου αλλά και η διάκριση μεταξύ διαφορετικών στρώσεων χρωμάτων ίδιας σύνθεσης μπορεί να μην ήταν εφικτή, ωστόσο, κατέστη δυνατός ο διαχωρισμός δύο στρώσεων διαφορετικών ημιδιαφανών χρωμάτων σε περιοχές με υπολογίσιμο πάχος.

Μέσα από την ερμηνεία των μετρήσεων, μπορεί να υπάρξει σύγκριση των οπτικών ιδιοτήτων στοιχείων που απεικονίζονται στο ίδιο b-scan. Πιο συγκεκριμένα, ήταν δυνατό να αποδοθεί ο σχετικός βαθμός απορρόφησης της ακτινοβολίας διερεύνησης από δύο διαφορετικά χρωματικά στρώματα.

Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η δυνατότητα καταγραφής από τη διάταξη του έντονου ανάγλυφου μιας επιφάνειας εξαρτάται από την πλευρική διακριτική ικανότητα και την πυκνότητα των αξονικών μετρήσεων που συνδυάζονται για να αποδώσουν μια εικόνα διατομής.

Κεφάλαιο 5

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ OCT ΣΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕ ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΣΥΝΔΥΑΣΤΗΚΕ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

5.1 Εφαρμογές της OCT σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς

5.1.1 Εφαρμογές της OCT σε πίνακες ζωγραφικής

5.1.1.1 Εισαγωγικά

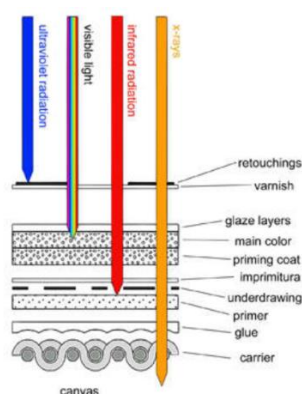
Οι ζωγραφικοί πίνακες από το υπόβαθρο μέχρι την εξώτερη επιφάνειά τους αποτελούνται από διαδοχικά στρώματα διαφορετικής σύστασης και δομικών χαρακτηριστικών, σύμφωνα με τα υλικά και την διαδικασία δημιουργίας που επέλεξε ο ζωγράφος. Παρουσιάζουν μια ιδιαίτερα πλούσια διαστρωμάτωση χαρακτηριστική του καθενός, ωστόσο παρά την μοναδικότητάς τους, κανείς μπορεί να αναγνωρίσει κάποια κοινά βασικά δομικά στοιχεία.

Η διαστρωμάτωση ενός τυπικού πίνακα ζωγραφικής περιλαμβάνει τον φορέα ή υπόστρωμα, την κόλλα, το στρώμα προετοιμασίας, επιλεκτικά την *imprimitura* και προσχέδια και ένα συνδυασμό από στρώματα χρωμάτων και πιθανώς λαζούρας, καλυμμένα όλα από μια τελική επίστρωση βερνικιού.

Ο φορέας ή υπόβαθρο (*support*) είναι η βάση στην οποία κείτονται όλα τα στρώματα του πίνακα. Προετοιμάζεται με την εφαρμογή πάνω του στρώσης κόλλας (*size*) και στρώματος προετοιμασίας (*ground*) που περιέχει συνήθως γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ή κιμωλία (CaCO_3). Τα δύο αυτά στρώματα γεμίζουν τις επιφανειακές ανομοιογένειες του φορέα δημιουργώντας όταν στεγνώνουν ένα λείο ζωγραφικό υπόστρωμα που προστατεύει το υλικό του φορέα από απορρόφηση των υγρών μιγμάτων του χρώματος. Κάποιες φορές πάνω στο στρώμα προετοιμασίας απλώνεται λεπτή στρώση χρώματος, η επονομαζόμενη *imprimitura*. Σε αυτήν τη φάση, ο ζωγράφος σχηματίζει αν επιθυμεί τα προπαρασκευαστικά σκίτσα ή προσχέδια (*underdrawings*) που θα καθοδηγήσουν την δημιουργική του εργασία. Το χρώμα βρίσκεται αρχικά σε υγρή μορφή και αποτελείται από τα πιγμέντα (ελληνοποιημένη έκφραση από την αγγλική *pigments* που σημαίνει χρωστικές), χρωστικές ύλες σε μορφή λεπτών κόκκων, διεσπαρμένα σε υγρό συνδετικό μέσο (*binders*) μετά την στερεοποίηση του οποίου σχηματίζεται το συμπαγές χρωματικό στρώμα που προσκολλάται στην ζωγραφική επιφάνεια του πίνακα. Ορισμένες φορές οι δημιουργοί επιλέγουν να χρησιμοποιήσουν ημιδιάφανο μίγμα με πολύ μικρή ποσότητα πιγμέντου στο μέσο, την λαζούρα (*glaze*), η οποία μεταβάλλει την εικόνα του υποκείμενου χρώματος. Μετά την ολοκλήρωση της ζωγραφικής απεικόνισης με οπτικά αδιαφανή ή ημιδιαφανή χρωματικά στρώματα, ο πίνακας καλύπτεται με βερνίκι (*varnish*). Το βερνίκι δημιουργεί ένα στρώμα που προστατεύει τα χρώματα από ρύπους και επιδράσεις του περιβάλλοντος, παρέχει μια επιφάνεια πάνω στην οποία μπορούν να πραγματοποιούνται όλες οι επεμβατικές διεργασίες συντήρησης χωρίς να επηρεάζονται τα αυθεντικά στρώματα και χαρίζει ένα καλύτερο χρωματικό τελικό αποτέλεσμα. Η ακανόνιστη γυμνή επιφάνεια ενός ζωγραφικού

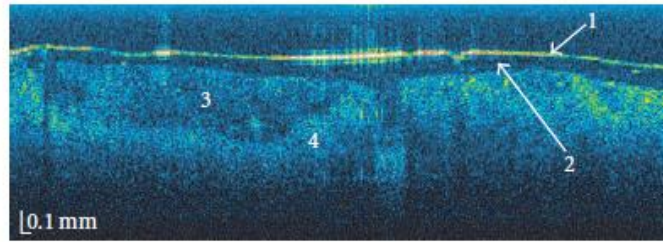
πίνακα διαχέει έντονα το φως, οπότε μαζί με το φως συγκεκριμένου εύρους μήκους κύματος που σκεδάζει η χρωστική, στον παρατηρητή φτάνει το διάχυτα ανακλώμενο λευκό φως. Το φαινόμενο αυτό περιορίζεται με την κάλυψη με στρώση βερνικιού και επομένως το παρατηρούμενο χρώμα έχει μεγαλύτερη καθαρότητα.

Ακτινοβολία σε περιοχές του υπέρυθρου φάσματος είναι σε θέση να διεισδύσει μέχρι το στρώμα του ground και να απεικονίσει τα προσχέδια των ζωγράφων, ωστόσο τα μήκη κύματος διερεύνησης της πλειονότητας των συστημάτων OCT καλύπτουν περιοχές του φάσματος που δεν παρουσιάζουν ικανοποιητική διαπερατότητα σε όλη την γκάμα των χρωματικών στρωμάτων που συναντώνται σε ιστορικούς πίνακες ζωγραφικής.



Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση των δυνατοτήτων διείσδυσης ακτινοβολίας διαφορετικών φασματικών περιοχών στα επιμέρους επίπεδα διαστρωμάτωσης ενός τυπικού πίνακα ζωγραφικής [http://www.fch.akbild.ac.at/ Institute of Science and Technology in Art, Academy of Fine Arts, Vienna]

Η OCT έχει επιστρατευτεί για την απεικόνιση επιφανειακών χαρακτηριστικών πινάκων και της εσωτερικής δομής στρωμάτων βερνικιών, λαζούρας και επιλεκτικά χρωμάτων που παρουσιάζουν διαφάνεια στην ακτινοβολία διερεύνησης του συστήματος OCT που χρησιμοποιείται καθώς και για την ανίχνευση προσχεδίων. Η τεχνική μπορεί να μην είναι σε θέση να αποδώσει όλα τα επιμέρους στοιχεία ενός ζωγραφικού πίνακα, και το βάθος απεικόνισης της να περιορίζεται συνήθως στα εξώτερα ημιδιάφανα στρώματά του, ωστόσο η διάγνωση της κατάστασης αυτών των στρωμάτων με την διακριτική ικανότητα που παρέχει η τεχνική είναι απαραίτητη στην διαδικασία συντήρησης αυτού του τύπου έργων τέχνης. Τα στρώματα βερνικιών δέχονται τις εντονότερες αλλοιώσεις λόγω της άμεσης επαφής τους με το περιβάλλον, οι διάφορες επιζωγραφίσεις και τα ρετουσαρίσματα παλαιότερων επεμβάσεων συντήρησης αποτελούν στοιχεία της διαστρωμάτωσής τους και η γνώση του πάχους τους σε κάθε σημείο είναι χρήσιμη στην διαδικασία απομάκρυνσής, τους όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο.



(a)



(b)



(c)

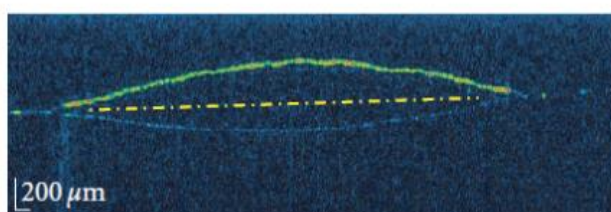
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της διαστρωμάτωσης περιοχής της ελαιογραφίας σε καμβά *Portrait of Sir James Wylie* (b), στο (a) παρουσιάζεται η εικόνα διατομής σε θέση που καταδεικνύεται από την κίτρινη κατακόρυφη γραμμή στην φωτογραφία (c) [Targowski et al., 2006].

Σε ένα τυπικό b-scan από μια περιοχή πίνακα ζωγραφικής, όπως αυτό της εικόνας (Εικ. 5.2), οι δομές παρουσιάζονται με ψευδοχρώματα, όπου το λευκό ή θερμό χρώμα αντιστοιχεί σε μέρη με έντονη σκέδαση ενώ ψυχρά χρώματα σε άλλα που αντιστοιχούν σε ασθενέστερη. Περιοχές από τις οποίες δεν επιστρέφει ακτινοβολία, είτε λόγω πολύ μικρής οπισθοσκέδασης είτε λόγω απορρόφησης, αποδίδονται με μαύρο χρώμα. Ένας άλλος τρόπος παρουσίασης είναι σε κλίμακα του γκρι, όπου η ένταση του κάθε pixel της εικόνας b-scan αυξάνεται με την αύξηση της έντασης οπισθοσκέδασης.

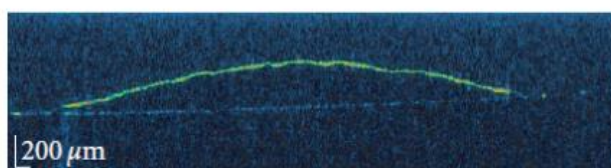
Η ακτινοβολία διερεύνησης προσεγγίζει τον πίνακα από επάνω και η πρώτη έντονη επιφάνεια που καταγράφεται είναι η διεπιφάνεια αέρα-βερνικιού (καταδεικνύεται με βέλος και τον αριθμό 1), ακολουθεί το στρώμα του βερνικιού σε μαύρο χρώμα επειδή επιτρέπει τη διέλευση της δέσμης (καταδεικνύεται με βέλος και τον αριθμό 2), και πιο κάτω παρουσιάζονται το στρώμα λαζούρας, που είναι μερικώς διαπερατό από την ακτινοβολία διερεύνησης (περιοχή με αριθμό 3), και τα χρωματικά στρώματα (αριθμός 4), τα οποία παρουσιάζουν τόσο έντονη σκέδαση που τις περισσότερες φορές το βάθος απεικόνισης περιορίζεται στην επιφάνειά τους. Όταν σε ένα υλικό η ακτινοβολία υφίσταται πολλαπλές σκεδάσεις πριν επιστρέψει για να ανιχνευτεί από το σύστημα, φαίνεται σαν να προέρχεται από μεγαλύτερο βάθος από ότι στην πραγματικότητα.

Επειδή η OCT έχει καλύτερη αξονική διακριτική ικανότητα απ' ότι πλευρική, η κατακόρυφη κλίμακα σε ένα b-scan είναι μεγαλύτερη από την οριζόντια, για να είναι ευδιάκριτες όλες οι καταγεγραμμένες διακυμάνσεις της έντασης.

Οι κατακόρυφες αποστάσεις που καταγράφονται από την OCT είναι οπτικές και για την παρουσίαση μιας διατομής, αντιπροσωπευτικής του μελετώμενου αντικειμένου, απαιτείται επεξεργασία των μετρήσεων με αλγόριθμο διόρθωσης, ο οποίος για μια τιμή δείκτη διάθλασης, αναλύοντας τη διαδρομή που ακολούθησε κάθε φορά η δέσμη διερεύνησης, αποδίδει το πάχος μιας δομής, πχ. του στρώματος βερνικιού, σε φυσικές διαστάσεις. Ακολουθούν b-scan (Εικόνα 5.3) που αποδίδουν την δομή μιας ποσότητας βερνικιού πάνω σε γυάλινο υπόστρωμα, πριν (a) και μετά την διόρθωση (b) των οπτικών αποστάσεων.



(a)



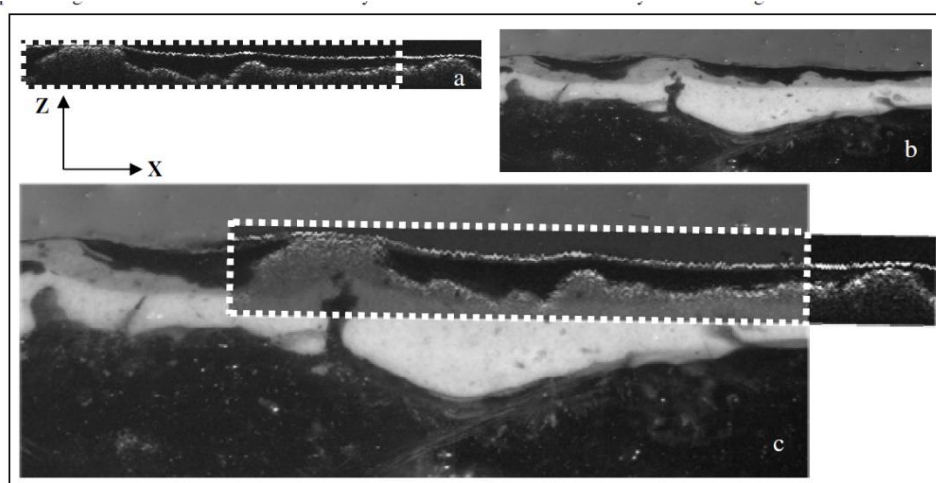
(b)

Εικόνα 5.3: Μια σταγόνα βερνικιού Rembrandt Varnish Matt της Talens σε γυάλινο υπόστρωμα πριν (a) και μετά (b) τις διορθώσεις λαμβάνοντας ως δείκτη διάθλασης $n=1.55$ για το βερνίκι (Targowski et al., 2006)

5.1.1.2 Απεικόνιση Στρωμάτων Βερνικιών

OCT και μελέτη μικροδειγμάτων

Πριν την OCT, η συνηθισμένη τεχνική για την μελέτη της διαστρωμάτωσης των πινάκων ήταν η παρατήρηση της διατομής μικροδειγμάτων. Ο καταστροφικός χαρακτήρας της, περιόριζε την εκτομή δείγματος σε συγκεκριμένες περιοχές, οι οποίες δεν ήταν αντιπροσωπευτικές του συνόλου ενός έργου. Αρχικά η OCT χρησιμοποιήθηκε για να απεικονίσει παλαιά και νεότερα στρώματα βερνικιών σε πίνακες ζωγραφικής που βρίσκονταν σε διάφορα στάδια φθοράς (Targowski et al., 2004, Liang et al., 2005) και, για την επιβεβαίωση της συμφωνίας μιας εικόνας OCT με την πραγματική διαστρωμάτωση πίνακα, οι Arcucci et al. (Arcucci et al., 2005) πραγματοποίησαν ένα πείραμα: συλλέχθηκαν OCT b-scans από περιοχή θραύσματος πίνακα του 19ου αιώνα, η οποία έπειτα αποσπάστηκε και βυθίστηκε σε εποξειδική ρητίνη. Μετά τη στερεοποίηση της ρητίνης το πλακίδιο που προέκυψε λειάνθηκε και συλλέχθηκαν εικόνες μικροσκοπίου, όπου μετά τις απαραίτητες ευθυγραμμίσεις παρατηρήθηκε η ικανοποιητική αντιστοίχιση με το στρώμα βερνικιού που απεικονίστηκε στο b-scan της ίδιας περιοχής. Ωστόσο, η συμφωνία αυτή δεν ήταν ικανή να οδηγήσει στην εξάλειψη της λήψης μικροδειγμάτων.



Εικόνα 5.4: a: η εικόνα διατομής που συλλέχθηκε με σύστημα OCT , b: η εικόνα μικροσκοπίου της διατομής μετά την απόσπαση του δείγματος, c: υπέρθεση των δύο αυτών εικόνων. (Arcucci et al., 2005)

Όπου το σύστημα επιτρέπει την απεικόνιση της πολυστρωματικής δομής πινάκων ζωγραφικής, για την ταυτοποίηση των δομών τους, πλην της στρώσεως βερνικιού, χρειάζεται συνήθως και κάποια άλλη τεχνική για μετρήσεις αναφοράς που θα διευκολύνουν την ερμηνεία των εικόνων. Σε αρκετές περιπτώσεις η εκτομή μικροδειγμάτων από κάποιο σημείο του πίνακα και η μικροσκοπική οπτική παρατήρηση των διατομών τους ή ανίχνευση του φθορισμού τους υπό την επίδραση UV ακτινοβολίας έχουν χρησιμοποιηθεί για αυτόν τον σκοπό. Τα συμπεράσματα για την περιοχή εκτομής του δείγματος μπορούν να επεκταθούν στο υπόλοιπο έργο και να ερμηνεύσουν τα b-scans από μια μεγαλύτερη περιοχή, η οποία δεν θα χρειαστεί να υποστεί κάποια καταστροφική επέμβαση. (Targowski et al., 2008, Spring et al., 2008, Kwiatkowska et al., 2008, Gorczynska et al., 2007, Targowski et al., 2006c)

Υπολογισμός Δείκτη Διάθλασης Ομάδας

Διατάξεις υλοποίησης της OCT έχουν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό με δύο διαφορετικούς τρόπους του δείκτη διάθλασης ομάδας που παρουσίαζαν βερνίκια (Liang et al., 2005, Liang et al., 2005b). Ο πρώτος περιελάμβανε την εκτίμηση του λόγου ενός κατακόρυφου οπτικού δρόμου μέσα στο υλικό (l_{med}), πχ. του οπτικού πάχους του στρώματος, προς την πραγματική απόσταση στην οποία αυτός αντιστοιχούσε (l_{air}), $\eta = \frac{l_{med}}{l_{air}}$. Ενώ ο δεύτερος, ήταν εφικτός με χρήση συστήματος Td-OCT δυναμικής εστίασης με δυνατότητα να εφαρμόζεται και για επιτόπιες μετρήσεις σε πραγματικούς πίνακες. Εστιάζοντας το σύστημα σε καθεμιά από τις δύο καθοριστικές επιφάνειες του υπό μελέτη ημιδιάφανου στρώματος και ρυθμίζοντας κάθε φορά την θέση του κατόπτρου αναφοράς, ώστε να μηδενίζεται η διαφορά οπτικού δρόμου μεταξύ των βραχιόνων αναφοράς και δείγματος του συστήματος Td-OCT, υπολογίστηκαν οι ποσότητες διαφοράς των θέσεων εστίασης, Δz , και των θέσεων του κατόπτρου αναφοράς για τις δύο θέσεις εστίασης, Δl . Με αντικατάστασή τους στην σχέση $\eta = \sqrt{1 + \frac{\Delta l}{\Delta z}}$, προέκυψε η εκτίμηση του δείκτη διάθλασης ομάδας. Σε κάθε περίπτωση, ως τελική τιμή, παρουσιάστηκε ο μέσος όρος για μια σειρά μετρήσεων σε διαφορετικές θέσεις μιας περιοχής ενδιαφέροντος.

Αυτοματοποιημένη Αναγνώριση Στρωμάτων Βερνικιών

B-scans με καθαρά ορισμένες τις επιφάνειες ενός στρώματος βερνικιού από περιοχές πίνακα επεξεργάστηκαν από αλγόριθμους διόρθωσης που, αφού αναγνώρισαν υπολογιστικά τις διεπιφάνειες αέρα- βερνικιού και βερνικιού-χρωματικού στρώματος, μετέτρεψαν τις αξονικές οπτικές αποστάσεις σε φυσικές, λαμβάνοντας την τιμή του δείκτη διάθλασης ομάδας από μετρήσεις ή την βιβλιογραφία ($\eta \sim 1,5$). Επεκτείνοντας την επεξεργασία σε μια ολόκληρη περιοχή, κατασκευάστηκαν ενδιαφέροντες τρισδιάστατοι πίνακες που απέδιδαν την μορφολογία της γυμνής επιφάνειας του χρωματικού στρώματος ή το πάχος του βερνικιού που αντιστοιχούσε σε κάθε θέση της επιφάνειας που σαρώθηκε από την τεχνική (Gorczyńska et al., 2007, Targowski et al., 2006c)

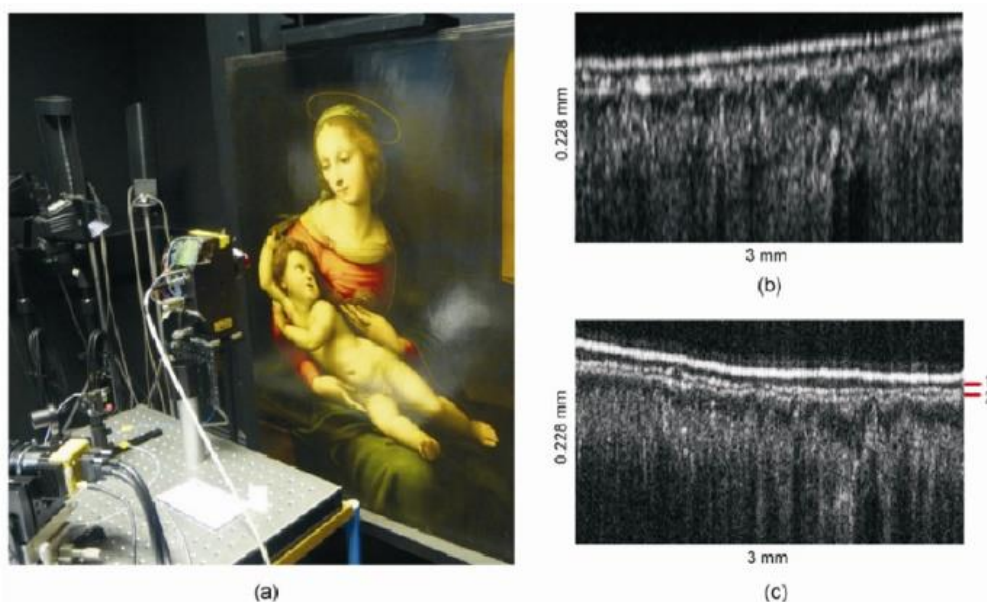
Παρακολούθηση Στεγνώματος Βερνικιών

Η ταχύτητα και διακριτική ικανότητα της OCT την κατέστησαν ιδανική για την μελέτη της διαδικασίας στεγνώματος βερνικιών, με απώτερο στόχο την μοντελοποίηση της τελικής τραχύτητας της επιφανείας τους και του επακόλουθου οπτικού αποτελέσματος για μια καθορισμένη υποκείμενη επιφάνεια. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της επίδρασης βερνικιού σε επιφάνειες πινάκων ζωγραφικής που υπόκεινται σε συντήρηση, ώστε να επιλεγεί τελικά εκείνο που θα δώσει την βέλτιστη τελική εικόνα στο έργο. Πραγματοποιήθηκαν έτσι μελέτες όπου απεικόνισαν την μεταβολή στρωμάτων βερνικιού κατά την διάρκεια του στεγνώματος, αποδίδοντας ποιοτικά (Liang et al., 2005b) και ποσοτικά (Lawman et al., 2011) την

επιφάνεια του σε διαδοχικές χρονικές στιγμές μετά την εφαρμογή του στο επίσης εικονιζόμενο υπόστρωμα.

Εξειδικευμένα Συστήματα OCT

Οι στρώσεις των βερνικιών έχουν μικρό πάχος και δεν ήταν πάντοτε εφικτή η διάκρισή τους με εμπορικά διαθέσιμες συσκευές μικρής αξονικής διακριτικής ικανότητας. Κατασκευάστηκαν έτσι συστήματα που ικανοποιούν τις απαιτήσεις απεικόνισης λεπτών στρωμάτων στους πίνακες ζωγραφικής, όπως τα Fd-OCT από τις ομάδες των Cheung et al. (2013, 2015a) με κεντρικό μήκος κύματος γύρω στα 810nm, $\Delta\lambda(\text{FWHM}) \sim 200\text{nm}$ και αξονική διακριτική ικανότητα που έφτανε τα $1,8\mu\text{m}$ στον αέρα. Το αποκαλούμενο μάλιστα σύστημα υπερυψηλής διακριτικής ικανότητας (UHR-Ultra High Resolution System) (Cheung et al., 2015), με ευαισθησία σταθερή για μεγαλύτερο μέρος του βάθους απεικόνισης, επιλέχθηκε για την απόδοση των επιμέρους λεπτών στρωμάτων βερνικιού στον ιστορικό πίνακα, του Raphael, “Madonna and Child”.



Εικόνα 5.5: (a) Φωτογραφία του έργου “Madonna and Child” του Raphael σε εργαστήριο της National Gallery του Λονδίνου κατά την μελέτη του από το σύστημα OCT υπερυψηλής διακριτικής ικανότητας, (b) εικόνα διατομής OCT που συλλέχθηκε με εμπορικά διαθέσιμο σύστημα κεντρικού μήκους κύματος 930nm και αξονικής διακριτικής ικανότητας $6,5\mu\text{m}$ στον αέρα, (c) εικόνα διατομής OCT από την ίδια περίπου περιοχή του πίνακα, που συλλέχθηκε με το σύστημα (UHR) αξονικής διακριτικής ικανότητας $1,2\mu\text{m}$ στο βερνίκι, όπου διακρίνονται τα λεπτά στρώματα βερνικιού (καταδεικνύονται από τις κόκκινες γραμμές με νούμερα 1 και 2), πολύ καθαρότερα απ’ ότι στην (b).

Απεικόνιση Στρωμάτων Βερνικιών σε Ιστορικούς Πίνακες

Πολλαπλά Στρώματα Βερνικιών

Η OCT κατόρθωσε να απεικονίσει τα πολλαπλά στρώματα βερνικιών στην επιφάνεια διάσημων πινάκων, όπως είναι η “Madonna dei Fusi” που αποδίδεται στο εργαστήριο του Leonardo da Vinci (Targowski et al., 2013) και τα “Sunflowers” του Van Gogh (van den Berg et al., 2019) αλλά και άλλων λιγότερο γνωστών (Targowski et al., 2008b, Kwiatkowska et al., 2008, Targowski et al., 2009c). Η ύπαρξη πολλών τέτοιων στρωμάτων είναι ενδεικτική του πλήθους των διεργασιών συντήρησης που έχουν δεχθεί ιστορικοί πίνακες ως μέρος της συνεχούς προσπάθειας διατήρησης της εικόνας τους με την πάροδο του χρόνου.

Απεικόνιση Φθορών

Η OCT χρησιμοποιήθηκε για την διάγνωση φθορών στα στρώματα βερνικιών πινάκων, όπως ήταν το βάθος ρωγμών (Elias et al., 2011). Στην περίπτωση ελαιογραφίας του 18^{ου} αιώνα με τίτλο “Lady with a Bouquet of Flowers”, οι λευκού χρώματος αλλοιώσεις στην επιφάνεια του έργου αποδόθηκαν με την βοήθεια της OCT σε μια σειρά αποκολλήσεων που είχε υποστεί το στρώμα βερνικιού (Targowski et al., 2015b). Ενώ, στο ημιτελές έργο του Leonardo da Vinci “Adoration of the Magi”, η τεχνική ήταν σε θέση να απεικονίσει την έντονη σκέδαση από περιοχές του στρώματος βερνικιού που αντιστοιχούσαν σε σημεία μεταβολής της εμφάνιση του πίνακα. Αυτή η συμπεριφορά αποδόθηκε στην δημιουργία μικρορηγματώσεων στο σώμα του βερνικιού λόγω έκθεσής του σε συνθήκες έντονης υγρασίας, φαινόμενο γνωστό ως blooming (Targowski et al., 2015b). Κατά την μελέτη που προηγήθηκε της αποκατάστασης των ζωγραφικών αναπαραστάσεων από την ιστορικής σημασίας σταυροθήκη του Βησσαρίωνα, η OCT έδωσε την εικόνα της σύνθετης δομής τόσο του γηρασμένου δευτερεύοντος στρώματος βερνικιού που εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια αναπαλαίωσης τον 15^ο αιώνα, όσο και του αυθεντικού βερνικιού από τον 13^ο αιώνα. Απεικονίστηκε, εκτός από το πάχος των πολλαπλών στρωμάτων επικάλυψης της εικόνας και το επίπεδο της διαστρωμάτωσης στο οποίο βρίσκονταν τα χρυσά διακοσμητικά της στοιχεία, το εκτενές δίκτυο ρηγματώσεων και η κατανομή ως προς το βάθος των φαινομένων αλλοίωσης που είχε υποστεί (Iwanicka et al., 2016c).

Ερμηνεία μετρήσεων UV επαγόμενου φθορισμού

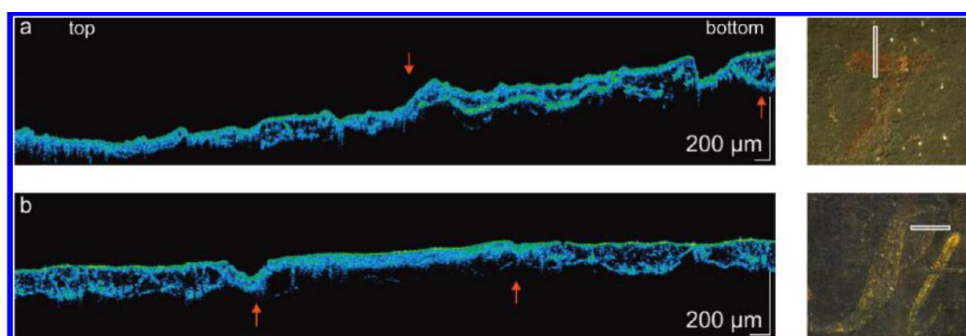
Η OCT επιστρατεύτηκε για την ερμηνεία μετρήσεων UV-επαγόμενου φθορισμού όταν στον πίνακα “La Muta” του Raphael, ανιχνεύτηκαν περιοχές χαμηλότερου φθορισμού. Μια τέτοια εικόνα συνήθως αποδίδεται σε επεμβάσεις μεταγενέστερες της δημιουργίας του περιβάλλοντος στρώματος βερνικιού ή στην ύπαρξη χρωμάτων στη ζωγραφική σύνθεση που επηρεάζουν τον φθορισμό του συνδετικού μέσου. Ωστόσο, η OCT κατέδειξε ότι το φαινόμενο αυτό, εδώ, οφειλόταν στο μικρότερο πάχος του στρώματος βερνικιού στις εν λόγω περιοχές (Iwanicka et al., 2015).

Επιζωγραφίσεις- Ρετουσαρίσματα

Η ικανότητα της τεχνικής να απεικονίζει μη επεμβατικά διαφανή και ημιδιαφανή στοιχεία της διαστρωμάτωσης πινάκων ζωγραφικής, προσδιορίζοντας τη θέση τους κατά τον άξονα διάδοσης της δέσμης διερεύνησης, την καθιστούν μοναδική στην απόδοση επιζωγραφίσεων, ρετουσαρισμάτων και γενικότερα επεμβάσεων που συντελέστηκαν πάνω στο αρχικό στρώμα βερνικιού.

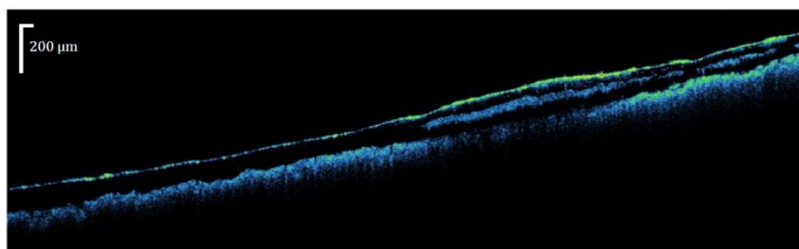
Η OCT ήταν ικανή να ανιχνεύσει επιζωγραφίσεις σε καίριες περιοχές ιστορικών ζωγραφικών πινάκων, που κείτονταν σε επίπεδο ανώτερο της πλειονότητας των υπόλοιπων χρωματικών στρωμάτων, κάποιες φορές χωρίς να διακρίνεται κάποια προστατευτική επικάλυψή τους (Kwiatkowska et al., 2008, Targowski et al., 2010, Targowski et al., 2015b). Οι μετρήσεις αυτές είναι πολύ χρήσιμες για τους συντηρητές, καθώς οποιοσδήποτε επεμβάσεις καθαρισμού θα επηρέαζαν άμεσα τέτοιου είδους επιζωγραφίσεις.

Για παράδειγμα, στον πίνακα “Saint Leonardus of Porto Maurizio”, η διάγνωση με OCT έδειξε ότι η αναγραφόμενη ημερομηνία, 1797, βρισκόταν σε επίπεδο βαθύτερο εκείνου της επιγραφής με το όνομα του αγίου και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η αγιοποίησή του έλαβε χώρα μετά το 1797, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η επιγραφή σχεδιάστηκε μεταγενέστερα της δημιουργίας του πίνακα πιθανότατα κατά τη διάρκεια κάποιας συντήρησης, καλύπτοντας άλλη με το κοσμικό όνομα του αγίου (Targowski et al., 2010).



Εικόνα 5.6: a. b-scan από την περιοχή της ημερομηνίας όπως φαίνεται στη φωτογραφία στα δεξιά b. b-scan από την περιοχή της επιγραφής σε θέση που δείχνει η φωτογραφία, τα κόκκινα βέλη καταδεικνύουν τα όρια του ψηφίου και του γράμματος. Το γράμμα της επιγραφής παρουσιάζει διαφορετική εικόνα σκέδασης από τις γειτονικές του περιοχές, με διαστρωμάτωση τελείως διαφορετική απ’ ότι στην υπόλοιπη διατομή όπου διακρίνονται ημιδιάφανα επιφανειακά στρώματα (Targowski et al., 2010).

Η μελέτη διάσημων ιστορικών πινάκων με OCT, έδωσε καταπληκτικές εικόνες των ρετουσαρισμάτων που είχαν δεχθεί κατά την διάρκεια προηγούμενων διεργασιών αποκατάστασής τους. Η τεχνική ήταν σε θέση να υποδείξει το επίπεδο της διαστρωμάτωσης στο οποίο βρίσκονταν, την σχετική τους θέση ως προς τα υπόλοιπα ζωγραφικά στοιχεία του πίνακα καθώς και το πλήθος και πάχος των στρωμάτων βερνικιών που τα περιέβαλλαν (Targowski et al., 2013, Iwanicka et al., 2015, Iwanicka et al., 2017, Targowski et al., 2018, van den Berg et al., 2019). Ρετουσαρίσματα, που δεν ήταν εύκολο να ανιχνευτούν μέσω μετρήσεων της UV-excited fluorescence, ήταν δυνατόν να αποκαλυφθούν με την OCT (Targowski et al., 2013).

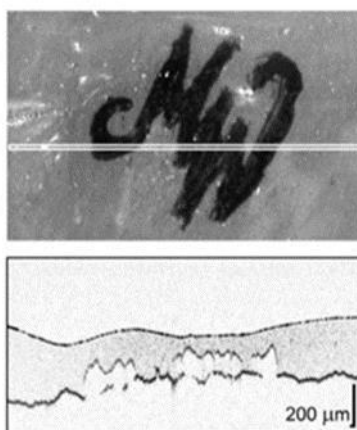


Εικόνα 5.7: OCT b-scan από περιοχή ρετουσαρίσματος του πίνακα “Madonna dei Fusi” που αποδίδεται στο εργαστήριο του Leonardo da Vinci, όπου χρωματικό στρώμα διακρίνεται ανάμεσα στο αρχικό και τα μεταγενέστερα στρώματα βερνικιών και κάτω από αυτό εικόνα της σκιάς του. Δεν ήταν δυνατόν για την τεχνική να απεικονίσει την δομή εκείνη του πίνακα που κλήθηκε να καλύψει το ρετουσαρίσμα καθώς η έκτασή του την υπερβαίνει. Ο πίνακας παρατηρήθηκε υπό κλίση για την αποφυγή κατοπτρικών ανακλάσεων που θα οδηγούσαν σε κορεσμό του ανιχνευτή (Targowski et al., 2013).

Περιοχή Υπογραφής

Με την μη καταστροφική μελέτη της πολύτιμης περιοχής της υπογραφής του ζωγράφου, η OCT αποδεικνύεται χρήσιμη τεχνική ελέγχου της αυθεντικότητας πινάκων.

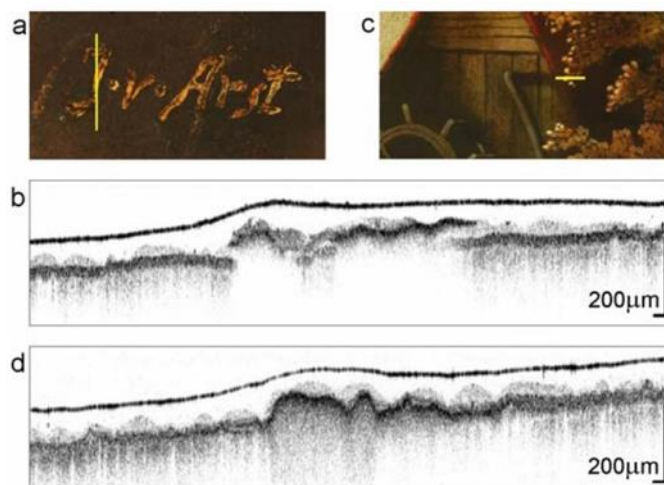
Μια συνηθισμένη πρακτική παραχάραξης ιστορικών πινάκων, ώστε η δημιουργία τους να αποδοθεί σε κάποιον πέραν του πραγματικού καλλιτέχνη, ήταν η μεταγενέστερη προσθήκη αντιγράφου μιας αντιπροσωπευτικής υπογραφής πάνω στο αρχικό βερνίκι και η κάλυψη του έργου με ειδική επίστρωση, που έδινε στον πίνακα ομοιόμορφη εικόνα φθορισμού σε περίπτωση εξέτασης κάτω από UV ακτινοβολία. Η OCT μπορεί να παρακάμψει την συγκάλυψη μιας τέτοιας επέμβασης, με την ικανότητά της να απεικονίζει την διαστρωμάτωση των εξώτερων επιπέδων των ζωγραφικών πινάκων και το κάνει μη επεμβατικά.



Εικόνα 5.8: (Κάτω πλαίσιο) Εικόνα διατομής από περιοχή υπογραφής που υποδεικνύεται με λευκή γραμμή στο άνω πλαίσιο. Διακρίνεται η υπογραφή σε επίπεδο ανώτερο αυτού των υπολοίπων χρωματικών στρωμάτων (Targowski et al., 2008b)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.8, στο OCT b-scan από περιοχή υπογραφής σχεδιασμένης σε δείγμα σύμφωνα με την παραπάνω τεχνική παραχάραξης, είναι δυνατός ο εντοπισμός του επιπέδου της υπογραφής πάνω από το πρώτο στρώμα του βερνικιού (Targowski et al., 2008b).

Η OCT έχει κατορθώσει να εντοπίσει με επιτυχία περιπτώσεις μεταγενέστερης προσθήκης υπογραφής και σε ιστορικούς πίνακες (Targowski et al., 2008, Targowski et al., 2010). Όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα διατομής που συλλέχθηκε από σημείο πίνακα του 20ου αιώνα κατασκευασμένου με την τεχνοτροπία της χρυσής εποχής της Ολλανδικής ζωγραφικής του 17ου αιώνα, το υλικό της υπογραφής απεικονίζεται σαν να αιωρείται πάνω από το αρχικό στρώμα του διάφανου βερνικιού, κάτι το οποίο δεν είχαν καταδείξει άλλες τεχνικές. (Targowski et al., 2008)



Εικόνα 5.9: Στα πλαίσια a, c φωτογραφίες τμημάτων της ζωγραφικής απεικόνισης με τις κίτρινες γραμμές να καταδεικνύουν την θέση των b-scan των εικόνων b, d αντίστοιχα (Targowski et al., 2008)

Καθαρισμός Στρωμάτων Βερνικιών

Τα βερνίκια είναι τα στοιχεία εκείνα του πίνακα που έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον και υπόκειται σε διαφόρων τύπων αλλοιώσεις με αποτέλεσμα να χάνουν την διαφάνειά τους και να υποβαθμίζουν την εικόνα της υποκείμενης ζωγραφικής απεικόνισης. Έτσι μια από τις πιο συχνές διαδικασίες συντήρησης είναι η απομάκρυνση γηρασμένων βερνικιών και η αντικατάστασή τους με νέα μεγαλύτερης διαύγειας. Η OCT με την ικανότητα της να απεικονίζει το πάχος των αλλοιωμένων στρωμάτων επικάλυψης έχει χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση ευαίσθητων προς τον καθαρισμό περιοχών καθώς και για την επόπτευση των διαφόρων σταδίων αποδόμησης βερνικιών όπως παρουσιάζεται εκτενέστερα στην ενότητα 5.2.1.1.

5.1.1.3 Απεικόνιση Στρωμάτων Λαζούρας

Η OCT μπορεί και απεικονίζει τις ημιδιάφανες στρώσεις λαζούρας πινάκων, οι οποίες στα b-scans διακρίνονται ως περιοχές με εντονότερη σκέδαση της ακτινοβολίας διερεύνησης απ' ότι στα στρώματα βερνικιού και ασθενέστερη απ' ότι στο χρώμα.

Η OCT έδωσε ενδιαφέρουσες εικόνες, όταν διέκρινε σε λεπτομέρεια του ιστορικού πίνακα “Portrait of Sir James Wylie” τα διαδοχικά στρώματα λαζούρας που εφαρμόστηκαν πάνω σε κόκκινο χρώμα για την καλύτερη ζωγραφική απόδοση των πτυχών υφάσματος (Targowski et al., 2006, Targowski et al., 2015b)

Η OCT ήταν επιπλέον σε θέση να απεικονίσει στρώμα λαζούρας σε όλο το πάχος του στην ιστορική ελαιογραφία σε καμβά “Virgin and Child” και να προσδιορίσει το επίπεδο της διαστρωμάτωσης στο οποίο αυτό ανήκε. Η λαζούρα ανιχνεύθηκε ως το ανώτατο στρώμα του πίνακα σε περιοχές των καφέ σκιών της αναπαράστασης, ενώ ο υπόλοιπος πίνακας ήταν καλυμμένος με μικρότερου πάχους στρώμα βερνικιού. Οι OCT μετρήσεις οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η λαζούρα εφαρμόστηκε σε ορισμένα σημεία πιθανότατα κάποια στιγμή μετά την κάλυψη του πίνακα με το προστατευτικό βερνίκι. Η υπόθεση αυτή ενισχύθηκε από τον εντοπισμό μέσω της OCT ρηγμάτωσης, στα όρια του στρώματος λαζούρας, ως ένα αρχικό στάδιο αποκόλλησής του από τα υποκείμενα στοιχεία του πίνακα, (Rouba et al., 2008).

Απεικόνιση Χρωματικών Στρωμάτων

Μετρήσεις OCT σε πειραματικά δοκίμια και ιστορικούς πίνακες

Η ακτινοβολία διερεύνησης στο εγγύς υπέρυθρο των συστημάτων που ήταν τα διαθέσιμα στα πρώτα στάδια της εφαρμογής της τεχνικής, παρουσίασε μειωμένη διαπερατότητα στην πλειονότητα των ζωγραφικών χρωμάτων ιστορικών πινάκων. Τότε η OCT ήταν ικανή τις περισσότερες φορές να απεικονίσει μόνο την επιφάνεια αδιαφανών στρωμάτων χρώματος τα οποία παρουσίαζαν έντονη σκέδαση. Μπόρεσε ωστόσο να δώσει με επιτυχία την εικόνα στρωμάτων επιλεγμένων υλικών όπως lake χρωμάτων και στρώσεων smalt σε πειραματικά δοκίμια που κατασκευάστηκαν για την μελέτη των περιορισμών και δυνατοτήτων της τεχνικής (Targowski et al., 2004, Liang et al., 2005c, Liang et al., 2007, Liang et al., 2007b, Spring et al., 2008). Στο πλαίσιο αυτών των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε πειραματική εκτίμηση του δείκτη διάθλασης ομάδας των χρωμάτων Rose Madder Lake και Cochineal Lake σε λινέλαιο (Liang et al., 2007), ενώ διαπιστώθηκε ότι τα χρώματα τέμπερας ήταν πιο σκεδαστικά από τα αντίστοιχα ίδιου πιγμέντου, όταν το συνδετικό μέσο ήταν λινέλαιο (Spring et al., 2008).

Ανάγλυφη επιγραφή που σχηματίστηκε πειραματικά πάνω σε χρωματικό στρώμα και την οποία υπέκρυψε η λεία επιφάνεια του υπερκείμενου βερνικιού, ήταν δυνατόν να διακριθεί στην 3D απεικόνιση της περιοχής με OCT (Targowski et al., 2008). Με κατάλληλη επεξεργασία των τρισδιάστατων δεδομένων OCT που συλλέχθηκαν μετά από σάρωση περιοχής του έργου “Madonna dei Fusi”, παρουσιάστηκε το ανάγλυφο της επιφάνειας των χρωματικών στρωμάτων, το οποίο είχε μορφή καμβά, καταδεικνύοντας κάποια ενδιάμεση προσωρινή μεταφορά του έργου σε καμβά, που πιθανώς περιελάμβανε σταθεροποίησή του μέσω θέρμανσης (Iwanicka et al., 2017).

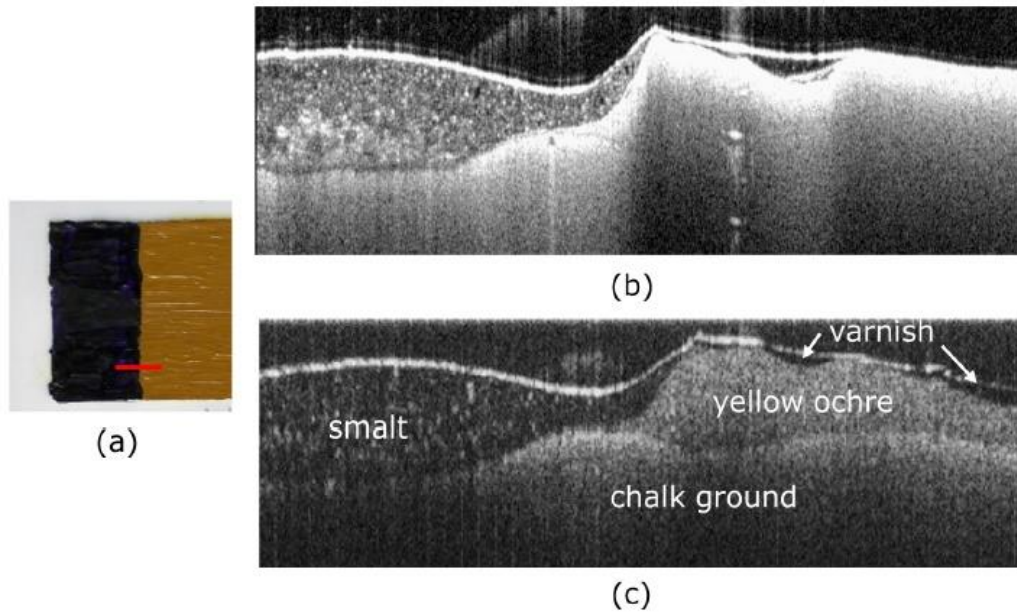
Παρά τους περιορισμούς στην αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της, η OCT απεικόνισε πολλαπλά χρωματικά στρώματα σε περιοχή του πίνακα του Titian των αρχών του 17^{ου} αιώνα με τίτλο “A concert”, με την ταυτοποίησή τους να μην είναι δυνατή χωρίς την εφαρμογή κάποιας άλλης τεχνικής (Liang et al., 2007b).

Εξειδικευμένα Συστήματα OCT για την Απεικόνιση Χρωματικών Στρωμάτων Ζωγραφικών Πινάκων

Έχοντας τις ρίζες τους στη βιοϊατρική, οι περισσότερες συσκευές OCT απέφευγαν φασματικές περιοχές που παρουσίαζαν έντονη απορρόφηση από το νερό. Δεν ήταν έτσι σε θέση να αποδώσουν τις περισσότερες φορές την εσωτερική δομή χρωματικών στρωμάτων και προέκυψε η ανάγκη σχεδιασμού εξειδικευμένων συστημάτων που θα κάλυπταν αυτή την απαίτηση.

Στην προσπάθεια προσδιορισμού των προδιαγραφών της OCT για να απεικονίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τα χρωματικά στρώματα πινάκων, πραγματοποιήθηκε μια σειρά προκαταρκτικών πειραμάτων. Αρχικά, ποικιλία εμπορικά διαθέσιμων χρωμάτων σε δοκίμια μετρήθηκε με 2 συστήματα OCT διαφορετικών κεντρικών μηκών κύματος, 823nm και 1,55μm και διαπιστώθηκε ότι αν και η διαπερατότητα της ακτινοβολίας ήταν περιορισμένη, το σύστημα με μεγαλύτερο μήκος κύματος έδινε καλύτερα αποτελέσματα (Szkulmowska et al., 2007). Αργότερα, μετρήσεις της μέσης διαφάνειας, στη φασματική περιοχή των 400-2400nm, ενός συνόλου χρωμάτων που κατασκευάστηκαν από περίπου 50 διαφορετικά πιγμέντα σε συνδυαστικά μέσα τέμπρας και λινελαίου, έδωσαν μέγιστη τιμή διαφάνειας στην περιοχή των μηκών κύματος 2,2 μm – 2,3μm. Η διαφάνεια ενός χρώματος, σε ακτινοβολία μήκους κύματος λ, προσδιορίστηκε ως $T(\lambda) = R_W(\lambda) - R_B(\lambda)$, όπου $R_W(\lambda)$ και $R_B(\lambda)$ ήταν η φασματική ανακλαστικότητα του χρώματος σε λευκό και μαύρο υπόβαθρο αντίστοιχα (Liang et al., 2007, Liang et al., 2013).

Με βάση αυτές τις έρευνες κατασκευάστηκε σύστημα Td-OCT με πηγή υπερφωταύγειας (Tm-doped superfluorescent fiber source) με κεντρικό μήκος κύματος, λc, 1960nm και εύρος ζώνης Δλ(FWHM)~ 40nm. Ήταν ικανό να απεικονίσει στρώμα λευκού του τιτανίου εκεί όπου σύστημα κεντρικού μήκους κύματος στα 930nm δεν τα κατάφερε, λόγω έντονης σκέδασης, ενώ κατόρθωσε να απεικονίσει σε en-face εικόνα προσχέδιο κάτω από στρώμα μπλε Πρωσίας σε δοκίμιο, κάτι το οποίο ήταν αδύνατο με λc διερεύνησης στα 930nm (Cheung et al., 2013b, Cheung et al., 2014). Το σύστημα αυτό αν και παρουσίαζε μεγάλη διεισδυτικότητα δεν είχε ικανοποιητική διακριτική ικανότητα για την απεικόνιση λεπτών στρωμάτων χρώματος και βερνικιού και οι ερευνητές κινήθηκαν προς την κατασκευή συστημάτων Fd-OCT με πηγές υπερσυνεχούς φάσματος με αρκετά μεγαλύτερα εύρη ζώνης και κεντρικό μήκος κύματος ~ 2μm, το βελτιωμένο βάθος απεικόνισης και η διακριτική ικανότητα των οποίων επιβεβαιώθηκε με μετρήσεις σε δοκίμια (Cheung et al., 2015b, Liang et al., 2015, Duggins et al., 2018, Xu et al., 2019).



Εικόνα 5.10: (a):Δοκίμιο όπυ, πάνω σε στρώση κιμωλίας και κουνελόκολλας (chalk ground), υπάρχει αριστερά στρώμα smalt και δεξιά στρώμα yellow ochre σε λινέλαιο καλυμμένα με ένα λεπτό στρώμα βερνικιού. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει τη θέση στην οποία αντιστοιχεί το b-scan, (b):B-scan με σύστημα πηγής κεντρικού μήκους κύματος $\lambda_c=930\text{nm}$ και αξονική διακριτική ικανότητα $6,5\mu\text{m}$. Η έντονη σκέδαση εμποδίζει την απεικόνιση της εσωτερικής δομής του χρωματικού στρώματος yellow ochre, (c): B-scan με σύστημα Fd-OCT με πηγή κεντρικού μήκους κύματος $\lambda_c\sim 1960\text{nm}$ και αξονική διακριτική ικανότητα $\sim 13\mu\text{m}$. Διακρίνεται πλέον όλο το σώμα του στρώματος yellow ochre αλλά και η λεπτή στρώση βερνικιού (varnish) πάνω από αυτό (Cheung et al., 2015b).

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα συστήματα OCT ως προς την διαφάνεια που παρουσίασαν τα διάφορα χρώματα στην ακτινοβολία διερεύνησης τους, όπως παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια πειραμάτων στο πλαίσιο μελέτης της δυνατότητας της τεχνικής να απεικονίζει την εσωτερική διαστρωμάτωση πινάκων ζωγραφικής. (+: ικανοποιητική διαφάνεια, -: αδιαφάνεια)

Τύπος Συστήματος	Τύπος πηγής	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Εύρος ζώνης (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Χρωματικά στρώματα σε πειραματικά δοκίμια										Αναφορές	
						Smalt σε έλαιο	Yellow ochre σε έλαιο	Cobalt blue σε λινέλαιο	Rose Madder σε λινέλαιο	Malachite σε αυγοτέμπερα	Titanium white σε έλαιο	Prussian blue σε έλαιο	Madder lake σε αυγοτέμπερα	Μίγμα malachite, lead white και buckthornlake	Indigo σε έλαιο		Indigo dye σε λινέλαιο
en-fa σε Td-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	850		18-20	15	+	-										Liang et al., 2005, Liang et al., 2005b
en-fa σε Td-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	1300		18-20	25	+	-										Liang et al., 2005, Liang et al., 2005b
Fd-OCT		930		6					+								Liang et al., 2007
Td-OCT		1310		18					+								Liang et al., 2007
en-fa σε Td-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	670		10	20					περιορισμένη διαφάνεια							Liang et al., 2007
	Πηγή Υπερφωταύγειας	1300		20						+							
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930	100	6,5													Cheung et al., 2013b
Td-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	1950	40	~35							+	+					Cheung et al., 2013b
Spectral OCT	Πηγή Υπερσυνεχούς φάσματος	810	180	1,8									+				Cheung et al., 2013
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930		6,5										+			Cheung et al., 2013
Spectral OCT	Πηγή Υπερσυνεχούς φάσματος	1960	220	13	17	+	+							+			Cheung et al., 2015b
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930		6,5		+	-										Cheung et al., 2015b
Spectral OCT	Πηγή Υπερσυνεχούς φάσματος	1960		9			+	+							+		Liang et al., 2015
		930					-	-							-		Liang et al., 2015
		1300					-	-							-		Liang et al., 2015
Td-OCT dynamic focus	Πηγή LASER Υπερσυνεχούς Φάσματος	2000		4,85												+	Xu et al., 2019
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	900	150	3												-	Xu et al., 2019

Πίνακας 5.1: Συστήματα OCT και η ικανότητα τους να απεικονίσουν την δομή χρωματικών στρωμάτων όπως αυτή διαπιστώθηκε μέσα από πειραματικές μετρήσεις. Η ικανότητα απεικόνισης έχει αποδοθεί επισημαίνοντας το βαθμό διαφάνειας που παρουσιάζουν τα χρωματικά στρώματα στην ακτινοβολία διερεύνησης της διάταξης (+:ικανοποιητική διαφάνεια, -:αδιαφάνεια).

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη ιστορικών πινάκων ζωγραφικής και τα στοιχεία της δομής τους που κατέστη εφικτό να απεικονίσουν.

Τύπος Συστήματος	τύπος πηγής	Κεντρικό μήκος κύματος (nm)	Εύρος ζώνης (nm)	Εύρος μήκους κύματος (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Ιστορικός Πίνακας Ζωγραφικής	Αντικείμενο Παρατήρησης	αναφορές	
Fd-OCT		930			6	9	Saint Catherine with a Donor του Pintoricchio (1480-1500μΧ)- National Gallery, Λονδίνο	στρώμα βερνικιού, χρωματικό στρώμα και υποκείμενο στρώμα χρυσού	Liang et al., 2007	
							A Distant View of Dordrecht, with a Milkmaid and Four Cows, and Other Figures του Aelbert Cuyp (~1650μΧ)- National Gallery, Λονδίνο	στρώμα βερνικιού, ρηγματώσεις στο χρωματικό στρώμα, επιζωγραφίσεις, επικαθίσεις	Spring et al., 2008	
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	845	50				Virgin and Child	στρώμα βερνικιού, στρώμα λαζούρας, ρηγματώσεις κάτω από στρώμα λαζούρας	Rouba et al., 2008	
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	845	107		4		Portrait of a woman (19ος αιώνας)- Ιδιωτική συλλογή	πολλαπλά στρώματα βερνικιού, επίπεδο υπογραφής	Targowski et al., 2010	
							Saint Leonard of Porto Maurizio	πολλαπλά στρώματα βερνικιού, επίπεδο επιγραφής, επιζωγραφίσεις	Targowski et al., 2010	
Full-field TdOCT	Halogen Lamp Coupled with Köhler Illumination Device				1,5	1,2	The portrait of a lady του Franz Strotzberg	στρώματα βερνικιού, ρηγματώσεις στο στρώμα βερνικιού, επιζωγραφίσεις, ημιδιάφανα χρωματικά στρώματα	Elias et al., 2011	
Spectral OCT	Supercontinuum Broadband LASER source	810	~200		1,8	7	Madonna and Child του Raphael (~1600μΧ)- National Gallery, Λονδίνο	λεπτά στρώματα βερνικιών, χρωματικά στρώματα	Cheung et al., 2015	
Fd-OCT		930			6	9	A concert του Titian (1600-1650μΧ)- National Gallery, Λονδίνο	πολλαπλά χρωματικά στρώματα	Liang et al., 2007b	
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας				770-970	3	13	La Muta του Raphael	στρώμα βερνικιού, επιζωγραφίσεις	Iwanicka et al., 2015
								Madonna dei Fusi του εργαστηρίου του Leonardo da Vinci	στρώματα βερνικιών, ρετουσαρίσματα ανάμεσα στα στρώματα βερνικιών, ανάγλυφο χρωματικού στρώματος	Targowski et al., 2013
								Ζωγραφική αναπαράσταση στη σταυροθήκη του Βησσαρίωνα (13ος αιώνας)	στρώματα βερνικιών (πάχος, αποκολλήσεις, δίκτυο ρηγματώσεων, κατανομή αλλοιώσεων), επίπεδων λεπτομερειών από χρυσό	Iwanicka et al., 2016c
								Adoration of the Magi του Leonardo da Vinci	στρώματα βερνικιών (πάχος, ρετουσαρίσματα, blooming), χρωματικά στρώματα και ρηγματώσεις τους	Iwanicka et al., 2017

Πίνακας 5.2:

Συστήματα OCT που επιστρατεύτηκαν για την τομογραφία ιστορικών πινάκων ζωγραφικής, σε σχέση με τα ονόματα των έργων που μελέτησε και τα στοιχεία δομής των πινάκων που ήταν σε θέση να καταγράψει στις εικόνες OCT καθένα από αυτά. Τα συστήματα εδώ παρουσιάζονται στον πίνακα, παραθέτοντας κάποιες από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους τους ως στοιχεία αναγνώρισης.

5.1.1.5 Απεικόνιση Προσχεδίων (Underdrawings)

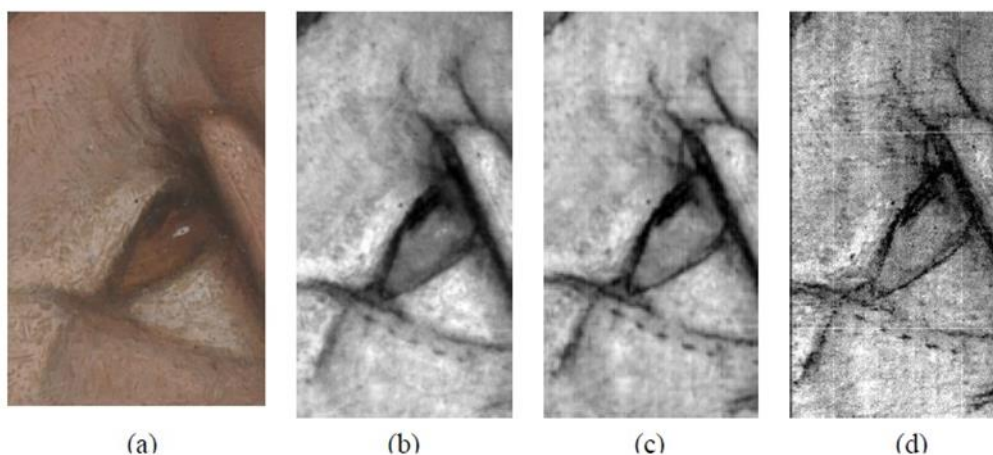
Η OCT έχει κατορθώσει σε συγκεκριμένες περιπτώσεις να απεικονίσει με ευκρίνεια προπαρασκευαστικά σχέδια κάτω από χρωματικά στρώματα πινάκων. Τέτοια σκίτσα δεν είναι πάντα ορατά με γυμνό μάτι, διαφέρουν ενίοτε από την τελική ζωγραφική απεικόνιση και η μελέτη τους δίνει ενδιαφέρουσες πληροφορίες για την ιστορία κατασκευής ενός έργου.

Το βασικό πλεονέκτημά της σε σύγκριση με την υπέρυθη ανακλαστογραφία (IR reflectography) που είναι η συνήθης μέθοδος απόδοσης της εικόνας προσχεδίων, είναι ότι επιτρέπει την επιλεκτική παρουσίαση του συγκεκριμένου επιπέδου της διαστρωμάτωσης του πίνακα στο οποίο βρίσκεται το σχέδιο, παρέχοντας εικόνες μεγαλύτερου δυναμικού εύρους και καλύτερης διακριτικής ικανότητας. Η εικόνα που θα καταγραφεί από μια NIR κάμερα αποτελεί δισδιάστατη προβολή των χαρακτηριστικών της τρισδιάστατης δομής του πίνακα, εμπεριέχει έτσι πληροφορίες από όλα τα διαφορετικά επίπεδα που σκεδιάζουν την IR ακτινοβολία θολώνοντας την εικόνα.

Για να αποδοθούν οι εικόνες των προπαρασκευαστικών σκίτσων με την OCT επιλέγεται η απεικόνιση του αθροίσματος, του μέσου όρου ή της διαμέσου των επιπέδων, παράλληλων στην επιφάνεια του πίνακα, που τα περιέχουν. Αυτό επιτυγχάνεται με συστήματα en-face Td-OCT όπου για διαδοχικές θέσεις του κατόπτρου αναφοράς σαρώνεται ένα ολόκληρο επίπεδο κάθετο στη δέσμη διερεύνησης ή με συστήματα Fd-OCT όπου η γρήγορη σάρωση ενός όγκου ενδιαφέροντος ακολουθείται από επεξεργασία των 3D δεδομένων για την ανασύσταση των en-face εικόνων των προσχεδίων.

Έχουν εκτελεστεί πειράματα όπου η OCT απεικόνισε σκίτσα, και την χαρακτηριστική εικόνα των υλικών σχεδιασμού τους, κάτω από επιλεγμένα χρωματικά στρώματα σε δοκίμια (Liang et al., 2005a) και άλλα στα οποία ελέγχθηκε η ικανότητα συστήματος OCT (με ακτινοβολία διερεύνησης κεντρικού μήκους κύματος $\lambda_c = 1550\text{nm}$) να απεικονίζει προσχέδια κάτω από στρώματα μιας σειράς σύγχρονων ακρυλικών μπλε χρωμάτων, επιβεβαιώνοντας τη δυναμική της για ορισμένα από αυτά (Striova et al., 2018).

Η OCT έχει χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση προσχεδίων και από περιοχές ιστορικών πινάκων, όπως των Ολλανδικών έργων των αρχών του 16^{ου} αιώνα “Arrest of Christ” (Adler et al., 2007) και “Magdalen” (Liang et al., 2007b) αλλά και του πίνακα του τέλους του 15^{ου} αιώνα που αποδίδεται στον Francesco Francia “Virgin and Child with an Angel” (Liang et al., 2008).



Εικόνα 5.11: (a) φωτογραφία, (b) εικόνα από CCD κάμερα της ανακλώμενης NIR ακτινοβολίας στην περιοχή των 880nm, (c) εικόνα από κάμερα InGaAs ευαίσθητη στο εύρος μηκών κύματος 900-1700nm, (d) η αντίστοιχη en-face απεικόνιση με σύστημα OCT ($\lambda_c=930\text{nm}$) του προσχεδίου από λεπτομέρεια του ματιού Αγγέλου από το έργο “Virgin and Child with an Angel” (Liang et al., 2008)

Η OCT, στο πλαίσιο μελέτης με μια ποικιλία τεχνικών, χρησιμοποιήθηκε, τέλος, για απεικόνιση με ευκρίνεια προσχεδίων από συλλογή Κινεζικών υδατογραφιών του πρώιμου 19^{ου} αιώνα βοτανολογικού θέματος που ανήκει στην Βρετανική Οργάνωση «Βασιλική Φυτολογική Κοινότητα» (Royal Horticultural Society- RHS) (Liang et al., 2014).

Επειδή τα περισσότερα χρώματα ιστορικών πινάκων παρουσιάζουν μειωμένη διαφάνεια για ακτινοβολία στην φασματική περιοχή των πηγών των τυπικών OCT συστημάτων, η εφαρμογή της για τον εντοπισμό προπαρασκευαστικών σχεδίων είναι ακόμα περιορισμένη. Όταν όμως η ακτινοβολία διερεύνησης κατορθώνει να φτάσει μέχρι το επίπεδο του ζωγραφικού υποβάθρου, οι OCT εικόνες που συλλέγονται είναι καλύτερης ευκρίνειας από αντίστοιχες της IR ανακλαστογραφίας, γι' αυτό και δίνεται έμφαση στην βελτιστοποίηση των πηγών OCT συστημάτων που εξειδικεύονται στους ζωγραφικούς πίνακες.

Τύπος Υλοποίησης της OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Ιδιαιτερότητα Υλικού	Αναφορές
En-face Td-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	1300		18-20	25	Προσχέδια κάτω από επιλεγμένα χρώματα σε δοκίμια	Liang et al., 2005a
Confocal Td-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	1550	100		2,5	Προσχέδια κάτω από ακρυλικά μπλε χρώματα σε δοκίμια	Striova et al., 2018
Swept source Fd-OCT	Buffered FDML laser	1287		9,3		Προσχέδιο στο έργο "Arrest of Christ"	Adler et al., 2007
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930	100	6	9	Προσχέδια σε δοκίμια, στα έργα "Magdalen", "Virgin and Child with an Angel"	Liang et al., 2007b, Liang et al., 2008
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930		~7	~9	Προσχέδια στα έργα "The Madonna and Child", "Virgin and Child with an Angel"	Liang et al., 2013

Πίνακας 5.3: Συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη προπαρασκευαστικών σκίτσων, συσχετισμένα με τους ιστορικούς πίνακες και τους τύπους πειραματικών δοκιμών στους οποίους κατόρθωσαν να εντοπίσουν προσχέδια. Τα συστήματα OCT παρουσιάζονται στον πίνακα, παραθέτοντας κάποιες από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους τους ως στοιχεία αναγνώρισης.

5.1.1.6 Μελέτη της Επίδρασης Μεταβολών της Υγρασίας στη Δομή των Πινάκων

Η OCT χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση των ρωγμών και επιφανειακών παραμορφώσεων που προέκυψαν λόγω διαφορετικής ανταπόκρισης των επιμέρους δομών δειγμάτων ζωγραφικών πινάκων, στην μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών φύλαξής τους. Για αυτή την εφαρμογή αξιοποιήθηκε η δυνατότητα καταγραφής από την OCT της διεπιφάνειας αέρα-πίνακα, με ικανοποιητική διακριτική ικανότητα, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εσωτερική δομή. Στο πλαίσιο πειραματικών δοκιμών, η OCT κατέγραψε διαδοχικά b-scans, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιοχή ρωγμής του δοκιμίου, συναρτήσει του χρόνου παραμονής σε συνθήκες αυξημένης ατμοσφαιρικής υγρασίας (Targowski et al., 2004), ενώ σαρώνοντας την επιφάνεια άλλου δείγματος παρακολούθησε, κατά την διάρκεια εργαστηριακά ρυθμιζόμενων κύκλων αύξησης της υγρασίας, τη μετατόπιση στις τρεις διαστάσεις επιλεγμένου σημείου ενδιαφέροντος (Targowski et al., 2006b).

5.1.2 Εφαρμογές της OCT σε αντικείμενα από γυαλί

Τα γυάλινα τεχνουργήματα ιστορικής σημασίας είναι αντικείμενα ιδιαίτερης ευαισθησίας, ακατάλληλα για μελέτη με τεχνικές που απαιτούν καταστροφικές επεμβάσεις και με την πάροδο του χρόνου υπόκεινται σε μια πληθώρα μηχανικών και χημικών φθορών. Αν και στα γυάλινα αντικείμενα οι φθορές μπορούν να διακριθούν με γυμνό μάτι, αναλυτικές μέθοδοι κρίνονται σε ορισμένες περιπτώσεις απαραίτητες για την ακριβή καταγραφή των χαρακτηριστικών δομών τους.

Κάποια από τα πιο κοινά προβλήματα συντήρησης των ιστορικών γυάλινων αντικειμένων οφείλονται στην διάβρωση που έχουν υποστεί, λόγω της επαφής τους με νερό. Η διάβρωση οδηγεί συχνά στην δημιουργία ενός επιφανειακού στρώματος αλλοιωμένης χημικής σύστασης με υπολογίσιμο πάχος το οποίο μπορεί να συγκρατεί νερό.

Μερικά παραδείγματα χρήσης της OCT για τη μελέτη αντικειμένων από γυαλί περιλαμβάνουν:

ΓΥΑΛΙ ΒΕΝΕΤΣΙΑΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΤΡΟΠΙΑΣ (Façon de Venise):

Στη μελέτη τμήματος γυάλινου αντικειμένου του 17ου αιώνα, απεικονίστηκε η κατανομή των περιοχών αλλοίωσης λόγω διάβρωσης μέσα στο γυαλί (Liang et al., 2007). Σε ένα θραύσμα μετα-μεσαιωνικού αγγείου της ίδιας τεχντροπίας, που ανασύρθηκε μετά από ανασκαφές σε υγρό περιβάλλον, διακρίθηκαν ασυνέχειες στην γυάλινη επιφάνεια, μικρορηγματώσεις, καθώς και εσωτερική, έντονα σκεδαστική διεπιφάνεια σε ένα οπτικό βάθος, λόγω, εν μέρει τουλάχιστον, αποκόλλησης του αλλοιωμένου στρώματος. Η OCT χρησιμοποιήθηκε επίσης για να μετρηθεί το πάχος του γυάλινου σώματος όταν οι περιορισμοί του συστήματος το επέτρεψαν, καθώς και το πάχος ξένων επικαθίσεων στη γυάλινη επιφάνεια (Kunicki-Goldfinger et al., 2009).

ΓΥΑΛΙΝΟ ΑΓΓΕΙΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ(Core-formed):

Η OCT εφαρμόστηκε στη μελέτη θραύσματος αγγείου κατασκευασμένου με την τεχνική του πυρήνα, όπου σε συνδυασμό με εικόνα μικροσκοπίου, μπόρεσε να παρουσιάσει τις διαφορετικές οπτικές ιδιότητες, κατανομή και αλληλουχία των γυάλινων στρώσεων διαφορετικών χρωματισμών που αποτελούν χαρακτηριστικό τέτοιου αντικειμένου (Liang et al., 2008).

ΑΙΓΥΠΤΙΑΚΟΣ ΓΥΑΛΙΝΟΣ ΣΚΑΡΑΒΑΙΟΣ

Με OCT, σε έναν αιγυπτιακό γυάλινο σκαραβαίο, απεικονίστηκε η επιφάνεια συγκόλλησης τμήματος που είχε αποκολληθεί από το κυρίως σώμα του γυάλινου αυτού τεχνουργήματος για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα προηγούμενης διεργασίας συντήρησης. Στη εικόνα διατομής διακρινόταν το αναμενόμενο διαβρωμένο στρώμα, τόσο στο επικολημένο θραύσμα όσο και στο κυρίως τμήμα του σκαραβαίου, μέτρηση που επέτρεψε την παρακολούθηση της εξέλιξης της διαδικασίας διάβρωσης (Liang et al., 2008).

ΓΥΑΛΙΝΑ ΦΛΑΟΥΤΑ

Τα φλάουτα του C. Laurent από την συλλογή Dayton C. Miller της Βιβλιοθήκης του Αμερικανικού Κογκρέσου είναι κυρίως κατασκευασμένα από εγγενώς ασταθές γυαλί και παρουσιάζουν έντονα σημάδια διάβρωσης. Πολλαπλές μετρήσεις OCT, στις εξωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες τους, έδωσαν εικόνα των μοτίβων διάβρωσης και ρηγματώσεων των διαφόρων εξαρτημάτων, βοηθώντας τους μελετητές να τα συσχετίσουν με τις συνθήκες καταπόνησης και φύλαξής τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι έντονα ανακλαστικές επιφάνειες των φλάουτων οδήγησαν στη δημιουργία ψευδών εικόνων στις εικόνες διατομής OCT, λόγω κορεσμού των ανιχνευτών ή ανακλάσεων από τα εσωτερικά οπτικά στοιχεία του συστήματος, περιπλέκοντας την ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Brostoff et al., 2019).

Εκτός της OCT, τα φλάουτα μελετήθηκαν και με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης με ανίχνευση απισθοσκέδασης ηλεκτρονίων (SEM-BSE) που είχε καλύτερη διακριτική ικανότητα και κατόρθωσε να διακρίνει στρώμα διάβρωσης ακόμη και κατά μήκος κάποιων ρηγματώσεων, όμως αυτή η τεχνική περιορίστηκε σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος και δεν απεικόνισε την ποικιλία στη δομή και τα χαρακτηριστικά του στρώματος αλλοίωσης που μπορεί να αποδώσει η OCT. (Brostoff et al., 2019).

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΑΠΟ ΣΤΑΘΕΡΟ ΓΥΑΛΙ:

Πράσινη φιάλη του ύστερου 18ου αιώνα που βρισκόταν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε θαλάσσιο περιβάλλον δεν παρουσίασε στις μετρήσεις με OCT αλλοιωμένο στρώμα, και θεωρώντας ότι αυτό ήταν μικρότερο της διακριτικής ικανότητας του οργάνου, τα αποτελέσματα ερμηνεύτηκαν ως ένδειξη της χημικής σταθερότητας του συγκεκριμένου γυαλιού. (Kunicki-Goldfinger et al., 2009)

Το γυαλί έχει χρησιμοποιηθεί ως βάση ή και δομικό στοιχείο ζωγραφικών παραστάσεων. Μερικά παραδείγματα τέτοιων τεχνουργημάτων που μελετήθηκαν με OCT είναι:

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΖΩΓΡΑΦΙΚΗ ΣΕ ΓΥΑΛΙ (Hinterglasmalerei):

Η OCT είναι σε θέση να εκτελέσει μετρήσεις πολύτιμες για την αξιολόγηση της κατάστασης συντήρησης τεχνουργημάτων αντίστροφης ζωγραφικής σε γυαλί, γνωστών με την γερμανική τους ονομασία ως Hinterglasmalerei, προορισμένων για παρατήρηση μέσω του ίδιου του γυάλινου πλακιδίου που έχει χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα της ζωγραφικής απεικόνισης.

Έχει χρησιμοποιηθεί για έλεγχο της πρόσφυσης των χρωμάτων στο γυαλί, απεικονίζοντας φουσκάλες στο χρωματικό στρώμα, νιφάδες χρώματος έτοιμες να αποκολληθούν καθώς και ενδείξεις στρώματος αέρα ανάμεσα στη ζωγραφική και το γυάλινο υπόστρωμα (Iwanicka et al., 2010, Targowski et al., 2019). Αν τα χρώματα που χρησιμοποιήθηκαν από τον καλλιτέχνη είναι διαφανή στην ακτινοβολία διερεύνησης της μεθόδου, η OCT μπορεί να δώσει εικόνα της διαστρωμάτωσης της ζωγραφικής απεικόνισης (Iwanicka et al., 2010, Targowski et al., 2019). Παρουσιάζοντας με λεπτομέρεια στοιχεία της δομής ζωγραφικού στοιχείου, έχει προσφέρει ερμηνείες για τα αίτια φθορών, όπως ο αποχρωματισμός (Iwanicka et al., 2010) και έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας προηγούμενων εργασιών συντήρησης, που περιελάμβαναν την ενοποίηση των αποκολλημένων χρωμάτων με χρήση συγκολλητικών ουσιών (Iwanicka et al., 2010). Τέλος, έχει δειχθεί ότι για συγκεκριμένα υλικά και μεθόδους συντήρησης, όπως αυτά επιλέχθηκαν κατά την διενέργεια πειραμάτων σε πρότυπα δείγματα Hinterglasmalerei, είναι δυνατή η παρακολούθηση με OCT της ίδιας της διαδικασίας ενοποίησης ώστε να ελέγχεται ο βαθμός επιτυχίας της (Iwanicka et al., 2011)

ENAMEL:

Ως enamel αναφέρονται πολλαπλά πολύχρωμα διαφανή ή ημιδιαφανή γυάλινα στρώματα εφαρμοσμένα πάνω σε μεταλλικό υπόστρωμα με διαδοχικές πυρακτώσεις. Σε εικόνες διατομών της OCT απεικονίστηκαν επιφανειακές ρωγμές και το αλλοιωμένο στρώμα ενός Limoges enamel ενώ en-face απεικόνιση επιπέδου αμέσως κάτω από την γυάλινη επιφάνεια και παράλληλου σε αυτήν παρουσίασε το σύνθετο δίκτυο δομών του διαβρωμένου αυτού στρώματος πιο καθαρά (Thickett et al., 2017). Συνδυάζοντας την OCT με χαρτογράφηση μέσω SWIR φασματικής απεικόνισης (Shortwave Infrared, SWIR) της ενυδάτωσης ενός έργου με Limoges enamel, όσο πιο ενυδατωμένη ήταν μια περιοχή, τόσο περισσότερες οι επικαθίσεις και τόσο εντονότερη η ρηγμάτωση του διαβρωμένου στρώματος που αποτυπώθηκαν στις εικόνες OCT (Read et al., 2019). Η OCT εφαρμόστηκε επίσης ως συμπληρωματική τεχνική της XRF σε ζωγραφιστή enamel, ώστε να καταστεί δυνατή η αντιστοίχιση των XRF μετρήσεων με το σωστό στρώμα του αντικειμένου (Liang et al., 2008).

ΥΑΛΟΓΡΑΦΙΑ:

Η OCT είναι πολύ χρήσιμη στην μελέτη υαλογραφιών, όπου κάθε πλευρά ενός πλακιδίου βιτρό παρουσιάζει διαφορετική εικόνα διάβρωσης, ανάλογα με το αν ήταν εκτεθειμένη στις εξωτερικές καιρικές συνθήκες ή στην υγρασία του εσωτερικού της εκκλησίας (Kunicki- Goldfinger et al., 2009)

Σε OCT εικόνα πλακιδίων βιτρό διακρίθηκαν κοιλότητες και αποκολλημένες φλοίδες έτοιμες να απομακρυνθούν, αποτέλεσμα της αποδόμησης λόγω διάβρωσης, και κάτω από αυτές το αλλοιωμένο στρώμα ως σύνολο περιοχών με κυμαινόμενη σκέδαση και ρηγματώσεις (Rouba et al., 2008, Kunicki-Goldfinger et al., 2009).

Αν και θα ήταν επιθυμητό το όριο μεταξύ του αλλοιωμένου και του υγιούς γυαλιού να αποδίδεται με μια συνεχόμενη ευκρινή καμπύλη, λόγω της διαφοράς στους δείκτες διάθλασης κάτι τέτοιο δεν ήταν ορατό στις OCT μετρήσεις. Ήταν όμως δυνατό στις μετρήσεις SEM με BSE σε επιλεγμένα σημεία του ίδιου αντικειμένου, αφού αυτό που ανιχνεύεται είναι οι διαφορές στη χημική σύσταση (Kunicki-Goldfinger et al., 2009).

Στην περίπτωση επιφανειακών δομών του γυαλιού, όπως χρωματικά ή διαβρωμένα στρώματα, που δεν ήταν δυνατή η απεικόνιση του συνόλου τους με μια μόνο μέτρηση, λόγω έντονης σκέδασης ή απορρόφησης, η OCT εφαρμόστηκε με την ακτινοβολία να προσπίπτει τόσο από την ελεύθερη επιφάνεια όσο και μέσω του γυάλινου σώματος, λαμβάνοντας υπόψη τις απαραίτητες διορθώσεις (Targowski et al., 2008, Targowski et al., 2012)

Ακολουθεί πίνακας με συστήματα OCT που έχουν χρησιμοποιηθεί για την διάγνωση της κατάστασης συντήρησης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς από γυαλί

Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Ιδιαιτερότητα Υλικού	Αναφορές
Fd-OCT (Spectral OCT)	Πηγή Υπερφωταύγειας	870	190			Υαλογραφία	Targowski et al., 2008
Fd-OCT (Spectral OCT)	Πηγή Υπερφωταύγειας	845	50			Υαλογραφία, Αρχαιολογικό Γυαλί	Rouba et al., 2008
Fd-OCT (Spectral OCT)-Thorlabs SROCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930	100	~6	~9	Αρχαιολογικό Γυαλί, Enamel, Γυαλί με την Τεχνική του Πυρήνα	Liang et al., 2008
Fd-OCT (Spectral OCT)	Πηγή Υπερφωταύγειας	830	50	14		Υαλογραφία, Γυαλί Βενετσιάνικης Τεχνοτροπίας, Ιστορικό Γυαλί	Kunicki-Goldfinger et al., 2009
Fd-OCT (Spectral OCT)	Πηγή Υπερφωταύγειας	845	107	4	30	Hinterglasmalerei	Iwanicka et al., 2010, Iwanicka et al., 2011
Fd-OCT	Πηγή Υπερσυνεχούς Φάσματος	810	~200	1,8	7	Enamel	Thickett et al., 2017, Read et al., 2019
Fd-OCT (Spectral OCT)-Thorlabs Ganymede ii	Πηγή Υπερφωταύγειας	930	~100	4-6	6	Γυάλινα Φλάουτα	Brostoff et al., 2019

Πίνακας 5.4: Συστήματα OCT που έχουν χρησιμοποιηθεί στην μελέτη γυάλινων αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς και ο τύπος των έργων που μελέτησε καθένα από αυτά.

5.1.3 Εφαρμογές της OCT σε κεραμικά αντικείμενα

Ορισμένα παραδείγματα κεραμικών αντικειμένων που μελετήθηκαν με OCT είναι τα εξής:

ΠΟΡΣΕΛΑΝΗ

Η OCT ήταν σε θέση να απεικονίσει το υάλωμα πορσελάνινου κύπελου αλλά και δομικές ιδιαιτερότητες του ίδιου του σώματος του δοχείου (Targowski et al., 2004).

ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΙΝΕΖΙΚΑ ΣΚΕΥΗ

Η OCT χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη της εσωτερικής δομής παραδοσιακών κινεζικών υαλωμάτων ιστορικών κεραμικών σκευών. Ήταν ικανή να απεικονίσει τις διαφορετικές φάσεις των επικαλύψεων των κεραμικών, οι οποίες αποδίδονταν στις εικόνες διατομής OCT ως περιοχές με διαφορετική ένταση οπισθοσκέδασης, αλλά και να παρουσιάσει τις ρηγματώσεις και τις φυσαλίδες αέρα, η μορφή, το μέγεθος και η πυκνότητα των οποίων ακολουθούσαν διαφορετικά μοτίβα ανάλογα με τη δομή του περιβάλλοντος υλικού. (Yang et al., 2009, Yang et al., 2012, Yang et al., 2012b) Επιπλέον, οι παρατηρήσεις με OCT κατόρθωσαν να καταδείξουν μέσα στο σώμα του υαλώματος τους κόκκους ενώσεων που προστίθενται για χρωματισμό είτε, όπως στις ενώσεις χαλκού, λόγω της διαφοράς στο δείκτη διάθλασης ανάμεσα σε αυτές και το υλικό του υαλώματος, είτε, όπως στον χαλαζία, εμμέσως με την παρατήρηση ρωγμών στα όριά τους, συσχετίζοντας το μέγεθος και την ποσότητά τους με την εμφάνιση την οποία προσδίδουν στο στρώμα της επικάλυψης. (Yang et al., 2015)

ΔΙΑΚΟΣΜΗΤΙΚΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΠΛΑΚΙΔΙΑ

Η OCT ήταν σε θέση να καταγράψει το πάχος, τις φυσαλίδες, αποτελέσματα φθοράς και επιφανειακές επικαθίσεις του υαλώματος ανάγλυφου κεραμικού πλακιδίου (Iwanicka et al., 2018), καθώς και τη διαστρωμάτωση του υαλώματος περσικού ζωγραφιστού κεραμικού πλακιδίου του 19ου αιώνα, συσχετίζοντας τα αποτελέσματα στοιχειομετρικής ανάλυσης με micro-XRF στα διάφορα στρώματα της επικάλυψης (Liang et al., 2008)

ΑΙΓΥΠΤΙΑΚΗ ΦΑΓΕΝΤΙΑΝΗ

Η Αιγυπτιακή φαγεντιανή είναι ένα κεραμικό από πυροσυσσωματωμένο χαλαζία που περιβάλλεται από ένα στιλπνό επίχρισμα μιας ποικιλίας αποχρώσεων. Στα αντικείμενα από αιγυπτιακή φαγεντιανή, η OCT ήταν ικανή να απεικονίσει το στρώμα του υαλώματος με τις πιθανές φθορές του και ένα μέρος του υποκείμενου στρώματος αλληλεπίδρασης υαλώματος-πυρήνα, όταν αυτά δεν περιέχουν πρόσθετα έντονα σκεδαστικά σωματίδια, χωρίς όμως να απεικονίσει τον πυρήνα από χαλαζία. (Liang et al., 2012)

OCT ΣΕ ΚΕΡΑΜΙΚΟ ΣΩΜΑ

Αξίζει να αναφερθεί μια προσπάθεια επέκτασης της τεχνικής και στο κυρίως κεραμικό σώμα σκευών. Το εμπόδιο είναι η έντονη σκέδαση της NIR ακτινοβολίας που χρησιμοποιεί η πλειονότητα των συστημάτων OCT, περιορίζοντας το βάθος διείσδυσης. Η κατασκευή συστήματος OCT με πηγή στο μέσο υπέρυθρο (mid-IR) και σύστημα πυροηλεκτρικών ανιχνευτών κατέστησε δυνατή την απεικόνιση ανάγλυφου σχεδίου στην οπίσθια όψη δείγματος πορώδους αλουμίνας πάχους μερικών εκατοντάδων μm, καθώς και της εσωτερικής δομής μέχρι ένα μικρό βάθος παραδοσιακού αυστριακού κεραμικού γνωστής επωνυμίας (Zorin et al., 2019)

Τύπος Συστήματος	τύπος πηγής	Κεντρικό μήκος κύματος (μm)	Εύρος ζώνης (nm)	Εύρος μήκους κύματος (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Αντικείμενο παρατήρησης	αναφορές
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	0,930	~100		~6	~9	Περσικό πλακίδιο	Liang et al., 2008
Td-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	0,890	150			10	Υαλώματα κεραμικών	Yang et al., 2009
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	0,930	100		~6	~9	Υαλώματα κεραμικών	Yang et al., 2012
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	0,890	150				Υαλώματα κεραμικών	Yang et al., 2012
Focus-tracking TdOCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	0,855	100		4-5,0		Υαλώματα κεραμικών	Yang et al., 2012
Focus-tracking TdOCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	0,855	100		~3-4		Υαλώματα κεραμικών	Yang et al., 2012b
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	0,930	~100		6,5	~9	Αιγυπτιακή φαγιεντιανή	Liang et al., 2012
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	0,930	100		6,0	9	Υαλώματα κεραμικών	Yang et al., 2015
Focus-tracking TdOCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	0,855	100		4,0-5,0		Υαλώματα κεραμικών	Yang et al., 2015
Spectral OCT				770-970		15	Υαλωμένα κεραμικά πλακίδια	Iwanicka et al., 2017b
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας			770-970		13	Υαλωμένα κεραμικά πλακίδια	Iwanicka et al., 2018
Spectral OCT	Πηγή Υπερσυνεχούς Φάσματος	4			35		Κεραμικό	Zorin et al., 2019

Πίνακας 5.5: Συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη κεραμικών αντικειμένων και ο τύπος των δομών που απεικόνισε καθένα από αυτά.

5.1.4 Εφαρμογές της OCT σε αντικείμενα από ίασπι

Ο ίασπις (jade) είναι ένας ημιπολύτιμος λίθος που συναντάται σε δύο τύπους, τον νεφρίτη και τον ιαδεΐτη. Πρόκειται για ένα ημιδιαφανές ορυκτό, με πλούσια εσωτερική δομή, διακριτή μέχρι κάποιο βάθος που αποτελεί σημαντικό στοιχείο της ασιατικής τέχνης. Ιδιαίτερα ο νεφρίτης έχει χρησιμοποιηθεί ως υλικό εργαλείων και τεχνουργημάτων από την Νεολιθική περίοδο. Η OCT είναι ικανή να απεικονίσει την διαφοροποίηση μεταξύ της εσωτερικής δομής του ίασπι που δεν έχει αλλοιωθεί λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών και είναι ημιδιαφανής στην ακτινοβολία διερεύνησης και εκείνου που έχει υποστεί μια μορφή γήρανσης της επονομαζόμενης ‘λεύκανσης’, η οποία κάνει εντονότερη την σκέδαση και αλλάζει την εμφάνιση του προς μια πιο λευκή απόχρωση (Yang et al., 2004, Liang et al., 2008).

Με την ίδια τεχνική κατέστη δυνατή η διάκριση μεταξύ της εσωτερικής δομής αντικειμένων από ίασπι που ανασύρθηκαν από αρχαιολογικές ανασκαφές, έχοντας περιοχές τους υποστεί διαφόρων βαθμών φυσική λεύκανση, καθώς και άλλων που υποβλήθηκαν σε τεχνητή λεύκανση με πυράκτωση. Η OCT προτάθηκε, έτσι, ως μια μέθοδος ελέγχου της αυθεντικότητας τέτοιου τύπου αρχαιολογικών αντικειμένων. (Yang et al., 2004) Η OCT χρησιμοποιήθηκε, επίσης, για την απεικόνιση δομικών φθορών και κατόρθωσε να αποδώσει τη δομή και το δίκτυο τόσο γραμμικών ρωγμών με ανοίγματα στον αέρα όσο και εκείνων που εμφανίζονται σε συστάδες στο εσωτερικό του ίασπι. (Yang et al., 2012)

Τέλος προτάθηκαν, μέσω στατιστικής ανάλυσης των OCT εικόνων διατομής, μέθοδοι ταυτοποίησης ίασπι ανάμεσα στα άλλα υλικά ενός ιστορικού αντικειμένου αλλά και ποσοτικής περιγραφής των διαφόρων υφών της πλούσιας εσωτερικής του δομής (Chang et al., 2010)

Ακολουθεί πίνακας με συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση στοιχείων της εσωτερικής δομής αντικειμένων από ίασπι.

Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Αναφορές
Td-OCT	Mode-locked Ti:Sapphire LASER	~800	50		5	Yang et al., 2004
Td-OCT	Cr:forsteite LASER	~1240	65		5	Yang et al., 2004
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930	~100	~6	~9	Liang et al., 2008, Yang et al., 2012
Swept Source OCT	Commercially available swept LASER	~1320		~7		Chang et al., 2010
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	890	150			Yang et al., 2012
Focus-tracking Td-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	855	100	4-5,0		Yang et al., 2012

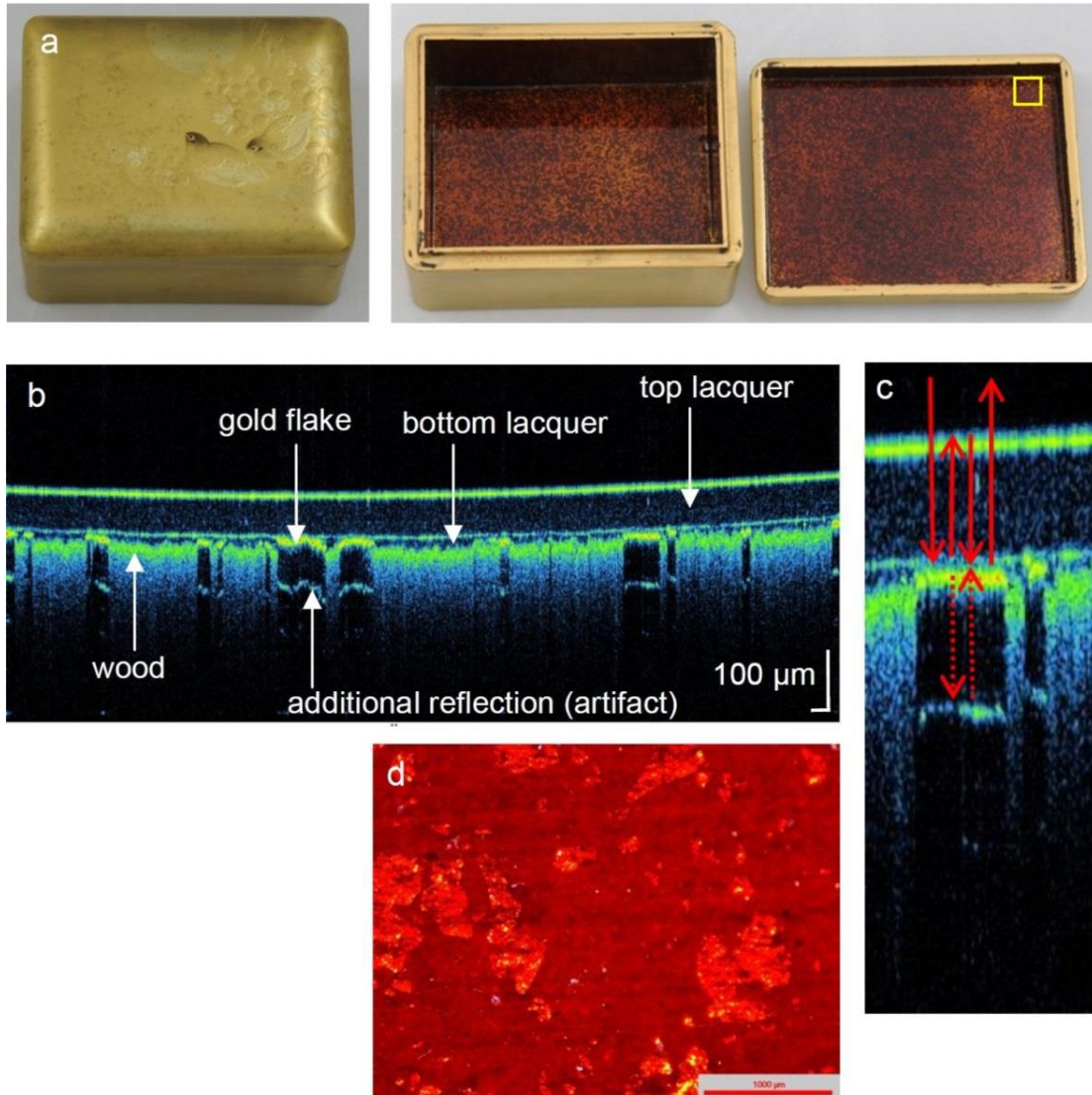
Πίνακας 5.6: Συστήματα OCT που έχουν χρησιμοποιηθεί στη μελέτη αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς από ίασπι.

Εφαρμογές της OCT σε ξύλινα έργα τέχνης

Η OCT έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην απεικόνιση των επιφανειακών χαρακτηριστικών δομών και στρωμάτων του ξύλινου κορμού μουσικών οργάνων και λοιπών έργων τέχνης από ξύλο. Οι τρόποι επεξεργασίας του ξύλου, που χρησιμοποιούσαν οι κατασκευαστές ιστορικών εγχόρδων οργάνων για τα περίφημα βιολιά τους ανάμεσα στον 16^ο και 18^ο αιώνα, αποτελούν αντικείμενο εκτεταμένων σύγχρονων ερευνών στο πλαίσιο των οποίων έχει δοκιμαστεί και η OCT. Σε δοκίμια κατασκευασμένα σύμφωνα με τις παραδοσιακές τεχνικές, η OCT κατόρθωσε να απεικονίσει τα στρώματα προετοιμασίας και τα σωματίδια στυπτηρίας και γύψου που περιείχαν καθώς και τις στρώσεις βερνικιών με τα σωματίδια χρωστικών ουσιών να διακρίνονται όταν η ακτινοβολία διερεύνησης ήταν στην περιοχή του ορατού φάσματος (Latour et al., 2009). Τα στρώματα προετοιμασίας και προστατευτικής επικάλυψης ήταν διακριτά με OCT και σε θραύσματα από συλλογή εγχόρδων ιστορικής σημασίας (Fiocco et al., 2019) αλλά και σε βιολί του 18^{ου} αιώνα (Latour et al., 2009b) ενώ υπήρχαν και ενδείξεις, στις εικόνες OCT, κόκκων, εμβαπτισμένων σε αυτά υλικών που είχαν ανιχνευτεί προηγουμένως με άλλες τεχνικές. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις ήταν ορατές μέχρι και οι ίνες του υποκείμενου ξύλου (Latour et al., 2009, Latour et al., 2009b, Fiocco et al., 2019). Η τεχνική χρησιμοποιήθηκε μόνη της για την απεικόνιση της κατάστασης των προστατευτικών στρωμάτων και της διείδυσής τους στο σώμα του υποκείμενου ξύλου αλλά και σε συνδυασμό με τη μέθοδο υπερφασματικής απεικόνισης για την υλοποίηση χαρτογράφησης του πάχους μονού επιφανειακού στρώματος με μεγάλη ταχύτητα (Dingemans et al., 2015).

Η OCT επιστρατεύτηκε για τη μελέτη ξύλινου βάζου της δεκαετίας του 1970 διακοσμημένου με την τεχνική της *intarsia*, με ένθεση δηλαδή στην επιφάνειά του κομματιών διαφορετικών ξύλων μιας ποικιλίας σχεδίων. Με την OCT, εκτός από την καταγραφή των λεπτομερειών του περίτεχνου αυτού είδους διακόσμησης, ήταν δυνατή η απεικόνιση των περιοχών και των υλικών συγκόλλησης των ένθετων στοιχείων καθώς και των φθορών του στρώματος βερνικιού και των δομικών μεταβολών που υπέστη με τον χρόνο το ξύλο (Gurov et al., 2019).

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη ξύλινου κουτιού του 19^{ου}/ 20^{ου} αιώνα από την Ιαπωνία με επικάλυψη που ακολουθούσε την τεχνική *nashiji*, όπου κομμάτια φύλλων μετάλλων, συνήθως χρυσού, τοποθετούνται ανάμεσα σε διαδοχικά στρώματα βερνικιών.



Εικόνα 5.12 : Στο b-scan φαίνεται η θέση και το μέγεθος του φύλλου χρυσού (gold flake) ανάμεσα στο ανώτατο (top lacquer) και το κατώτερο στρώμα βερνικιού (bottom lacquer) (Iwanicka et al., 2018).

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, μεγάλο μέρος της ανακλώμενης από το φύλλο χρυσού ακτινοβολίας OCT πραγματοποιεί εσωτερική ανάκλαση στην διεπιφάνεια βερνικιού-αέρα και ανακλάται πάλι από τον χρυσό δημιουργώντας μια ψευδή εικόνα επιφάνειας που βρίσκεται κάτω από το φύλλο σε οπτικό βάθος ίσο με το οπτικό πάχος του ανώτατου βερνικιού (Iwanicka et al., 2018).

Ακολουθεί πίνακας με συστήματα που έχουν χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση στρωμάτων επικαλύψεων και της υποκείμενης ξύλινης επιφάνειας αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με βάση το ξύλο.

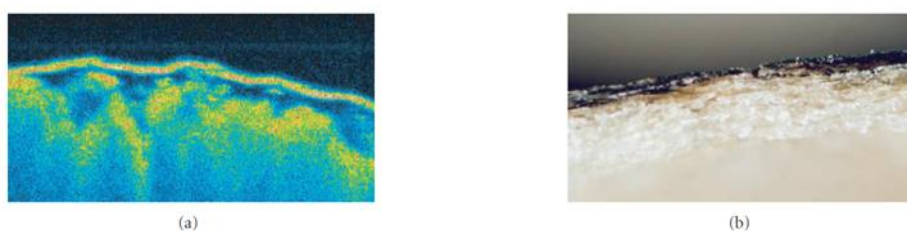
Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Εύρος μήκους κύματος (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Αναφορές
Full-Field Td-OCT	Halogen Lamp Coupled with Köhler Illumination Device & Spectral Filter	645	115		2	1,5	Latour et al., 2009
Full-Field Td-OCT	Halogen Lamp Coupled with Köhler Illumination Device & Spectral Filter	755	150		2,4	1,9	Latour et al., 2009
Full-Field Td-OCT	Halogen Lamp Coupled with Köhler Illumination Device	630	150		1,5	1	Latour et al., 2009b
Td-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	1550	60				Dingemans et al., 2015
Fd-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	1550	60				Dingemans et al., 2015
Fd-OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας			770-970	3	13	Iwanicka et al., 2018
Swept Source OCT/ OCM	Swept Source LASER	1310					Gurov et al., 2019
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας		750-930		~3	15	Fiocco et al., 2019

Πίνακας 5.7: Συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη ξύλινων αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

5.1.5 Εφαρμογές της OCT σε άλλα υλικά

Εφαρμογές της OCT στην μελέτη πολιτιστικών αντικειμένων που είχαν ως βάση τους δέρματα ζώων.

Η OCT χρησιμοποιήθηκε στη καταγραφή της ιδιαίτερα ευαίσθητης επιφάνειας του δερμάτινου εξώφυλλου της Βίβλου που ανακαλύφθηκε σε έλος του Fadden More στην Ιρλανδία. Τα ανάγλυφα σχέδια που είχαν χαραχτεί φάνηκαν καθαρότερα απ' ότι με οπτική παρατήρηση, ήταν δυνατή η μέτρηση του βάθους και πλάτους των σκαλισμάτων ενώ διακρίνονταν τα τριχοθυλάκια του δέρματος καθώς και υπολείμματα υλικού επικάλυψης που παρουσίαζε απορρόφηση της ακτινοβολίας διερεύνησης (Liang, 2011).



Εικόνα 5.13: Εικόνα διατομής OCT, τεχνητά γηρασμένης περγαμηνής, καλυμμένης με μελάνι σιδήρου- χολής (a) και η αντίστοιχη φωτογραφία διατομής τμήματος αφαιρεμένου από την ίδια περιοχή (b) (Targowski et al., 2006).

Η περγαμηνή αποτελούσε για αιώνες υλικό γραφής χειρογράφων και ήταν αποτέλεσμα ειδικής κατεργασίας δερμάτων ζώων. Η OCT ήταν ικανή να απεικονίσει την εσωτερική δομή περγαμηνής, καθώς και ενδείξεις αλλοίωσης της επιφάνειας της κάτω από στρώμα μελανιού σιδήρου- χολής (iron- gall ink), λόγω της διαφάνειας του τελευταίου στην ακτινοβολία διερεύνησης. Μελετώντας δείγματα σύγχρονης περγαμηνής με σύστημα Polarization Sensitive OCT, παρατηρήθηκε διπλοθλαστικότητα, η οποία εξασθένησε με την υποβολή τους σε τεχνητή γήρανση και απουσίαζε από μετρήσεις σε ιστορικά δείγματα (Gora et al., 2006)

Με την τεχνική μελετήθηκαν και τα υλικά εικονογράφησης ιστορημένου χειρόγραφου ψαλτικής του τέλους του 16^{ου} αιώνα. Παρατηρήθηκε το πάχος και φθορές του στρώματος μελάνης σιδήρου- χολής και οι στρώσεις smalt. Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι τα στρώματα από smalt στο συγκεκριμένο έργο έδιναν διαφορετική εικόνα OCT από αυτή πρότυπου δείγματος χρώματος με σκόνη γυαλιού κοβαλτίου, οδηγώντας στο συμπέρασμα ύπαρξης πρόσθετων συστατικών τα οποία κλήθηκε να αναγνωρίσει η macro-XRF (Targowski et al., 2015).

Ακολουθεί πίνακας με συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με βάση τα δέρματα ζώων.

Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Εύρος μήκους κύματος (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Ιδιαιτερότητα Υλικού	Αναφορές
Spectral OCT		930			6	9	Δερμάτινο εξώφυλλο Βίβλου του Fadden More	Liang, 2011
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	835	50			15	Περγαμινή και iron-gall ink	Gora et al., 2006
Td-OCT Polarization Sensitive	Πηγή Υπερφωταύγειας	1310	55				Περγαμινή	Gora et al., 2006
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας			770-790	3	13	Ιστορημένο χειρόγραφο	Targowski et al., 2015

Πίνακας 5.8: Συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με βάση το δέρμα.

Εφαρμογή της OCT σε πέτρινα μνημεία

Η OCT έχει αποτελέσει μια από τις τεχνικές με τις οποίες μελετήθηκαν μια σειρά από πέτρινα μνημεία στην Αγγλία από πορώδη υλικά όπως ο ψαμμίτης (sandstone), ώστε να εκτιμηθεί το πόσο ευάλωτα είναι στις επιδράσεις του περιβάλλοντος. Η πλειονότητα των φθορών στις οποίες υπόκεινται τα πέτρινα μνημεία οφείλονται κατά κάποιο τρόπο στην επαφή τους με νερό. Μετρώντας τον βαθμό στον οποίο μπορεί να συγκερατεί και να διευκολύνει την κίνηση του νερού μια πορώδης επιφάνεια, μπορούν να εντοπιστούν οι δομές που είναι επιρρεπείς σε αλλοιώσεις έτσι ώστε αυτές να προστατευτούν εγκαίρως.

Η OCT έχει την ικανότητα να απεικονίσει την επιφάνεια και την δομή μέχρι ένα βάθος τέτοιων υλικών και έτσι μπορεί να εκτιμηθεί η κατανομή μεγέθους των κόκκων που τα αποτελούν. (Bemand et al., 2011, Bemand et al., 2014)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος με τον οποίο ερευνητές εκμεταλλεύτηκαν την OCT για πειραματικές μετρήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας των πέτρινων επιφανειών. Η διαφορά μεταξύ των δεικτών διάθλασης ψαμμίτη και νερού είναι μικρότερη από αυτή μεταξύ των δεικτών διάθλασης ψαμμίτη και αέρα. Η ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια για παράδειγμα του ψαμμίτη που είναι σε επαφή με νερό είναι μικρότερη από ότι όταν αυτή είναι στεγνή. Κατά την πειραματική διαβροχή επομένως πέτρινου στοιχείου, καθώς το νερό αντικαθιστά τον αέρα στους πόρους του υλικού, μεταβάλλεται η εικόνα διατομής της OCT και μπορεί να εκτιμηθεί η θέση του μετώπου διαβροχής και κατ' επέκταση η ταχύτητα με την οποία αυτό κινείται για καθορισμένο ρυθμό προσρόφησης νερού. (Bemand et al., 2013, Bemand et al., 2014)

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για τις παραπάνω μελέτες

Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Αναφορές
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930	100	6,5	9	Bemand et al., 2013, Bemand et al., 2014

Πίνακας 5.9: Σύστημα OCT που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη πέτρινων μνημείων

Εφαρμογή της OCT σε τοιχογραφίες

Η OCT χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη αναγκών απεικόνισης σε διάφορους τύπους τοιχογραφιών.

Σε τοιχογραφία του 14^{ου} αιώνα στον Πύργο του Λονδίνου, η OCT υπέδειξε ότι λεπτομέρειες της εικόνας ήταν ζωγραφισμένες πάνω σε χρωματικό στρώμα με βερνίκι, παρατήρηση που συνδυάστηκε με τα συμπεράσματα των μετρήσεων της Υπερφασματικής Απεικόνισης (hyperspectral imaging) (Liang et al., 2011b).

Η OCT ήταν σε θέση να απεικονίσει την κατανομή του πάχους στρώματος οξαλικού ασβεστίου που είχε αναπτυχθεί στην επιφάνεια αλλοιωμένης τοιχογραφίας του 16^{ου} αιώνα, η οποία είχε αποκολληθεί από το Sanserpolcro (Τοσκάνη, Ιταλία) το 1950 (Striova et al., 2016). Το οξαλικό ασβέστιο και οι ουσίες που αυτό συγκρατεί υποβαθμίζουν την υποκείμενη ζωγραφική απεικόνιση και η γνώση του πάχους του βοηθά τις διαδικασίες καθαρισμού που απαιτεί η συντήρηση των έργων τέχνης.

Η τεχνική αποδείχτηκε ιδιαίτερα χρήσιμη στην διάγνωση της κατάστασης συντήρησης τοιχογραφιών αρχαίων κινεζικών τάφων, τουλάχιστον 1300 ετών, οι οποίες δεν διέθεταν κάποιου είδους προστατευτική επικάλυψη. Κατόρθωσε να απεικονίσει τα στρώματα προετοιμασίας και χρώματος, καθώς και μια ποικιλία φθορών που είχαν υποστεί όπως ρηγματώσεις, αποκολλήσεις και ανάπτυξη μούχλας. Σε κάποια σημεία σε en-face εικόνες OCT ήταν διακριτά και κάποια προσχέδια (Tong et al., 2019).

Τέλος, επιχειρήθηκε η απεικόνιση με OCT των δομών των μεταλλικών σαπώνων που οφείλονται στις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε χρωματικά στρώματα. Μελετώντας την διατομή τμημάτων που αφαιρέθηκαν από τοιχογραφίες, η OCT δεν ήταν επαρκής ως τεχνική για την ταυτοποίηση τέτοιου τύπου στοιχείων αλλοίωσης των ζωγραφικών απεικονίσεων (Vichi et al., 2019).

Ακολουθεί πίνακας με συστήματα OCT που επιστρατεύτηκαν για την μελέτη τοιχογραφιών.

Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Αντικείμενο μελέτης	Αναφορές
Spectral OCT		930		~6,5	~9	Μεσαιωνική τοιχογραφία στον Πύργο του Λονδίνου που απεικονίζει σιηνή σταύρωση.	Liang et al., 2011b
Confocal Td-OCT		1550	100		~2,5	Στρώμα οξαλικού ασβεστίου σε τοιχογραφία	Striova et al., 2016
Spectral OCT	Πηγή Υπερσυνεχούς Φάσματος	810	200	1,8	7	Προσπάθεια απεικόνισης μεταλλικών σαπώνων στα στρώματα τοιχογραφιών	Vichi et al., 2019
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930	48	7	8	Τοιχογραφίες από τους τάφους της δυναστείας των Tang	Tong et al., 2019

Πίνακας 5.10: Συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη τοιχογραφιών

Εφαρμογή της OCT στη μελέτη χάρτινων αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

Η OCT είναι σε θέση να εξάγει πληροφορίες για το μέγεθος των ινών του χαρτιού και τις ιδιότητες σκέδασης του που χαρακτηρίζουν τον τρόπο δημιουργίας του (Liang et al., 2014, Kogou et al., 2015) και μπορούν να βοηθήσουν στην εύρεση της προέλευσής του. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις OCT του χάρτινου υποστρώματος ιστορικών υδατογραφιών, όπου συγκρίθηκαν en-face εικόνες των ανώτατων επιπέδων των χαρτιών και γραφικές παραστάσεις της μέσης έντασης της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας συναρτήσει του βάθους, με αντίστοιχες μετρήσεις χάρτινων προτύπων γνωστής προέλευσης (Kogou et al., 2015). Η OCT επίσης χρησιμοποιήθηκε για να ελεγχθεί η ύπαρξη διαφανούς επικάλυψης στον επονομαζόμενο χάρτη της Κίνας του Selden, των αρχών του 17^{ου} αιώνα, στρώμα το οποίο ωστόσο δεν ανιχνεύτηκε με σύστημα OCT υψηλής αξονικής διακριτικής ικανότητας 1,8 μικρομέτρων (Kogou et al., 2016). Στον ίδιο χάρτη, περιοχή χαρτιού με ζωγραφική απεικόνιση έδινε διαφορετική εικόνα διατομής OCT από άλλη που ήταν γυμνή.

Ακολουθεί πίνακας με συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη χαρτιών ιστορικής σημασίας.

Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Αναφορές
Spectral OCT		930	100	~7	~9	Kogou et al., 2015
Spectral OCT	Πηγή Υπερσυνεχούς Φάσματος	810	200	1,8	7	Kogou et al., 2016

Πίνακας 5.11: Συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη χάρτινων αντικειμένων

Εφαρμογή της OCT στην απεικόνιση σημαδιών εργαλείων

Στην πρώιμη ιταλική αναγέννηση, για τη διακόσμηση επιχρυσωμένων λεπτομερειών μερικές φορές χρησιμοποιούταν το punchwork, σημάδια που δημιουργούσε ο ζωγράφος πιέζοντας πάνω στο φύλλο χρυσού εργαλεία τα οποία άφηναν χαρακτηριστικά ανάγλυφα σχέδια. Η OCT ήταν σε θέση να καταγράψει σε τρεις διαστάσεις την δομή της επιχρυσωμένης επιφάνειας και να αναγνωρίσει τα σημάδια των χρησιμοποιούμενων εργαλείων, τόσο κάτω από στρώμα γηρασμένου βερνικιού σε ιστορικό πίνακα του 14^{ου} αιώνα, όσο και σε γυμνή χρυσή διακόσμηση πίνακα του 20^{ου} αιώνα που κατασκευάστηκε ακολουθώντας την ίδια τεχνοτροπία (Adler et al., 2007). Λόγω της μεγάλης διακριτικής ικανότητας με την οποία καταγράφει τις κατακόρυφες διακυμάνσεις της επιφάνειας ενός αντικειμένου, η OCT ήταν μια από τις τεχνικές εξέτασης των λεπτομερειών εγχάραξης που κοσμούσαν προϊστορικά οστέινα κοσμήματα (Osipowicz et al., 2020) και το εξώφυλλο της Βίβλου που βρέθηκε σε έλος του Fadden More (Liang, 2011), ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την μορφή των εργαλείων που τις δημιούργησαν.

Ακολουθεί πίνακας με συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση σημαδιών εργαλείων που κοσμούν επιφάνειες αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Εύρος μήκους κύματος (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Ιδιαιτερότητα Υλικού	Αναφορές
Swept Source OCT/ OCM	Buffered FDML LASER	1287			9,3		Punchwork σε χρυσό	Adler et al., 2007
	Πηγή Υπερφωταύγειας			770-970	3,3	12	Σημάδια σε κοσμήματα	Osipowicz et al., 2020
Spectral OCT		930			6	9	Σημάδια σε δέρμα	Liang, 2011

Πίνακας 5.12: Συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση σημαδιών εργαλείων που κοσμούν επιφάνειες αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

Εφαρμογή της OCT στη μελέτη μεταλλικών μνημείων

Σε μετρήσεις που έγιναν σε δείγματα που προετοιμάστηκαν στο εργαστήριο, με την OCT μετρήθηκε το πάχος πιθανής διαφανούς προστατευτικής επικάλυψης μεταλλικών έργων τέχνης (στρώματα Palaroid B48N) και διακρίθηκαν περιοχές με διαφορετικού είδους διάβρωση (Lenz et al., 2017).

Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Αναφορές
Spectral OCT	Πηγή Υπερφωταύγειας	930	154	6	8	#113

Πίνακας 5.13: Σύστημα OCT που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη πιθανής επικάλυψης μεταλλικών μνημείων

Τεχνικές με τις οποίες συνδυάστηκε η OCT στο πλαίσιο της μελέτης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

5.2.1 Εφαρμογή OCT στην επίβλεψη διαδικασιών καθαρισμού αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

Πέρα από την άμεση ανάγκη προστασίας της ακεραιότητας των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς, υπάρχει και η επιθυμία διατήρησης της αρχικής τους εικόνας ώστε αυτή να αντικατοπτρίζει την πρόθεση και αισθητική του δημιουργού τους. Έτσι η απομάκρυνση ξένων επικαθίσεων, αλλοιωμένων στοιχείων της δομής τους, καθώς και η αντιστροφή μεταγενέστερων επίσημων επεμβάσεων, αποτελούν συχνά κομμάτι των εργασιών συντήρησής τους.

Οποιαδήποτε επέμβαση σε πολύτιμα, ευαίσθητα ιστορικά έργα τέχνης οφείλει να συνοδεύεται από τις βέλτιστες δυνατές μεθόδους για την διάγνωση των κινδύνων και την επίβλεψη των φαινομένων που προκύπτουν κατά την διάρκειά της. Η παρακολούθηση κρίνεται απαραίτητη γιατί το κυμαινόμενο πάχος των στρωμάτων επικάλυψης, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και το ιστορικό καταπόνησης διαφέρουν για κάθε σημείο ενός έργου, πράγμα που δεν καθιστά πάντοτε προβλέψιμη την ανταπόκριση στον καθαρισμό.

Η OCT έχει επιστρατευτεί ως μια τεχνική παρακολούθησης διαδικασιών επιλεκτικού καθαρισμού μέχρι ένα επιθυμητό βάθος, στο βαθμό που μπορεί να απεικονίσει τα προς απομάκρυνση στοιχεία. Η ικανότητα της OCT να απεικονίζει την διαστρωμάτωση των ημιδιαφανών στην ακτινοβολία διερεύνησης στρωμάτων επιτρέπει τον τερματισμό της διαδικασίας καθαρισμού με ένα μέρος του υλικού επικάλυψης να παραμένει ανεπηρέαστο για λόγους προστασίας του έργου τέχνης, κάτι το οποίο δεν είναι πάντοτε εφικτό με άλλες τεχνικές.

5.2.1.1 ΕΠΙΒΛΕΨΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΠΙΝΑΚΩΝ ΖΩΓΡΑΦΙΚΗΣ

Τα βερνίκια, με τα οποία καλύπτονται οι ζωγραφικές απεικονίσεις για προστασία και ομοιόμορφη στιλπνότητα, συχνά με την πάροδο του χρόνου μπορεί να χάσουν την διαφάνεια τους και να αποκτήσουν μια κίτρινη απόχρωση αλλοιώνοντας την εμφάνιση ενός πίνακα ζωγραφικής και η OCT έχει χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της διαδικασίας απομάκρυνσης βερνικιών με ακτινοβολία με laser ή με χημικούς τρόπους.

ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΜΕ LASER

Στα πρώτα στάδια των μελετών της χρήσης OCT για την επίβλεψη του καθαρισμού ζωγραφικών πινάκων με αποδόμηση των γηρασμένων βερνικιών με laser, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων σε δείγματα με βερνίκια 3 διαφορετικών τύπων (ρητίνης δάμμαρης - dammar, ρητίνης κετόνης και ακρυλικής ρητίνης) που ακτινοβολήθηκαν με συστήματα laser Er:YAG ή 4ης αρμονικής του Nd:YAG. Στο πλαίσιο αυτών των πειραμάτων επιδιώχθηκε με την βοήθεια της OCT η ρύθμιση παραμέτρων λειτουργίας του laser για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα αποδόμησης και η οπτικοποίηση των φαινομένων που έλαβαν χώρα για τους διάφορους συνδυασμούς ρητινών και ακτινοβολίας αποδόμησης. (Góra et al., 2006b, Targowski et al., 2008, Góra et al., 2008, Targowski et al., 2009a). Απεικονίστηκε το βάθος των κρατήρων που ανοίχθηκαν για διαφορετικές τιμές πυκνότητας ενέργειας της δέσμης συναρτήσει του πλήθους των παλμών laser που δέχθηκαν (Góra et al., 2006b) και έγινε διάκριση ανάμεσα στις διαφορετικές διεργασίες που συντελέστηκαν κατά την ακτινοβολία με laser Er:YAG (επιτυχής αποδόμηση, αποφλοιώση, τήξη) με σύστημα που κατέγραψε την εξέλιξή τους σε ταινίες από χρονικά διαδοχικά στιγμιότυπα μετρήσεων OCT (Targowski et al., 2008). Ήταν εφικτή η καταγραφή αυτή των δυναμικών διεργασιών όμως όχι και η παρουσίασή τους σε πραγματικό χρόνο λόγω περιορισμένης απόδοσης των υπολογιστικών συστημάτων. Η επί τόπου παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο κατέστη δυνατή σε πειράματα αποδόμησης με laser Nd:YAG από τους Góra et al. (2008), με χαμηλή όμως ποιότητα εικόνας. Επιπλέον, μέσω μετρήσεων OCT υπολογίστηκε και ο ρυθμός αποδόμησης (Góra et al., 2008) και η χωρική κατανομή του σε πειράματα ακτινοβολίας των δειγμάτων με laser Nd:YAG (Targowski et al., 2009a).

Όσον αφορά πειράματα αποδόμησης με laser για καθαρισμό ιστορικών πινάκων, η OCT χρησιμοποιήθηκε ως μέθοδος παρακολούθησης, συνδυαστικά με Φασματοσκοπία Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier (reflection FTIR spectroscopy), σε πείραμα αφαίρεσης του γηρασμένου βερνικιού και επιζωγραφίσεων από έργο που είχε δωριστεί στην επιστήμη ("Floral painting" της συλλογής Rijksmuseum του Amsterdam). Με τις δύο αυτές τεχνικές πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά τις προκαταρκτικές δοκιμές ακτινοβολίας σε επιλεγμένες περιοχές του έργου, ώστε να επιλεγούν οι κατάλληλες παράμετροι λειτουργίας του συστήματος KrF

laser ($\lambda=248\text{nm}$) κατά την διαδικασία του καθαρισμού. Η Φασματοσκοπία Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier (reflection FTIR spectroscopy) έχει τη δυνατότητα χαρακτηρισμού των υλικών του επιφανειακού στρώματος του υπό μελέτη αντικειμένου και, στην συγκεκριμένη περίπτωση, όταν δεν μπόρεσε μόνη της να δώσει με βεβαιότητα αποτελέσματα κλήθηκε να το κάνει η OCT και αντίστροφα (Moretti et al., 2019).

Για αποδόμηση των αλλοιωμένων στρωμάτων με laser, όπου η ταχύτητα συλλογής των μετρήσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική, οι ερευνητές κατευθύνθηκαν προς την χρήση συστημάτων Spectral Domain OCT.

ΧΗΜΙΚΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ

Στο πλαίσιο της έρευνας, η OCT χρησιμοποιήθηκε και για την επόπτευση χημικού καθαρισμού πινάκων ζωγραφικής. OCT εικόνες διατομής συλλέχθηκαν πριν και μετά την χημική επεξεργασία ζωγραφικού πίνακα για να επιβεβαιωθεί ότι δεν επηρεάστηκε η ακεραιότητα του χρωματικού στρώματος κάτω από τις στρώσεις των βερνικιών που απομακρύνθηκαν. (Liang et al., 2008)

Η OCT, επίσης, χρησιμοποιήθηκε ως διαγνωστική μέθοδος σε όλα τα στάδια της διαδικασίας καθαρισμού της ιστορικής εικόνας του Saint Leonardus του Porto Maurizio από τις, μεταγενέστερες της δημιουργίας της, επικαλύψεις και επιζωγραφίσεις. Απεικόνισε την πολύπλοκη αρχική διαστρωμάτωση αυτού του έργου τέχνης, εντόπισε πιθανά προβλήματα συντήρησης, εκτίμησε την αποτελεσματικότητα των διαφόρων μεθόδων χημικής απομάκρυνσης που χρησιμοποιήθηκαν δοκιμαστικά σε μικρές περιοχές και παρουσίασε τη δομή των στρωμάτων που αποκαλύφθηκαν μετά τον καθαρισμό. (Iwanicka et al., 2013)

Σε συνδυασμό με την FTIR ανέλαβε τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας χημικού καθαρισμού στρωμάτων βερνικιών από πρότυπα δείγματα και δύο ιστορικούς πίνακες ζωγραφικής (“Portrait of a Woman” και “Floral Painting”). Υπήρξαν περιπτώσεις όπου τα εναπομείναντα στρώματα επικαλύψεων δεν ήταν ανιχνεύσιμα με την μία τεχνική, αλλά ανιχνεύσιμα με την άλλη. Η χρήση και των δύο αυτών τεχνικών μαζί βοήθησε να παρακαμφθούν περιορισμοί που αντιμετώπισε καθεμιά ξεχωριστά. (Iwanicka et al., 2018b)

ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΜΕ PVA-b

Τέλος η OCT χρησιμοποιήθηκε, χωρίς να είναι πάντα αποτελεσματική, ως ένα από τα εργαλεία απεικόνισης του πάχους των στρωμάτων βερνικιών πριν και μετά την πειραματική τους απομάκρυνση από δείγματα με την χρήση λεπτών φύλλων PVA-b (poly(vinyl alcohol) -borax). (Lazidou et al., 2019)

5.2.1.2 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΑΛΛΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΣ

Η OCT δεν αξιοποιήθηκε μόνο ως εργαλείο παρακολούθησης διαδικασιών συντήρησης σε πίνακες ζωγραφικής, αλλά και στον μερικό καθαρισμό τοιχογραφιών και υαλωμένων ανάγλυφων κεραμικών πλακιδίων.

Σε δείγματα τοιχογραφιών με βερνίκι τύπου shellac, σύστημα ομοεστιακής OCT έδωσε τις διαφορετικές εικόνες διατομής για περιοχές που έχουν υποστεί πειραματικά χημικό καθαρισμό ή καθαρισμό με αποδόμηση με σύστημα laser Er:YAG, οι οποίες συγκρίθηκαν με αυτές τμημάτων χωρίς καθαρισμό (Striova et al., 2015).

Η OCT, επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι είχε την ικανότητα να απεικονίσει το στρώμα οξαλικού ασβεστίου που σχηματίζεται στις επιφάνειες πέτρινων έργων τέχνης μαζί με ξένες προς την αρχική σύνθεση των μνημείων ουσίες, αλλοιώνοντας την εμφάνισή τους. Αυτό της επέτρεψε να χρησιμοποιηθεί ως τεχνική για τον καθορισμό του τερματισμού της διαδικασίας λέπτυνσης του στρώματος οξαλικού ασβεστίου, αφού η ολοκληρωτική απομάκρυνσή του δεν θα ήταν επιθυμητή. Εφαρμόστηκε έτσι η ομοεστιακή OCT, στη μελέτη των αποτελεσμάτων καθαρισμού με χημικά μέσα και με αποδόμηση από συστήματα laser Nd:YAG ($\lambda = 1064\text{nm}$) και Er:YAG., σε ένα τμήμα αποκολλημένης τοιχογραφίας από το Sanserolcro της Τοσκάνης (Striova et al., 2016).

Η OCT τέλος κατόρθωσε να διακρίνει σε θραύσματα υαλωμένων κεραμικών πλακιδίων, κατά την ακτινοβολήσή τους από laser Nd:YAG ($\lambda = 1064\text{nm}$), καταστροφικά για την ακεραιότητα του υαλώματος φαινόμενα αποκολλήσεων και να διαπιστώσει την απομάκρυνση των στρωμάτων επικαθίσεων, ενώ αλλού έδωσε την χωρική κατανομή του αποδομημένου υαλώματος από ιστορικό πλακίδιο που απεικόνιζε την αγία Δωροθέα (Iwanicka et al., 2016b).

Ακολουθεί πίνακας με συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν για την επίβλεψη διαδικασιών καθαρισμού επιφανειακών στρωμάτων αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς.

Τύπος Συστήματος OCT	Τύπος Πηγής	Κεντρικό Μήκος Κύματος (nm)	Εύρος Ζώνης (nm)	Εύρος μήκους κύματος (nm)	Αξονική διακριτική ικανότητα (μm)	Πλευρική διακριτική ικανότητα (μm)	Είδος καθαρισμού που επιβλέπει	Αναφορές
Spectral OCT	SLD	835	50			<15	Αποδόμηση με laser σε πειραματικά δείγματα πινάκων ζωγραφικής	Góra et al., 2006b
Spectral OCT	SLD	830	50		10	<15	Αποδόμηση με laser σε πειραματικά δείγματα πινάκων ζωγραφικής	Targowski et al., 2008
Spectral OCT	SLD	845	50			<20	Αποδόμηση με laser σε πειραματικά δείγματα πινάκων ζωγραφικής	Góra et al., 2008
Spectral OCT	SLD	930			~6	~9	Χημικός καθαρισμός πίνακα ζωγραφικής	Liang et al., 2008
Spectral OCT	2 SLD	845	107				Αποδόμηση με laser σε πειραματικά δείγματα πινάκων ζωγραφικής	Targowski et al., 2009a
Spectral OCT	SLD	845	107		4,5		Χημικός καθαρισμός ιστορικού πίνακα	Iwanicka et al., 2013
Confocal Td-OCT	SLD	1550	100		10	2,5	Καθαρισμός βερνικιού shellac, οξάλικου ασβεστίου από τοιχογραφία	Striova et al., 2015, Striova et al., 2016
Spectral OCT	SLD			770-970		15	Καθαρισμός ιστορικών υαλωμένων κεραμικών	Iwanicka et al., 2016b
Spectral OCT	SLD			770-970	3	15	Χημικός καθαρισμός δοκιμίων και ιστορικών πινάκων ζωγραφικής	Iwanicka et al., 2018b
Spectral OCT	SLD			770-970	~3,3	13	Αποδόμηση με laser σε πίνακα ζωγραφικής	Moretti et al., 2019
Swept Source OCT	Swept LASER	1325					Πειραματικός καθαρισμός με φύλλα PVA-b	Lazidou et al., 2019

Πίνακας 5.14: Συστήματα OCT που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη και παρακολούθηση διαδικασιών καθαρισμού αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

5.2.2 Συνδυασμός με Φασματοσκοπία Εκπομπής Πλάσματος Επαγόμενου από LASER (LASER Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)

Η φασματοσκοπία εκπομπής πλάσματος επαγόμενου από LASER είναι μια μικρο-επεμβατική μέθοδος καταγραφής και ανάλυσης του φάσματος εκπομπής του πλάσματος που δημιουργείται από την αποδόμηση που συντελείται στο σημείο εστίασης παλμικού LASER πάνω στην επιφάνεια εξεταζόμενου αντικειμένου. Κατά την αποδιέγερσή του το πλάσμα εκπέμπει ακτινοβολία σε μήκη κύματος χαρακτηριστικά των στοιχείων που το αποτελούν και έτσι μπορεί να προσδιοριστεί η χημική σύσταση του αποδομημένου υλικού. Η OCT έχει συνδυαστεί με την LIBS στο πλαίσιο υλοποίησης της LIBS στρωματογραφίας, για την μελέτη αντικειμένων που παρουσιάζουν έντονη διαφοροποίηση της σύστασής τους ως προς το βάθος, όπου διαδοχικοί παλμοί LASER μικρής ενέργειας χρησιμοποιούνται για την ανάλυση κάθε φορά περιοχής λεπτού πάχους. Χωρίς την ύπαρξη μιας τεχνικής όπως η OCT, που καταγράφει το βάθος του κρατήρα αποδόμησης, δεν θα ήταν δυνατό να αντιστοιχηθεί μια μέτρηση της LIBS σε συγκεκριμένο επίπεδο της διαστρωμάτωσης. Στον τομέα των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς, συνδυασμός των δύο αυτών τεχνικών έχει εφαρμοστεί στην απόδοση του πάχους και της σύστασης των επιμέρους στρωμάτων τόσο πειραματικού (Kwiatkowska et al., 2009) όσο και ιστορικής σημασίας πίνακα ζωγραφικής (Targowski et al., 2009c, Kaszewska et al., 2013), στρώσεων επικάλυψης πολύτιμων εγχόρδων οργάνων (Poggialini et al., 2020) καθώς και στη μελέτη νομισμάτων (Amaral et al., 2009). Η γραφική παράσταση του βάθους του κρατήρα που υπολογίζεται από τις μετρήσεις OCT συναρτηθεί του πλήθους των παλμών που έχει δεχτεί το σημείο ανάλυσης, δίνει μια εικόνα των ορίων του κάθε στρώματος που παρουσιάζει διαφορετικό ρυθμό αποδόμησης, ενώ η ικανότητα της OCT να απεικονίζει τα ημιδιαφανή στοιχεία των έργων τέχνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή κατάλληλης περιοχής μέτρησης.

5.2.3 Συνδυασμός με άλλες τεχνικές

Συνδυασμός με Μη Γραμμική Μικροσκοπία (Non-Linear Microscopy, NLM)

Στο πλαίσιο βιοϊατρικών εφαρμογών έχει υπάρξει συνδυασμός στο ίδιο απεικονιστικό σύστημα των τεχνικών της μη γραμμικής μικροσκοπίας (NLM) και της OCT, καθώς τα fs LASER που χρησιμοποιούνται ως πηγές παρέχουν την ένταση ακτινοβολίας που απαιτείται για την γένεση μη γραμμικών φαινομένων στην NLM και το εύρος ζώνης για ικανοποιητική διακριτική ικανότητα στην OCT. Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του συνδυασμού αυτών των δύο τεχνικών στην μελέτη πινάκων ζωγραφικής έγινε σύγκριση των δυνατοτήτων διαφορετικών συστημάτων NLM και OCT στην απεικόνιση στρωμάτων μιας σειράς βερνικιών και ζωγραφικών χρωμάτων και των πιθανών αλλοιώσεων που επιφέρουν σε αυτά (Liang et al., 2017). Η διάταξη της μη γραμμικής μικροσκοπίας επέτρεψε την καταγραφή των μη γραμμικών φαινομένων του πολυφωτονικά διεγερόμενου φθορισμού και της γένεσης 2ης και 3ης αρμονικής συχνότητας, παρουσιάζοντας την ίδια περίπου αξονική διακριτική ικανότητα αλλά μικρότερο βάθος απεικόνισης από την OCT στην απόδοση της εσωτερικής δομής του αντικειμένου. Στα παραδείγματα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, διαπιστώθηκε η δυνατότητα τόσο της OCT όσο και

της NLM μέσω της ανίχνευσης της 3ης αρμονικής να απεικονίζουν διαχωριστικές επιφάνειες καθώς και η ικανότητα της NLM να διακρίνει μεταξύ δύο στρωμάτων βερνικιών που ενώ έδιναν την ίδια OCT εικόνα παρουσίαζαν διαφορετικής έντασης διεγερόμενο φθορισμό.

Συνδυασμός με Φασματοσκοπία Υπερύθρου

Για την μελέτη τόσο της δομής όσο και της σύστασης στρωμάτων πινάκων ζωγραφικής, μια διάταξη Fd-OCT με γεωμετρία συμβολόμετρου Michelson και πηγή υπερσυνεχούς φάσματος, στην περιοχή μήκους κύματος 1,1-4,5 μm , τροποποιήθηκε ώστε να επιτρέπει την υλοποίηση φασματοσκοπίας υπερύθρου (Zogin et al., 2019). Για κάθε A-scan που καταγράφηκε με την OCT για κεντρικό μήκος κύματος $\lambda_c = 4\mu\text{m}$, το σύστημα μέτρησε το φάσμα ανάκλασης και κατ' επέκταση το φάσμα απορρόφησης για εύρος μηκών κύματος 3,1- 4,4 μm . Μετά από σάρωση μιας περιοχής ενδιαφέροντος και με τις δύο τεχνικές, συλλέγονται πληροφορίες όχι μόνο για δομικά χαρακτηριστικά του δείγματος που απεικονίζει η OCT αλλά και για την χημική σύσταση των υλικών που το αποτελούν μέσω της φασματοσκοπίας. Για τις μετρήσεις φασματοσκοπίας ο βραχίονας αναφοράς και η φασματομετρική διάταξη Fd-OCT απομονώνονται και η δέσμη που επιστρέφει από το υπό μελέτη αντικείμενο κατευθύνεται σε υποσύστημα ανίχνευσης που περιλαμβάνει μεταβλητό φίλτρο Fabry-Pérot (Fabry-Pérot tunable filter, FPTF). Σε πειραματικό δοκίμιο που κατασκευάστηκε για τον έλεγχο της εφαρμογής, χρωματικά στρώματα που παρουσίαζαν ίδια σκέδαση στις εικόνες OCT είχαν μερικώς ανιχνεύσιμη διαφοροποίηση στην χαρτογράφηση με φασματοσκοπία μέσου υπερύθρου.

Συνδυασμός με Υπερφασματική Απεικόνιση (Hyperspectral Imaging, HSI)

Οι τεχνικές της τομογραφίας οπτικής συμφωνίας (OCT) και υπερφασματικής απεικόνισης (Hyperspectral Imaging) συνδυάστηκαν για την γρήγορη χαρτογράφηση της κατανομής μονού στρώματος βερνικιού ξύλου (Dingemans et al., 2015). Η υπερφασματική απεικόνιση καταγράφει το φάσμα της ανακλώμενης ακτινοβολίας από κάθε σημείο μιας ολόκληρης επιφάνειας ενδιαφέροντος, για μικρές ζώνες μήκους κύματος. Στην περίπτωση ακτινοβολίας μιας στρώσης επικάλυψης σε ξύλινο υπόβαθρο, ο προσδιορισμός του πάχους της βασίζεται στον υπολογισμό της εξασθένησης του φάσματος ανάκλασης του ξύλου. Η OCT κλήθηκε να μετρήσει το πάχος του στρώματος βερνικιού σε μια μικρή επιλεγμένη περιοχή και αν το φάσμα ανάκλασης του γυμνού ξύλου είναι γνωστό σύμφωνα με τον νόμο των Lambert-Beer από το αντίστοιχο φάσμα που ανίχνευσε η υπερφασματική απεικόνιση, μπορεί να εξαχθεί ο συντελεστής απόσβεσης του βερνικιού συναρτήσει του μήκους κύματος. Καταγράφοντας το φάσμα ανάκλασης ολόκληρης της μελετώμενης περιοχής, με γνωστά το φάσμα ανάκλασης της ξύλινης επιφάνειας και τον συντελεστή απόσβεσης είναι δυνατή η άμεση χαρτογράφηση του πάχους του βερνικιού.

Συνδυασμός με THz απεικόνιση στο Πεδίο του Χρόνου (THz Time-Domain Imaging, THz-TD Imaging)

Για την απόδοση του συνόλου της διαστρωμάτωσης πινάκων ζωγραφικής έχει γίνει προσπάθεια συνδυαστικής εφαρμογής της OCT με την THz απεικόνιση στο πεδίο του

χρόνου, η οποία είναι μια απεικονιστική τεχνική ανίχνευσης THz ακτινοβολίας, με συχνότητες που ανήκουν στην περιοχή 0,3- 3 THz, σε διάταξη με γεωμετρία ανάκλασης (Dandolo et al., 2019). Σε αυτό τον τύπο υλοποίησης της THz απεικόνισης, οι παλμοί THz ακτινοβολίας που παράγονται προσπίπτουν και ανακλώνται μερικώς στις διεπιφάνειες των επιμέρους στρώσεων της εσωτερικής δομής του υπό μελέτη αντικειμένου, με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται με διαφορετική χρονική καθυστέρηση που αντιστοιχεί στην απόσταση την οποία διένυσαν. Από αυτές τις μετρήσεις και με γνωστό το δείκτη διάθλασης του υλικού των στρωμάτων είναι δυνατός και ο υπολογισμός του πάχους τους.

Η THz ακτινοβολία διεισδύει σε στοιχεία της δομής πινάκων ζωγραφικής που είναι αδιαφανή για την τεχνική της OCT, όπως στα στρώματα χρώματος και προετοιμασίας, κυρίως λόγω της έντονης σκέδασης στην οποία υπόκειται η ακτινοβολία διερεύνησης, ωστόσο η THz απεικόνιση στο πεδίο του χρόνου έχει χειρότερη διακριτική ικανότητα, κάτι το οποίο δεν επιτρέπει την διάκριση μεταξύ λεπτών στρωμάτων όπως αυτά σε μια ζωγραφική επιφάνεια. Μπορεί οι δύο τεχνικές να παρουσιάζουν διαφορές στα χαρακτηριστικά της πηγής ακτινοβολίας, στο βάθος απεικόνισης, στη διακριτική ικανότητα αλλά μια συνδυαστική απεικόνιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και των δύο έχει την δυνατότητα να δώσει μια συνολική εικόνα της διαστρωμάτωσης των πινάκων ζωγραφικής διευρύνοντας τα όρια της καθεμιάς ξεχωριστά.

Γι' αυτό το λόγο προτάθηκε ένας τρόπος συγκεντρωτικής παρουσίασης της εσωτερικής δομής προτύπου πίνακα ζωγραφικής, όπου συσχετίζοντας (με το χέρι ή με ημιαυτόματες διαδικασίες) τα χαρακτηριστικά στοιχεία του δείγματος που ανιχνεύτηκαν και από τις δύο διατάξεις, μετά από κατάλληλη επεξεργασία των εικόνων, προκύπτει μια ενιαία απεικόνιση της διαστρωμάτωσης από την ανώτατη επιφάνεια μέχρι το υπόβαθρο που περιέχει στοιχεία και των δύο τεχνικών.

Συνδυασμός με Συμβολομετρία Κηλίδων Χαμηλής Συμφωνίας (Low Coherence Speckle Interferometry, LCS)

Η τεχνική LCS εφαρμόστηκε στην μελέτη αγαμάτων του διάσημου στρατού τερακότας και των προβλημάτων συντήρησής τους, καθώς τα στρώματα βερνικιού και χρωμάτων που διαθέτουν στην επιφάνειά τους αποκολλώνται μετά την εκταφή τους εξαιτίας της διαφορετικής ανταπόκρισης καθενός από αυτά στην μεταβολή των συνθηκών υγρασίας (Hinsch et al., 2007).

Η τεχνική συμβολομετρίας κηλίδων χαμηλής συμφωνίας (LCS) συνδυάζει την ηλεκτρονική συμβολομετρία κηλίδων (ESPI, Electronic Speckle Pattern Interferometry) με την τομογραφία οπτικής συμφωνίας (OCT, Optical Coherence Tomography) και χρησιμοποιήθηκε σε προσπάθεια καταγραφής των παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα στις διεπιφάνειες βερνικιού- χρώματος, χρώματος – τερακότας κατά την διάρκεια στεγνώματος της υγρασίας των στρωμάτων της διακοσμητικής επικάλυψης αμέσως μετά την απομάκρυνσή τους από το χρώμα.

Η πηγή, εδώ δίοδος υπερφωταύγειας (Superluminescent diode, SLD), είναι περιορισμένης χρονικής συμφωνίας και η κάμερα κάθε φορά καταγράφει την διάταξη

των κηλίδων συμβολής της δέσμης αναφοράς και της δέσμης που ανακλάται από στοιχεία του αντικειμένου όταν η διαφορά των οπτικών δρόμων είναι μέσα στο εύρος που ορίζεται από το μήκος συμφωνίας της πηγής.

Μεθοδολογία συλλογής βιβλιογραφίας κεφαλαίου

Στην ιστοσελίδα fizyka.umk.pl/~oct4art/, που συντονίζεται από τον Piotr Targowski, Ph.D., φιλοξενείται ένας εκτενής κατάλογος τίτλων επιστημονικών άρθρων που έχουν ως αντικείμενό τους την εξέταση έργων τέχνης με την τεχνική της τομογραφίας οπτικής συμφωνίας. Ακολουθώντας τις υποδείξεις και αναφορές των άρθρων ανασκόπησης που περιλαμβάνονταν στην παραπάνω λίστα, συγκέντρωσα την σχετική βιβλιογραφία, κατέταξα τις διάφορες δημοσιεύσεις σε κατηγορίες με βάση το υλικό που μελετήθηκε σε αυτές και τέλος παρουσίασα συνοπτικά τις παρατηρήσεις και τα συμπεράσματά τους.

Οι πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των συστημάτων OCT που καταγράφονται στους πίνακες του κεφαλαίου, περιέχονται στα επιμέρους άρθρα που περιγράφουν τις εφαρμογές της OCT και σε άλλα στα οποία οδηγήθηκα μέσω των αναφορών τους. Στην περίπτωση ορισμένων εμπορικά διαθέσιμων διατάξεων, επισκέφθηκα τις ιστοσελίδες των εταιριών κατασκευής για να συλλέξω στοιχεία.

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η τομογραφία οπτικής συμφωνίας δίνει εικόνες διατομής και τρισδιάστατης απεικόνισης της εσωτερικής δομής αντικειμένων, στο βαθμό που τα υλικά που τα αποτελούν παρουσιάζουν ικανοποιητική διαφάνεια στην ακτινοβολία διερεύνησης της εκάστοτε διάταξης.

Ως μια μη επεμβατική τεχνική που δίνει εικόνες μέτρησης γρήγορα και με ικανοποιητική διακριτική ικανότητα έχει εφαρμοστεί στους τομείς της έρευνας και συντήρησης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς, όπου το κύριο μέλημα είναι η προστασία της ακεραιότητας και η διατήρηση της εικόνας πολύτιμων έργων τέχνης.

Ο κυριότερος περιορισμός που συναντάται κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι η μη ικανότητα απεικόνισης έντονα σκεδαστικών υλικών. Γι' αυτό το λόγο η OCT χρησιμοποιείται συχνότερα για εικόνες τομογραφίας σε διαφανή υλικά, όπως το γυαλί και σε ημιδιάφανα δομικά στοιχεία όπως οι διάφορες επικαλύψεις κεραμικών ή ξύλινων έργων τέχνης και τα στρώματα βερνικιών πινάκων ζωγραφικής, καθώς και για αναπαράσταση του ανάγλυφου και των οπτικών ιδιοτήτων επιφανειών αδιαφανών υλικών.

Η υψηλή αξονική διακριτική ικανότητα της, την καθιστά ιδανική για την καταγραφή της διαστρωμάτωσης των ημιδιάφανων στρώσεων επικάλυψης που προαναφέρθηκαν, οι οποίες έχουν μικρό πάχος, είναι αυτές που δέχονται τις επιδράσεις του περιβάλλοντος και πάνω τους συντελούνται οι κυριότερες εργασίες συντήρησης.

Δεν έχουν ωστόσο σταματήσει να γίνονται έρευνες για την βελτιστοποίηση των διατάξεων OCT ώστε να καλύπτουν τις διαγνωστικές ανάγκες του τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς διευρύνοντας το πλήθος των υλικών που είναι δυνατόν να απεικονίσουν.

Η ιδιαιτερότητα της τεχνικής να καταγράφει οπτικές αποστάσεις κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης της δέσμης διερεύνησης, σημαίνει ότι μια εικόνα διατομής OCT χρειάζεται επεξεργασία από αλγορίθμους διόρθωσης για να αποτελέσει μια αντιπροσωπευτική απόδοση της αντίστοιχης φυσικής διατομής του αντικειμένου.

Η OCT μπορεί να δώσει εικόνα μονάχα των οπτικών ιδιοτήτων μιας τρισδιάστατης δομής και ο συνδυασμός της με άλλες τεχνικές που παρέχουν πληροφορίες για την σύσταση των διαφόρων υλικών κρίνεται συχνά απαραίτητος για την ερμηνεία των μετρήσεων. Παράλληλα ένας τέτοιος συνδυασμός εφαρμογών, παρέχει στις τεχνικές χαρακτηρισμού υλικών την δυνατότητα να αποδώσουν την διαστρωμάτωση ενός αντικειμένου.

Η OCT έχει χρησιμοποιηθεί για να απεικονιστεί η έκταση και η κατανομή των φθορών που έχουν υποστεί διάφορα αντικείμενα και να διαπιστωθεί αν είναι επιρρεπή σε περαιτέρω αλλοιώσεις ώστε οι συντηρητές να λάβουν σωστές αποφάσεις για τις συνθήκες φύλαξης και τις πιθανές διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την διατήρησή τους.

Η OCT έχει συμβάλει στην κατανόηση των τρόπων δημιουργίας διαφόρων έργων τέχνης και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της αυθεντικότητας τους.

Είναι μια από τις μεθόδους που επιστρατεύονται για την απόδοση των δομικών ιδιοτήτων και την εύρεση σημείων ευαισθησίας σε αντικείμενα που πρόκειται να δεχθούν συντήρηση ενώ έχει χρησιμεύσει και για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας εργασιών όπως είναι ο καθαρισμός γηρασμένων και αλλοιωμένων βερνικιών ή επικαλύψεων με χημικά μέσα ή με αποδόμηση μετά από ακτινοβόληση με LASER.

Μια πιο εντατική έρευνα πάνω στις δυνατότητες απεικόνισης από την OCT των διαφόρων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τα διάφορα στάδια του καθαρισμού αλλοιωμένων επικαλύψεων έργων τέχνης, θα μπορούσε να βοηθήσει στο να ενταχθεί η μέθοδος πιο ενεργά σε αυτό τον τομέα της επιστήμης της συντήρησης. Η OCT αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την επίβλεψη των βημάτων καθαρισμού και με ανάπτυξη των καταλλήλων υπολογιστικών μεθόδων θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία επεξεργασίας των αντικειμένων ώστε να τερματίζεται πριν την πρόκληση ζημιάς στο υποκείμενο υγιές επίπεδο του έργου τέχνης. Επιπλέον, διατάξεις με πηγές ακτινοβολίας σε περιοχές του φάσματος που θα παρουσιάζουν διεισδυτικότητα σε όλο και περισσότερα χρωματικά στρώματα δίνουν την δυνατότητα απεικόνισης μεγαλύτερου μέρους της σύνθετης διαστρωμάτωσης πινάκων ζωγραφικής και θα μπορούσαν να βελτιώσουν την ικανότητα της τεχνικής να εντοπίζει και να αποδίδει με ευκρίνεια προπαρασκευαστικά σκίτσα.

OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY- OCT
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ OCT ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΗΣ
ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑΣ

Αναφορές βιβλιογραφίας

Adler, D. C., Stenger, J., Gorczynska, I., Lie, H., Hensick, T., Spronk, R., ... & Cable, A. E. Comparison of three-dimensional optical coherence tomography and high resolution photography for art conservation studies. *Optics Express*, 15(24), 15972-15986 (2007).

Agrawal, A., Pfefer, T. J., Woolliams, P. D., Tomlins, P. H., & Nehmetallah, G. Methods to assess sensitivity of optical coherence tomography systems. *Biomedical optics express*, 8(2), 902-917 (2017).

Amaral, M. M., Raele, M. P., De Freitas, A. Z., Zahn, G. S., Samad, R. E., Vieira Jr, N. D., & Tarelho, L. V. Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) applied to stratigrafic elemental analysis and Optical Coherence Tomography (OCT) to damage determination of cultural heritage Brazilian coins. In *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology II* (Vol. 7391, p. 73910I). International Society for Optics and Photonics. (2009).

Arecchi, T., Bellini, M., Corsi, C., Fontana, R., Materazzi, M., Pezzati, L., & Tortora, A. Optical coherence tomography for painting diagnostics. *Optical methods for arts and archaeology*, 5857, 58570Z (2005).

Arecchi, T., Bellini, M., Corsi, C., Fontana, R., Materazzi, M., Pezzati, L., & Tortora, A.. A new tool for painting diagnostics: optical coherence tomography. *Optics and spectroscopy*, 101(1), 23-26 (2006).

Aumann, S., Donner, S., Fischer, J., & Müller, F. Optical coherence tomography (OCT): principle and technical realization. In *High Resolution Imaging in Microscopy and Ophthalmology* (pp. 59-85). Springer, Cham. (2019).

Bemand, E., Bencsik, M., & Liang, H. OCT and NMR for non-invasive in-situ monitoring of the vulnerability of rock art monuments. *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III* 8084, 80840H (2011).

Bemand, E., & Liang, H. Optical coherence tomography for vulnerability assessment of sandstone. *Applied optics*, 52(14), 3387-3393 (2013).

Bemand, E., Liang, H., & Bencsik, M. Non-invasive Methods for In-Situ Assessing and Monitoring of the. *Open-air rock-art conservation and management: State of the art and future perspectives*, 244 (2014).

Bouma, B. E., & Tearney, G. J. (2002). *Handbook of OCT*.

Brostoff, L., Bamford, C. L. W., Diba, T., Buechele, A., Loew, M., & Zara, J. Optical coherence tomography of 19th century glass: facts and phantoms. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII* (Vol. 11058, p. 110580W). International Society for Optics and Photonics (2019).

- Callewaert, T., Dik, J., & Kalkman, J. Segmentation of thin corrugated layers in high-resolution OCT images. *Optics Express*, 25(26), 32816-32828 (2017).
- Chang, S., Mao, Y., Chang, G., & Flueraru, C. Jade detection and analysis based on optical coherence tomography images. *Optical Engineering*, 49(6), 063602 (2010).
- Cheung, C. S., & Liang, H. Ultra-high resolution Fourier domain optical coherence tomography for resolving thin layers in painted works of art. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology IV* (Vol. 8790, p. 87900M). International Society for Optics and Photonics (2013).
- Cheung, C. S., Tokurakawa, M., Daniel, J. M. O., & Clarkson, W. A. Long wavelength optical coherence tomography for imaging of painted objects (2013).
- Cheung, C. S., Daniel, J. M. O., Tokurakawa, M., Clarkson, W. A., & Liang, H. Optical coherence tomography in the 2- μm wavelength regime for paint and other high opacity materials. *Optics letters*, 39(22), 6509-6512 (2014).
- Cheung C.S., Spring M, Liang H. Ultra-high resolution Fourier domain optical coherence tomography for old master paintings. *Opt Express*. 23(8), 10145-57 (2015)
- Cheung C.S., Daniel J.M.O., Tokurakawa M, Clarkson W.A., Liang H. High resolution Fourier domain optical coherence tomography in the 2 μm wavelength range using a broadband supercontinuum source. *Opt Express*. 23(3),1992-2001. (2015)
- Choma, M. A., Sarunic, M. V., Yang, C., & Izatt, J. A. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography. *Optics express*, 11(18), 2183-2189 (2003).
- Dandolo, C. L. K., Lopez, M., Fukunaga, K., Ueno, Y., Pillay, R., Giovannacci, D., ... & Detalle, V. Toward a multimodal fusion of layered cultural object images: complementarity of optical coherence tomography and terahertz time-domain imaging in the heritage field. *Applied optics*, 58(5), 1281-1290 (2019).
- Dingemans, L. M., Papadakis, V. M., Liu, P., Adam, A. J. L., & Groves, R. M. Optical coherence tomography complemented by hyperspectral imaging for the study of protective wood coatings. *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology V* 9527, 952708 (2015).
- Duggins, D., Li, F., Aalders, M., Cossairt, O., Katsaggelos, A., & Walton, M. A Novel OCT Design for Cultural Heritage Applications. *Microscopy and Microanalysis*, 24(S1), 2142-2143 (2018).
- Elias, M., Mas, N., & Cotte, P. Review of several optical non-destructive analyses of an easel painting. Complementarity and crosschecking of the results. *Journal of cultural heritage*, 12(4), 335-345 (2011).
- Fercher, A.F., Hitzenberger, C., Juchem, M. Measurement of intraocular optical distances using partially coherent laser light. *J Mod Opt* 38: 1327–1333 (1991).
- Fiocco, G., Rovetta, T., Invernizzi, C., Albano, M., Malagodi, M., Licchelli, M., ... & Iwanicka, M. A Micro-Tomographic Insight into the Coating Systems of Historical Bowed String Instruments. *Coatings*, 9(2), 81 (2019).
- Fontana, R., Bellini, M., Corsi, C., Mastroianni, M., Materazzi, M., Pezzati, L., & Tortora, A. Optical coherence diagnostics for painting conservation. *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology* 6618, 661808 (2007).

- Góra, M., Pircher, M., Götzinger, E., Bajraszewski, T., Strlic, M., Kolar, J., Hitzenberger, C.K. & Targowski, P. Optical coherence tomography for examination of parchment degradation. *Laser Chemistry* (2006).
- Góra, M., Targowski, P., Rycyk, A., & Marczak, J. Varnish ablation control by optical coherence tomography. *Laser chemistry* (2006).
- Góra, M., Rycyk, A., Marczak, J., Targowski, P., & Kowalczyk, A. From medical to art diagnostics OCT: a novel tool for varnish ablation control. *Coherence Domain Optical Methods and Optical Coherence Tomography in Biomedicine XI* 6429, 64292V (2007)
- Góra, M. , Targowski, P. , Kowalczyk, A. , J. Marczak, A. Rycyk, *Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA VII Proceedings*, Taylor & Francis Group, London, 23 (2008)
- Gorczyńska, I., Wojtkowski, M., Szkulmowski, M., Bajraszewski, T., Rouba, B., Kowalczyk, A., & Targowski, P. Varnish thickness determination by spectral optical coherence tomography. In *Lasers in the Conservation of Artworks* (pp. 493-497). Springer, Berlin, Heidelberg (2007).
- Gurov, I., Margaryants, N., & Zhukova, E. Evaluation of art subjects implemented in the marquetry technique by the optical coherence microscopy method. *Strain*, 55(2), e12304 (2019).
- Hinsch, K. D., Gülker, G., & Helmers, H. Checkup for aging artwork—Optical tools to monitor mechanical behaviour. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(5), 578-588. (2007).
- Huang, D., Swanson, E.A., Lin, C.P., Schuman, J.S., Stinson, W.G., Chang, W., Hee, M.R., Flotte, T., Gregory, K., Puliafito, C.A., Fujimoto, J.G. Optical coherence tomography. *Science* 254, 1178 (1991).
- Hughes, M. High lateral resolution imaging with dynamic focus (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, University of Kent) (2010).
- Izatt, J. A., & Choma, M. A. Theory of optical coherence tomography. In *Optical coherence tomography* (pp. 47-72). Springer, Berlin, Heidelberg (2008).
- Iwanicka, M., Tymińska-Widmer, L., Rouba, B. J., Kwiatkowska, E. A., Sylwestrzak, M., & Targowski, P. Through-glass structural examination of Hinterglasmalerei by Optical Coherence Tomography. In *Lasers in the Conservation of Artworks VIII—Proceedings of the International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks VIII, LACONA VIII* (pp. 209-214) (2010).
- Iwanicka, M., Kwiatkowska, E. A., Sylwestrzak, M., & Targowski, P. Application of optical coherence tomography (OCT) for real time monitoring of consolidation of the paint layer in Hinterglasmalerei objects. In *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III* (Vol. 8084, p. 80840G). International Society for Optics and Photonics (2011).
- Iwanicka, M., Konczalska, D., Targowski, P., & Rouba, B. J. Extended Abstract Noncontact and Noninvasive Monitoring of Overpaint Removal with Optical Coherence Tomography. In *New Insights into the Cleaning of Paintings: Proceedings from the Cleaning 2010 International Conference*, Universidad Politecnica de Valencia and Museum Conservation Institute. Smithsonian Institution (2013).
- Iwanicka, M., Sylwestrzak, M., & Targowski, P. Traces of former restorations of Raphael's *La Muta* as seen by Optical Coherence Tomography (2015).

- Iwanicka, M., Ćwikliński, Ł., & Targowski, P. Combined use of optical coherence tomography and macro-XRF imaging for non-invasive evaluation of past alterations in 17th c. Dutch painting. In Proceedings of 2nd international conference on art & archaeology (2016).
- Iwanicka, M., Musiela, J., Łukaszewicz, J. W., Stoksik, H., & Sylwestrzak, M. The potential of OCT for assessing laser assisted removal of deposits from ceramic tiles. In Lasers in the conservation of artworks XI. Proceedings of the International Conference LACONA XI 2016 (pp. 105-114) (2016).
- Iwanicka, M., Lanterna, G., Lalli, C. G., Innocenti, F., Sylwestrzak, M., & Targowski, P. On the application of optical coherence tomography as a complimentary tool in an analysis of the 13th century Byzantine Bessarion Reliquary. *Microchemical Journal*, 125, 75-84 (2016).
- Iwanicka, M., Sylwestrzak, M., Szkulmowska, A., Targowski, P., "Pre-restoration condition of superficial layers of the Adoration of the Magi by Leonardo da Vinci as seen by optical coherence tomography", in: M. Ciatti, C. Frosinini (Eds.) *Il restauro dell'Adorazione dei Magi di Leonardo La riscoperta di un capolavoro*, Edifir, Florence, pp. 287-293 (2017).
- Iwanicka, M., Musiela, J., Łukaszewicz, J.W., Stoksik, H., Sylwestrzak, M., "The potential of OCT for assessing laser assisted removal of deposits from ceramic tiles", in: P. Targowski, M. Walczak, P. Pouli (Eds.) *Lasers in the Conservation of Artworks XI*, Proceedings of the International Conference LACONA XI, Kraków, Poland, 20-23 September 2016, NCU Press, Torun, (2017).
- Iwanicka, M., Sylwestrzak, M., & Targowski, P. Optical Coherence Tomography (OCT) for examination of artworks. In *Advanced Characterization Techniques, Diagnostic Tools and Evaluation Methods in Heritage Science* 49-59 (2018).
- Iwanicka, M., Moretti, P., van Oudheusden, S., Sylwestrzak, M., Cartechini, L., van den Berg, K. J., ... & Miliani, C. Complementary use of Optical Coherence Tomography (OCT) and Reflection FTIR spectroscopy for in-situ non-invasive monitoring of varnish removal from easel paintings. *Microchemical Journal*, 138, 7-18 (2018).
- Kaszewska, E. A., Sylwestrzak, M., Marczak, J., Skrzeczanowski, W., Iwanicka, M., Szmit-Naud, E., ... & Targowski, P. Depth-resolved multilayer pigment identification in paintings: combined use of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and optical coherence tomography (OCT). *Applied spectroscopy*, 67(8), 960-972. (2013).
- Kogou, S., Lucian, A., Bellesia, S., Burgio, L., Bailey, K., Brooks, C., & Liang, H. A holistic multimodal approach to the non-invasive analysis of watercolour paintings. *Applied Physics A*, 121(3), 999-1014 (2015).
- Kogou, S., Neate, S., Coveney, C., Miles, A., Boocock, D., Burgio, L., ... & Liang, H. The origins of the Selden map of China: scientific analysis of the painting materials and techniques using a holistic approach. *Heritage Science*, 4(1), 28 (2016).
- Kunicki-Goldfinger, J., Targowski, P., Góra, M., Karaszkiwicz, P., & Dzierżanowski, P. Characterization of glass surface morphology by optical coherence tomography. *Studies in conservation*, 54(2), 117-128 (2009).
- Kwiatkowska, E., Sylwestrzak, M., Rouba, B. J., Tymińska-Widmer, L., Iwanicka, M., & Targowski, P. Optical Coherence Tomography for non-destructive investigations of structure of easel paintings. In *1st Canterbury Workshop on Optical Coherence Tomography and Adaptive Optics* (Vol. 7139, p. 713916). International Society for Optics and Photonics (2008).

- Kwiatkowska, E. A., Marczak, J., Ostrowski, R., Skrzeczanowski, W., Sylwestrzak, M., Iwanicka, M., & Targowski, P. Absolute LIBS stratigraphy with optical coherence tomography. *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology II* 7391, 73910F (2009)
- Latour, G., Moreau, J., Elias, M., & Frigerio, J. M. Optical coherence tomography: non-destructive imaging and spectral information of pigments. In *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology* 6618, 661806 (2007)
- Latour, G., Georges, G., Siozade, L., Deumié, C., & Echard, J. P. Study of varnish layers with optical coherence tomography in both visible and infrared domains. In *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology II* (Vol. 7391, p. 73910J). International Society for Optics and Photonics (2009).
- Latour, G., Echard, J. P., Soulier, B., Emond, I., Vaiedelich, S., & Elias, M. Structural and optical properties of wood and wood finishes studied using optical coherence tomography: application to an 18th century Italian violin. *Applied optics*, 48(33), 6485-6491 (2009).
- Lawman, S., & Liang, H. High precision dynamic multi-interface profilometry with optical coherence tomography. *Applied Optics*, 50(32), 6039-6048 (2011).
- Lazidou, D., Teknetzi, I., Karapanagiotis, I., Ritzoulis, C., & Panayiotou, C. Poly (vinyl alcohol)-borax films as cleaning agents for icons. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11(11), 6259-6271 (2019).
- Lenz, M., Mazzon, C., Dillmann, C., Gerhardt, N. C., Welp, H., Prange, M., & Hofmann, M. R. Spectral domain optical coherence tomography for non-destructive testing of protection coatings on metal substrates. *Applied Sciences*, 7(4), 364 (2017).
- Liang, H., Gomez Cid, M., Cucu, R., Dobre, G., Jackson, D., Pannell, C., Pedro, J., Saunders, D., Podoleanu, A. Application of OCT to examination of easel paintings. Second European Workshop on Optical Fibre Sensors, Proc. SPIE, 5502, 378-381 (2004).
- Liang, H., Cid, M. G., Cucu, R. G., Dobre, G. M., Podoleanu, A. G., Pedro, J., & Saunders, D. En-face optical coherence tomography-a novel application of non-invasive imaging to art conservation. *Optics Express*, 13(16), 6133-6144 (2005).
- Liang, H., Cid, M. G., Cucu, R., Dobre, G., Kudimov, B., Pedro, J., ... & Podoleanu, A. Optical coherence tomography: a non-invasive technique applied to conservation of paintings. *Optical Methods for Arts and Archaeology* 5857, 58570W (2005).
- Liang, H., Cid, M. G., Cucu, R., Dobre, G. M., Pedro, J., & Podoleanu, A. G. Optical interferometry-from astronomy to art (2005).
- Liang, H., Peric, B., Hughes, M., Podoleanu, A., Spring, M., & Saunders, D. Optical coherence tomography for art conservation and archaeology. *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology* 6618, 661805. (2007)
- Liang, H., Peric, B., Spring, M., Saunders, D., Hughes, M., & Podoleanu, A. G. Non-invasive imaging of subsurface paint layers with optical coherence tomography (2007).
- Liang, H., Peric, B., Hughes, M., Podoleanu, A. G., Spring, M., & Roehrs, S. Optical coherence tomography in archaeological and conservation science-a new emerging field. 1st Canterbury Workshop on Optical Coherence Tomography and Adaptive Optics 7139, 713915 (2008)
- Liang, H. *Advanced optical imaging methods for investigating manuscripts* (pp. 55-66). Archaeopress (2011).

- Liang, H., Lange, R., Howard, H., & Spooner, J. Non-invasive investigations of a wall painting using optical coherence tomography and hyperspectral imaging. In *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III* (Vol. 8084, p. 80840F). International Society for Optics and Photonics (2011).
- Liang, H., Sax, M., Saunders, D., & Tite, M. Optical coherence tomography for the non-invasive investigation of the microstructure of ancient Egyptian faience. *Journal of Archaeological Science*, 39(12), 3683-3690 (2012).
- Liang, H., Lange, R., Peric, B., & Spring, M. Optimum spectral window for imaging of art with optical coherence tomography. *Applied Physics B*, 111(4), 589-602 (2013)
- Liang, H., Burgio, L., Bailey, K., Lucian, A., Dilley, C., Bellesia, S., ... & Brooks, C. Culture and trade through the prism of technical art history: A study of Chinese export paintings. *Studies in Conservation*, 59(sup1), S96-S99 (2014).
- Liang, H., Cheung, C. S., Daniel, J. M. O., Tokurakawa, M., Clarkson, W. A., & Spring, M. High resolution fourier domain optical coherence tomography at 2 microns for painted objects. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology V* (Vol. 9527, p. 952705). International Society for Optics and Photonics (2015).
- Liang, H., Mari, M., Cheung, C. S., Kogou, S., Johnson, P., & Filippidis, G. Optical coherence tomography and non-linear microscopy for paintings—a study of the complementary capabilities and laser degradation effects. *Optics express*, 25(16), 19640-19653 (2017).
- Moretti, P., Iwanicka, M., Melessanaki, K., Dimitroulaki, E., Kokkinaki, O., Daugherty, M., ... & Cartechini, L. Laser cleaning of paintings: in situ optimization of operative parameters through non-invasive assessment by optical coherence tomography (OCT), reflection FT-IR spectroscopy and laser induced fluorescence spectroscopy (LIF). *Heritage Science*, 7(1), 44 (2019).
- Osipowicz, G., Orłowska, J., Piličiauskas, G., Piličiauskienė, G., Rannamäe, E., Cyrek, K., & Sylwestrzak, M. Stone Age technologies and human behaviors as reflected in decoration of osseous artefacts from the northern part of East-Central Europe. *Quaternary International* (2020).
- Poggialini, F., Fiocco, G., Campanella, B., Legnaioli, S., Palleschi, V., Iwanicka, M., ... & Albano, M. Stratigraphic analysis of historical wooden samples from ancient bowed string instruments by laser induced breakdown spectroscopy. *Journal of Cultural Heritage*. (2020).
- Read, M., Cheung, C. S., Ling, D., Korenberg, C., Meek, A., Kogou, S., & Liang, H. A non-invasive investigation of Limoges enamels using both Optical Coherence Tomography (OCT) and spectral imaging: a pilot study. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII* (Vol. 11058, p. 1105803). International Society for Optics and Photonics (2019).
- Rouba, B., Karaszkiwicz, P., Tymioska-Widmer, L., Iwanicka, M., Góra, M., Kwiatkowska, E., & Targowski, P. Optical coherence tomography for non-destructive investigations of structure of objects of art. *J Nondestructive Testing*, 13 (2008).
- Spring, M., Liang, H., Peric, B., Saunders, D., Podoleanu, A., Proceedings of ICOM-CC Triennial Conference II, 633–639 (2008).
- Striova, J., Salvadori, B., Fontana, R., Sansonetti, A., Barucci, M., Pampaloni, E., ... & Colombini, M. P. Optical and spectroscopic tools for evaluating Er: YAG laser removal of shellac varnish. *Studies in Conservation*, 60(sup1), S91-S96 (2015).

- Striova, J., Fontana, R., Barucci, M., Felici, A., Marconi, E., Pampaloni, E., ... & Riminesi, C. Optical devices provide unprecedented insights into the laser cleaning of calcium oxalate layers. *Microchemical Journal*, 124, 331-337 (2016).
- Striova, J., Dal Fovo, A., Fontani, V., Barucci, M., Pampaloni, E., Raffaelli, M., & Fontana, R. Modern acrylic paints probed by optical coherence tomography and infrared reflectography. *Microchemical Journal*, 138, 65-71 (2018).
- Sylwestrzak, M., Szlag, D., Marchand, P. J., Kumar, A. S., & Lasser, T. Massively parallel data processing for quantitative total flow imaging with optical coherence microscopy and tomography. *Computer Physics Communications*, 217, 128-137 (2017).
- Szkulmowska, A., Góra, M., Targowska, M., Rouba, B., Stifter, D., Breuer, E., & Targowski, P. Applicability of optical coherence tomography at 1.55 μm to the examination of oil paintings. *Lasers in the Conservation of Artworks*, 487-492 (2007).
- Targowski, P., Rouba, B., Wojtkowski, M., A. Kowalczyk, A. The application of optical coherence tomography to non-destructive examination of museum objects. *Studies in Conservation*, 49(2), 107-114 (2004).
- Targowski, P., Gora, M., & Wojtkowski, M. Optical coherence tomography for artwork diagnostics. *Laser chemistry* (2006).
- Targowski, P., Gora, M., Bajraszewski, T., Szkulmowski, M., Rouba, B., Łękawa-Wysłouch, T., & Tyimińska-Widmer, L. Optical coherence tomography for tracking canvas deformation. *Laser chemistry*, (2006).
- Targowski, P., Bajraszewski, T., Gorczynska, I., Góra, M., Szkulmowska, A., Szkulmowski, M., ... & Kowalczyk, A. Spectral optical coherence tomography for nondestructive examinations. *Optica Applicata*, 36(4), 609 (2006).
- Targowski, P., Rouba, B., Góra, M., Tyimińska-Widmer, L., Marczak, J., & Kowalczyk, A. Optical coherence tomography in art diagnostics and restoration. *Applied Physics A*, 92(1), 1-9 (2008)
- Targowski, P., Góra, M., Bajraszewski, T., Szkulmowski, M., Wojtkowski, M., Kowalczyk, A., ... & Iwanicka, M. Optical coherence tomography for structural imaging of artworks. In *Lasers in the Conservation of Artworks: Proceedings of the International Conference Lacona VII*, Madrid, Spain, 17-21 September 2007 (p. 61). CRC Press (2008).
- Targowski, P., Ostrowski, R., Marczak, J., Sylwestrzak, M., & Kwiatkowska, E. A. Picosecond laser ablation system with process control by optical coherence tomography. *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology II* 7391, 73910G (2009)
- Targowski, P., Kwiatkowska, E.A., Sylwestrzak, M., Marczak, J., Skrzeczanowski, W., Ostrowski, R., Szmit-Naud, E., Iwanicka, M. *Proceedings of the International Conference LACONA VIII: —Lasers in the Conservation of Artworks*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 143 (2009).
- Targowski, P., Rouba, B. J., Karaszkiwicz, P., Iwanicka, M., Tyimińska-Widmer, L., Łękawa-Wysłouch, T., ... & Sylwestrzak, M. Optyczna koherentna tomografia OCT-nowe narzędzie do działań konserwatorskich i inwentaryzacyjnych. *Wiadomości konserwatorskie*, 94-107 (2009).
- Targowski, P., Iwanicka, M., Tyimińska-Widmer, L., Sylwestrzak, M., & Kwiatkowska, E. A. Structural examination of easel paintings with optical coherence tomography. *Accounts of chemical research*, 43(6), 826-836 (2010).

Targowski, P., & Iwanicka, M. Optical coherence tomography: its role in the non-invasive structural examination and conservation of cultural heritage objects—a review. *Applied Physics A*, 106(2), 265-277 (2012).

Targowski, P., Iwanicka, M., Sylwestrzak, M., Kaszewska, E. A., & Frosinini, C. OCT structural examination of Madonna dei Fusi by Leonardo da Vinci. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology IV* (Vol. 8790, p. 87900N). International Society for Optics and Photonics (2013).

Targowski, P., Pronobis-Gajdzis, M., Surmak, A., Iwanicka, M., Kaszewska, E. A., & Sylwestrzak, M. The application of macro-X-ray fluorescence and optical coherence tomography for examination of parchment manuscripts. *Studies in Conservation* 60(sup1), S167-S177 (2015).

Targowski, P., Iwanicka, M., Rouba, B. J., & Frosinini, C. OCT for Examination of Artwork. *opt*, 2473 (2015).

Targowski, P., Iwanicka, M., Sylwestrzak, M., Frosinini, C., Striova, J., & Fontana, R. Using Optical Coherence Tomography to Reveal the Hidden History of The Landsdowne Virgin of the Yarnwinder by Leonardo da Vinci and Studio. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(25), 7396-7400 (2018).

Targowski, P., Kowalska, M., Sylwestrzak, M., & Iwanicka, M. OCT for examination of cultural heritage objects (2019).

Thickett, D., Cheung, C. S., Liang, H., Twydale, J., Maev, R. G., & Gavrilov, D. Using non-invasive non-destructive techniques to monitor cultural heritage objects. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 59(5), 230-234 (2017).

Tong, R., Hu, M., Liu, X., Zhang, Q., Ge, H., Gang, T., ... & Bian, C. Spectral-domain optical coherence tomography for the non-invasive investigation of the pigment layers of Tang Dynasty tomb murals exhibited in museums. *Optik*, 199, 163311 (2019).

van den Berg, K. J., Hendriks, E., Geldof, M., de Groot, S., van der Werf, I., Miliani, C., ... & Targowski, P. Structural and Chemical Composition of the Surface Layers in the Amsterdam Sunflowers. *Van Gogh Museum Studies*, 1. (2019).

Vichi, A., Artesani, A., Cheung, C. S., Piccirillo, A., Comelli, D., Valentini, G., ... & Liang, H. An exploratory study for the noninvasive detection of metal soaps in paintings through optical coherence tomography. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII* (Vol. 11058, p. 1105805). International Society for Optics and Photonics (2019).

Xu, B., He, K., Hao, P., Gao, J., Willomitzer, F., Katsaggelos, A. K., ... & Walton, M. S. Time-domain optical coherence tomography can measure artworks with high penetration and high resolution. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII* (Vol. 11058, p. 110580M). International Society for Optics and Photonics (2019).

Yang, M.L., Lu, C.-W., Hsu, I.-J., Yang, C.C. The Use of Optical Coherence Tomography for Monitoring the Subsurface Morphologies of Archaic Jades, *Archaeometry*, 46, 171-182 (2004).

Yang, M. L., Winkler, A. M., Barton, J. K., & Vandiver, P. B. Using optical coherence tomography to examine the subsurface morphology of Chinese glazes. *Archaeometry*, 51(5), 808-821 (2009).

Yang, M. L., Winkler, A. M., Klein, J., Wall, A., & Barton, J. K. Using optical coherence tomography to characterize the crack morphology of Ceramic Glaze and Jade. *Selected topics in optical coherence tomography*, 261-280 (2012).

Yang, M., Winkler, A. M., Klein, J., & Barton, J. K. Using optical coherence tomography to characterize thick-glaze structure: Chinese Southern Song Guan glaze case study. *Studies in conservation*, 57(2), 67-75 (2012).

Yang, M. L., Katz, J. I., Barton, J., Lai, W. L., & Jean, J. H. Using Optical Coherence Tomography to Examine Additives in Chinese Song Jun Glaze. *Archaeometry*, 57(5), 837-855 (2015).

Zorin, I., Kilgus, J., Su, R., Lendl, B., Brandstetter, M., & Heise, B. Multimodal mid-infrared optical coherence tomography and spectroscopy for non-destructive testing and art diagnosis. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII* (Vol. 11058, p. 110580N). International Society for Optics and Photonics (2019).

