



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ

ΣΠΟΥΔΩΝ

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2016-17



Πολυτεχνείο
Κρήτης

ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ

Τμήμα Στρατιωτικών

Επιστημών

ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (SYSTEMS

ENGINEERING)

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Μηχανικών

Παραγωγής &

Διοίκησης

(ΠΔ 96 /2015/ΦΕΚ 163Α/20.08.2014)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συστήματα παραγωγής, ανίχνευσης και εφαρμογές

Τερακυματικής (THz) Ακτινοβολίας

Current trends in THz Technology and Applications

Υπο:

Παύλου Π. Μάντζιου

ΑΜ: 2017018009

Επιβλέπουσα

Καθηγήτρια Καρανάσιου Ειρήνη

Ιούλιος 2021

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

Η μεταπτυχιακή διατριβή του Παύλου Π. Μάντζιου εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγήτρια Καρανάσιου Ειρήνη (Επιβλέπουσα)

Καθηγητής Διονύσιος Μουζάκης

Καθηγητής Νικόλαος Ματσατσίνης

**Nikolaos
Matsatsinis**

Digitally signed by
Nikolaos Matsatsinis
Date: 2021.07.06
18:37:56 +03'00'

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

© Copyright υπό Παύλου Π. Μάντζιου

Έτος 2021

Στην Οικογένειά μου

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αν. Καθηγήτρια της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων Δρ. Καρανάσιου Ειρήνη για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για την προθυμία της να με καθοδηγήσει στις απορίες ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Όλγα για την υποστήριξη και την αμέτρητη κατανόηση που έδειξε καθώς και τα παιδιά μου Ελένη, Τηλέμαχο, Μαρία και Παρασκευή για τις ώρες που μου χάρισαν προκειμένου να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Τέλος θέλω να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κ. Νικόλα Δάρα, Κοσμήτορα της ΣΣΕ 2015-2019, που μου έδωσε την δυνατότητα συμμετοχής στο ΔΔΠΜΣ της ΣΣΕ και του Πολυτεχνείου Κρήτης καθώς και για την αμέριστη συμπαράστασή του όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Στόχοι εργασίας	13
2. Δομή εργασίας	13
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Τερακυματική ακτινοβολία THz – Αρχές χρησιμοποίησης.....</i>	<i>15</i>
1. Γενικά.....	15
2. Ιστορική Αναδρομή	18
3. Ορισμοί – Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.....	20
4. Αρχές χρησιμοποίησης Τερακυματικής ακτινοβολίας	23
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Τεχνικές παραγωγής και ανίχνευσης κυμάτων THz</i>	<i>24</i>
1. Αρχή λειτουργίας απεικόνισης με την βοήθεια κυμάτων THz.....	24
2. Παραγωγή κυμάτων Thz.....	25
3. Ανίχνευση κυμάτων Thz.....	30
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Εφαρμογές - Πειράματα Συστημάτων Thz</i>	<i>40</i>
<i>Βιβλιογραφία</i>	<i>78</i>

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διατριβής αποτελεί η παρουσίαση και ανάλυση της τεχνολογίας αιχμής συστημάτων παραγωγής και ανίχνευσης της Τερακυματικής (Terahertz (THz)) ακτινοβολίας σε συνδυασμό με την παράθεση των σύγχρονων εφαρμογών της. Πριν επισημανθούν τα σημαντικά ερευνητικά πορίσματα που προέκυψαν από την μελέτη της βιβλιογραφίας, θεωρήθηκε σκόπιμο να διατυπωθεί η νοηματοδότηση των βασικότερων εννοιών της παρούσας έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, η ακτινοβολία THz μπορεί να αναλυθεί ως η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στη φασματική περιοχή συχνοτήτων από 0.3 έως 10 THz (μήκους κύματος 1mm – 30μm) που διαρθρώνεται ως το επόμενο σύνορο για την επιστήμη και την τεχνολογία. Παράλληλα, η σημασία της αποδεικνύεται και από το γεγονός ότι έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή για την ικανότητα ανίχνευσης και τις μη επεμβατικές και μη ιοντικές ιδιότητες.

Η εφαρμογή της Τερακυματικής τεχνολογίας απαντάται σε ένα πλήθος επιστημονικών πεδίων εφαρμογής και εξαιτίας αυτού, αποτελεί έναν κλάδο στον οποίο υφίστανται συνεχείς εξελίξεις. Την ίδια στιγμή, η σπουδαιότητά της προσδίδει μεγαλύτερη αξία στο ίδιο το περιεχόμενο του παρόντος επιστημονικού πονήματος, αν λάβει κανείς υπόψιν του τις εξελίξεις που εμφανίζονται την τρέχουσα χρονική περίοδο με τις αυξημένες προκλήσεις και ανάγκες στον χώρο της ιατρικής, της φαρμακευτικής, της τεχνολογίας, της βιοτεχνολογίας κ.α.

Η εργασία αυτή διαρθρώνεται σε επιμέρους κεφάλαια προκειμένου να γίνει πιο εμπεριστατωμένη αναζήτηση των ειδικότερων πτυχών της Τερακυματικής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται τα γενικότερα στοιχεία που συναπαρτίζουν και συνθέτουν τον ορισμό και τα χαρακτηριστικά της εν λόγω ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια στο δεύτερο κεφάλαιο επισημαίνονται οι τεχνικές παραγωγής και ανίχνευσης της, ενώ παράλληλα καταγράφεται και μια πιο ενδελεχής ανάλυση της τεχνολογίας των THz. Ολοκληρώνοντας, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι εφαρμογές των συστημάτων THz και ειδικότερα η αναδυόμενη τεχνολογία των THz τόσο στη βιοϊατρική όσο και σε τομείς ασφαλείας, μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT), ελέγχου ποιότητας τροφίμων κ.ά.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation is the analysis of the state-of-the-art technology associated with the generation and detection of Terahertz (THz) radiation systems and its current applications. THz radiation is the electromagnetic radiation in the spectral range of frequencies from 0.3 to 10 THz (wavelength 1mm - 30 μ m) and is the long- term and promising frontier for science and technology. At the same time, it has attracted significant attention due to its detection ability and non-invasive and non-ionizing properties. THz technology is an ever-evolving research area, which through its technology, has applications in many scientific fields.

The content of the present thesis gains a respectable amount of attention and value, given the current situation that is presented through the increased challenges and needs in the fields of medicine, pharmacy, biotechnology, etc.

In particular, the first chapter includes the basic principles of the definition and the characteristics of THz radiation. Furthermore, in the second chapter the techniques of generation and detection of this radiation as well as the analysis of THz technology are presented. Finally, the third chapter is dedicated to a more detailed presentation of the applications of THz systems and in particular the emerging technology of THz that are used in many fields, such as the biomedicine, in the areas of plant safety, non-destructive testing (NDT), food quality control and security.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Τερακυματική ακτινοβολία συγκεντρώνει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον από διάφορες επιστήμες, καθώς έχει ιδιαίτερα σημαντικές δυνατότητες ανίχνευσης, ενώ, την ίδια στιγμή, μεγάλο της όφελος είναι το γεγονός ότι δεν είναι καταστροφική και ιονίζουσα. Με βάση αυτή την θέση, οι εφαρμογές της Τερακυματικής ακτινοβολίας μπορούν να προσφέρουν πλήθος θετικών αποτελεσμάτων σε πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής, γεγονός που αποδεικνύεται από το ότι συναντάται στην ιατρική, στην παραγωγή φαρμάκων, στις επικοινωνίες, στον ποιοτικό έλεγχο, ειδικά των τροφίμων, και σε πλειάδα άλλων τομέων όπου απαιτείται η πλήρης απεικόνιση του αντικειμένου χωρίς ποιοτικά να απαιτείται για την ακρίβεια του ελέγχου, η καταστροφή του αντικειμένου.

Τα τελευταία χρόνια έχουν σημειωθεί σημαντικές εξελίξεις γύρω από την εφαρμογή της Τερακυματικής ακτινοβολίας. Οι εξελίξεις αυτές συνιστούν αποτέλεσμα της προόδου σε άλλα τεχνολογικά επιτεύγματα, καθιστώντας πιο εφικτό στο επιστημονικό παρόν το σενάριο της ευρείας εφαρμογής της Τερακυματικής ακτινοβολίας, με προσδοκώμενα σημαντικά οφέλη.

1. Στόχοι εργασίας

Στην παραπάνω παράγραφο αναφέρθηκε η σημασία της Τερακυματικής ακτινοβολίας, οι εφαρμογές της καθώς και τα χαρακτηριστικά της που προδιαγράφουν σημαντικά οφέλη. Επιπλέον, αναφέρθηκε η πρόσφατη ανάπτυξη της Τερακυματικής ακτινοβολίας με επιτεύγματα μόλις των τελευταίων ετών.

Στόχος της παρούσης εργασίας είναι η ανασκόπηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας γύρω από την Τερακυματική ακτινοβολία και η ανάδειξη όχι μόνο των πλεονεκτημάτων αυτής έναντι άλλων τεχνολογιών, αλλά και η πρακτική εφαρμογή της σε διάφορους τομείς, όπως αυτός της ιατρικής και της ασφάλειας.

2. Δομή εργασίας

Μετά από το παρόν εισαγωγικό τμήμα ακολουθεί το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας όπου περιγράφονται γενικότερα στοιχεία που συνθέτουν τον ορισμό και τα χαρακτηριστικά της Τερακυματικής ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται οι τεχνικές παραγωγής και ανίχνευσης της εν λόγω ακτινοβολίας καθώς και η ανάλυση της τεχνολογίας των THz.

Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι εφαρμογές των συστημάτων Τερακυματικής ακτινοβολίας και ειδικότερα η αναδυόμενη τεχνολογία της Τερακυματικής ακτινοβολίας τόσο στη βιοϊατρική όσο και σε τομείς ασφαλείας εγκαταστάσεων, μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT), ελέγχου ποιότητας τροφίμων κα.

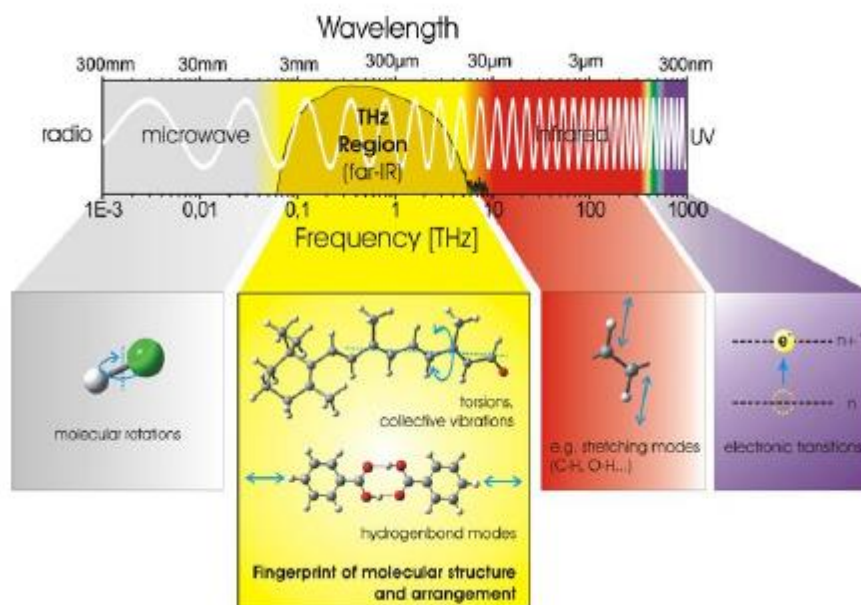
Η παρούσα εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα και τον επίλογο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Τερακυματική ακτινοβολία THz – Αρχές χρησιμοποίησης

1. Γενικά

Παραδοσιακά, η φασματοσκοπία στην περιοχή της Τερακυματικής ακτινοβολίας ήταν μια κατάκτηση της επιστήμης που στα αρχικά στάδια θεωρούνταν δύσκολη έως και ακατόρθωτη, γεγονός που διαφαίνεται από το ότι μόλις τα τελευταία χρόνια έγιναν σημαντικά βήματα στην κατασκευή πηγών παραγωγής κυμάτων Τερακυματικής ακτινοβολίας και ανιχνευτών των κυμάτων αυτής. Πιο συγκεκριμένα, οι παραδοσιακές πηγές ακτινοβολίας μελανών σωμάτων, τείνουν να χάνουν την αποδοτικότητά τους, όταν τα εκπεμπόμενα κύματα πλησιάζουν στην περιοχή της Τερακυματικής ακτινοβολίας, ενώ όσον αφορά στην ανίχνευση των κυμάτων της, μέχρι πρότινος, χρησιμοποιούνταν ως επί το πλείστον βολόμετρα, τα οποία ήταν κρυογονικά ψυχόμενα, χάρη στην ιδιαίτερα μεγάλη ευαισθησία τους. (Ikeda, Ishihara, Moriwaki, Kato, & Terada, 2010)

Παρακάτω, στην εικόνα 1, δίδεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και τα αντίστοιχα μήκη κύματος, ενώ με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται η περιοχή της Τερακυματικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Sizon, 2019)

Την ίδια στιγμή, οι συνθήκες στους χώρους όπου υλοποιούνταν απεικονίσεις με φασματοσκοπία δεν ευνοούσαν τη χρήση της Τερακυματικής ακτινοβολίας, καθώς σε θερμοκρασία δωματίου τα δομικά υλικά και ο εξοπλισμός των χώρων αυτών εκπέμπουν και αντανακλούν τα κύματα αυτής, εισάγοντας θόρυβο και κατ' επέκταση αλλοιώνοντας τις παραγόμενες απεικονίσεις. Από τις παραπάνω δυσκολίες προκύπτει αβίαστα το

συμπέρασμα ότι η χρήση της Τερακυματικής ακτινοβολίας είχε καταστεί δύσκολη υπόθεση και οι συνθήκες δεν επέτρεπαν την ευρεία χρήση της σε καίριους τομείς που χρησιμοποιούνται σωρηδόν οι απεικονίσεις όπως συμβαίνει στην ιατρική και στην πυρηνική Φυσική.

Οι παραπάνω επιστημονικές δυσχέρειες φαίνεται ότι άρχισαν να ξεπερνιούνται στο διάστημα των τελευταίων δύο δεκαετιών, κατόπιν σημαντικών προόδων στην τεχνολογία των ημιαγωγικών στοιχείων και άλλων τεχνολογικών εξελίξεων, οι οποίες παρέχουν τα αποτελεσματικά εργαλεία για την καλύτερη εφαρμογή της Τερακυματικής ακτινοβολίας (Ferguson & Zhang, 2002). Πιο συγκεκριμένα, εφελτήριο μέγεθος της προόδου αποτέλεσε η ανάπτυξη των συστημάτων παλμικής φασματοσκοπίας και των συστημάτων παλμικής απεικόνισης Τερακυματικής ακτινοβολίας, τα οποία στη διεθνή βιβλιογραφική ανασκόπηση περιγράφονται εν συντομία ως συστήματα (Terahertz pulsed spectroscopy - TPS) και ως συστήματα (terahertz pulsed imaging - TPI) Τερακυματικής ακτινοβολίας, αντίστοιχα.

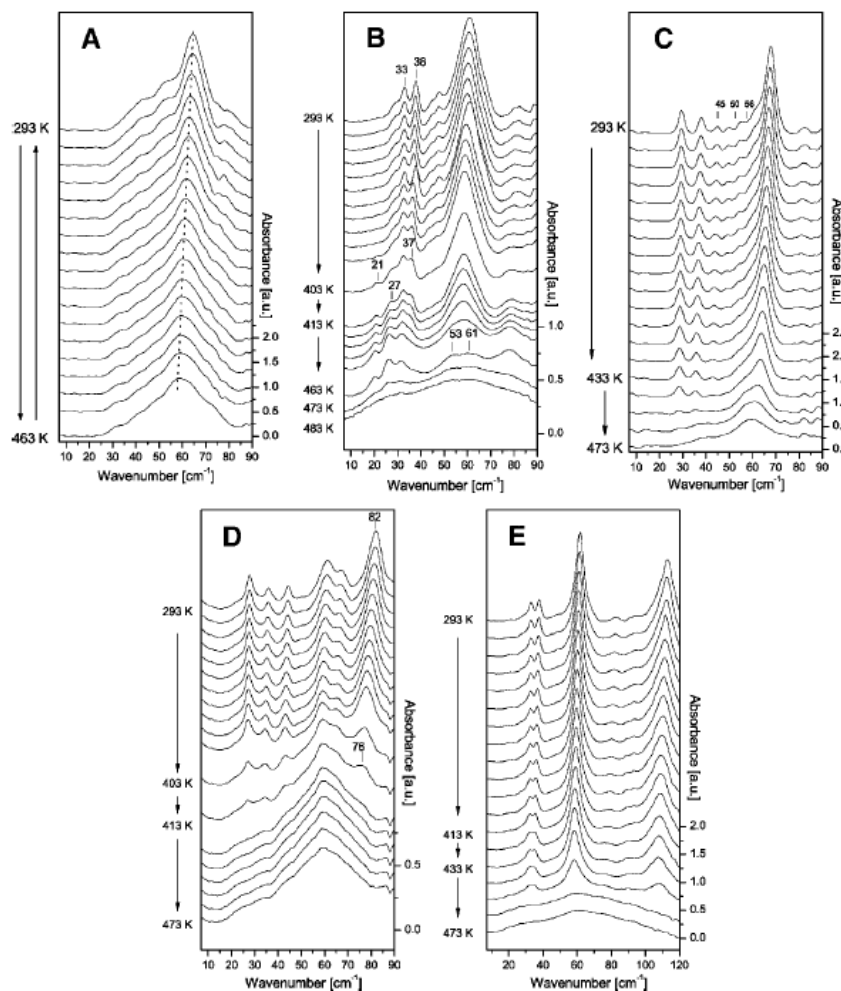
Τα παραπάνω συστήματα βασίζονται στις ίδιες αρχές λειτουργίας με τα συστήματα φασματοσκοπίας και απεικόνισης με άλλες ακτινοβολίες, καθώς χρησιμοποιούν λέιζερ με συχνότητα εκπομπής ή ανίχνευσης παλμών της τάξης των fs (εκπομπή ή ανίχνευση ενός παλμού ανά $10E^{-15}$ δευτερόλεπτα).

Στα συστήματα παλμικής φασματοσκοπίας Τερακυματικής ακτινοβολίας εντοπίστηκαν τρία κομβικά πλεονεκτήματα:

Πρώτον, τα συστήματα αυτά έχουν την ικανότητα να μετρούν άμεσα την τιμή του THz ηλεκτρικού πεδίου και ο συντελεστής διάθλασης του υπό μέτρηση δοκιμίου. Χάρη σε αυτή τη δυνατότητα, παράγονται και ανιχνεύονται κύματα σε μεγάλα φάσματα τα οποία προσφέρουν πολύ καλύτερη ευαισθησία και δυναμικό εύρος απεικόνισης συγκριτικά με τις τεχνικές απεικόνισης με υπέρυθρη ακτινοβολία. Έτσι, τα κύματα παράγονται και ανιχνεύονται σε χρόνο που δεν ξεπερνά τα 20ms, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η κρυογονική ψύξη του χρησιμοποιούμενου βολόμετρου. (Han, et al., 2001), (Zeitler, et al., 2007)

Δεύτερον, χάρη στη συνεκτική αυτή τεχνολογία ανίχνευσης, ελαχιστοποιείται ο εξωτερικός θόρυβος του περιβάλλοντος, ο οποίος, όπως προαναφέρθηκε, δημιουργείται από τον χώρο όπου πραγματοποιείται η φασματοσκοπία. Αποτέλεσμα αυτής της επιστημονικής κατάκτησης συνιστά η για πρώτη φορά χρήση φασματοσκοπίας

Τερακυματικής ακτινοβολίας για την απεικόνιση δειγμάτων σε θερμοκρασίες δωματίου αλλά και σε μεγαλύτερες έως ακραίες θερμοκρασίες. Η σπουδαιότητα που αυτή κατέχει διαφαίνεται από το γεγονός ότι επιτρέπει τον έλεγχο και την καταγραφή των αλλαγών φάσης των υλικών και ειδικά των στερεών συστατικών τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή φαρμάκων (Εικόνα 2). (Zeitler, et al., 2006)



Εικόνα 2: Αλλαγή μορφής φαρμακευτικού στερεού Sulfathiazole κατόπιν θέρμανσης από τους 293K στους 463K, ψύξη πίσω σε θερμοκρασία δωματίου και εκ νέου στους 473K (A: Φάση I, B: Φάση II, C: Φάση III, D: Φάση IV, E: Φάση V) (Zeitler, et al., 2006)

Κατά τρίτο λόγο, η χρήση συστημάτων παλμικής φασματοσκοπίας και απεικόνισης Τερακυματικής ακτινοβολίας επιτρέπει την χρονική καταγραφή των αλλαγών των φάσεων των σωμάτων που απεικονίζονται, και επιτρέπει τον μη καταστρεπτικό έλεγχο του εσωτερικού τους.

Η ανάπτυξη των συστημάτων TPS και TPI διάνοιξε νέους ορίζοντες για όλους τους κλάδους στους οποίους απαιτείται ο μη καταστρεπτικός έλεγχος των στερεών, επιτρέποντας μάλιστα την απεικόνιση των διαδοχικών αλλαγών μορφών, όπως είναι ο

φαρμακευτικός τομέας, αλλά και άλλοι τομείς όπως η βιομηχανία τροφίμων. (Zeitler, et al., 2006), (Shen, 2010)

2. Ιστορική Αναδρομή

Κρίθηκε σκόπιμο εν συνεχεία να πραγματοποιηθεί μία σύντομη αναδρομή στην ιστορία της Τερακυματικής ακτινοβολίας. Μέχρι πριν κάποια χρόνια, αυτή θεωρούνταν το τελευταίο ανεξερεύνητο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Περίπου μέχρι τη δεκαετία του '90, η εκμετάλλευση του φάσματος στις τερακυματικές συχνότητες φάνταζε δύσκολη και ήταν ιδιαίτερα πολύπλοκη, κυρίως λόγω της έλλειψης κατάλληλων πηγών και ανιχνευτών. Η αδυναμία αυτή έχει πλέον ξεπεραστεί και οι απαραίτητες πηγές και ανιχνευτές διατίθενται εμπορικά, ενώ υπάρχει παράλληλα και έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον στο πεδίο της Τερακυματικής ακτινοβολίας.

Οι πρώτες έρευνες για την Τερακυματική ακτινοβολία πραγματοποιήθηκαν με αυτήν να εξετάζεται ως μέγεθος πέρα από την υπέρυθη ακτινοβολία ή κύματα με μήκος τάξης μεγέθους κλάσματος του χιλιοστού. Στον αντίποδα, οι πρώτες εφαρμογές της εντοπίζονται στη μελέτη της κοσμικής υπέρ-υπέρυθρης ακτινοβολίας και στον τομέα της ανάπτυξης λείζερ για την μελέτη της συμπεριφοράς του πλάσματος.

Παρακάτω παρατίθενται κάποια κεντρικά ορόσημα της ιστορικής εξέλιξης της Τερακυματικής ακτινοβολίας: (Sizon, 2019), (Davis, Linfield, & Jonston, 2002)

Το 1897, οι ερευνητές Rubens H. και Nichols E.F. παρατήρησαν ένα κενό στο γνωστό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, μεταξύ της περιοχής του ορατού φάσματος και της περιοχής του ηλεκτρονικού φάσματος.

Μέχρι το 1948 και μετά την εφεύρεση του μικροκυματικού ραντάρ, το πεδίο της Τερακυματικής ακτινοβολίας ήταν ήδη αρκετά ώριμο και δρομολογούνταν από την ανάγκη ανάπτυξης των εφαρμογών που σχετίζονταν με τη βελτίωση των αποδόσεων των ραντάρ.

Το 1954, ερευνητές κατάφεραν να δημιουργήσουν και να ανιχνεύσουν ακτίνες σε συχνότητα που ξεπερνούσε τα 300GHz.

Το 1960 παράχθηκε η πρώτη απεικόνιση με χρήση Τερακυματικής ακτινοβολίας.

Στα τέλη της δεκαετίας του '60 ανακαλύφθηκε η φασματοσκοπία χρόνου στα πλαίσια έρευνας που μελετούσε την μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς και της μαγνητικής διαπερατότητας γραμμικών υλικών όταν αυτά ακτινοβολούνταν με ευρύ φάσμα μικροκυματικών συχνοτήτων. (Nicolson, 1968)

Το 1995 εφαρμόστηκε για πρώτη φορά η φασματοσκοπία χρόνου (Time-domain spectroscopy - TDS) και δημιουργήθηκε η πρώτη απεικόνιση με την τεχνολογία αυτή. Το κατόρθωμα αυτό κέντρισε το ενδιαφέρον των ερευνητών και αποτέλεσε την απαρχή εντατικής έρευνας στο πεδίο της Τερακυματικής ακτινοβολίας.

Μετά το 2000 ξεκίνησαν οι πρώτες δοκιμές εφαρμογής της Τερακυματικής ακτινοβολίας στις τηλεπικοινωνίες με χρήση πομπών και δεκτών ακτινών λέιζερ. Η μέγιστη απόσταση μετάδοσης του σήματος με συχνότητα 120GHz με εύρος ζώνης μετάδοσης των δεδομένων περί τα 18GHz ξεπέρασε τα 5 χιλιόμετρα προσφέροντας ταυτόχρονα ταχύτητες μετάδοσης από 10 έως 20Gbit/s.

Το 2002, η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency - ESA) αναπαρήγαγε την πρώτη απεικόνιση ενός ολόκληρου χεριού με χρήση Τερακυματικής ακτινοβολίας.

Το 2004, κυκλοφόρησε η πρώτη κάμερα με χρήση Τερακυματικής ακτινοβολίας για την ανίχνευση επικίνδυνων φορτίων και όπλων σε δημόσιους χώρους ακόμη και μέσα από τα ρούχα των ανθρώπων.

Το 2007, επιστήμονες εργαστηρίου του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ, σε συνεργασία με ομάδες επιστημόνων από την Ιαπωνία και την Τουρκία, ανακοίνωσαν ότι κατάφεραν να κατασκευάσουν φορητές γεννήτριες ακτινών T, οι οποίες λειτουργούσαν με μπαταρία.

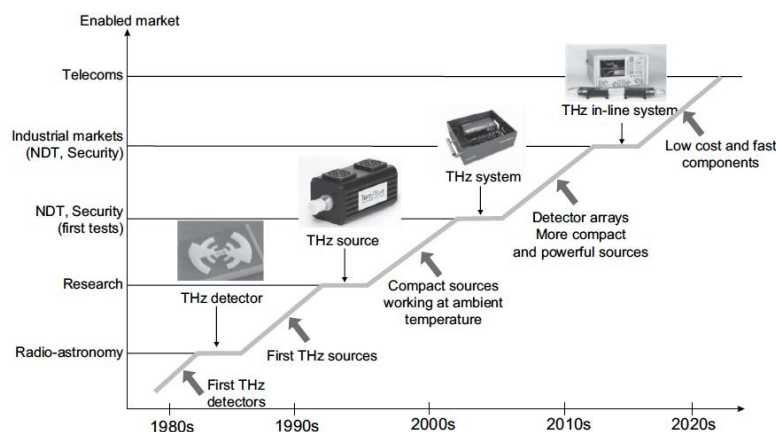
Το 2008, μηχανικοί του Πανεπιστημίου Harvard ανακάλυψαν ότι σε θερμοκρασία δωματίου, μπορεί να δημιουργηθούν ακτίνες T με ισχύ της τάξεως των εκατοντάδων nW, με χρήση μιας πηγής αποτελούμενης από ημιαγωγούς. Η πηγή αυτή συνδύαζε ένα πολύ ταχύ λέιζερ μαζί με ένα δίπολο ημιαγωγών. Η ανακάλυψη αυτή επέτρεψε την εγκατάλειψη των παλαιότερων πηγών οι οποίες απαιτούσαν εφαρμογή κρυογονικής ψύξης και περιόριζαν την εφαρμογή της Τερακυματικής ακτινοβολίας για την κάλυψη καθημερινών αναγκών.

Το 2009, ανακαλύφθηκε ότι κατά την αφαίρεση κολλητικής ταινίας από μια επιφάνεια, εκπέμπεται Τερακυματική ακτινοβολία με μέγιστη συχνότητα της τάξης από 2 THz έως και 18 THz. Η εκπομπή των ακτινών T οφείλεται στην αρχική φόρτιση της ταινίας με ενέργεια όταν αυτή κολλιέται σε μια επιφάνεια, η οποία απελευθερώνεται απότομα κατά την αφαίρεση της ταινίας.

Το 2011, μια ερευνητική ομάδα από το Πανεπιστήμιο της Osaka σε συνεργασία με μια εταιρεία κατασκευής ηλεκτρονικών παρήγαγε ένα τσιπ το οποίο μπορούσε να λειτουργεί με πολύ μεγάλη ταχύτητα (ίση με 1Gbit/s) χάρη στην εκμετάλλευση της Τερακυματικής ακτινοβολίας.

Το 2013, ερευνητές από το Πολυτεχνείο της Καταλονίας σε συνεργασία με ερευνητές από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Georgia ανέπτυξαν μία καινοτόμο μέθοδο για την παραγωγή κεραιών από γραφένιο. Η κεραία αποτελούνταν από μικροσκοπικές λωρίδες γραφένιου, πλάτους από 10 έως 100 nm και μήκους έως 1μm. Η κεραία αυτή θα μπορούσε να λειτουργήσει εκπέμποντας στην περιοχή συχνοτήτων της Τερακυματικής ακτινοβολίας.

Στην εικόνα 3 διαφαίνεται η ανάπτυξη των τεχνολογιών THz (Non-destructive testing (NDT)) και μη καταστρεπτικών δοκιμών/ελέγχων της τελευταίας 40ετίας. Η τεχνολογία Terahertz (THz) είναι μία από τις αναδυόμενες τεχνολογίες που θα αλλάξουν τη ζωή μας. Έχουν γίνει πολλές ελκυστικές εφαρμογές σε θέματα ασφάλειας, ιατρικής, βιολογίας, αστρονομίας και μη καταστρεπτικών υλικών. Ωστόσο, η πραγματοποίηση εκπομπών και δεκτών THz είναι μια νέα πρόκληση, μιας και οι συχνότητες είναι πολύ υψηλές για τα συμβατικά ηλεκτρονικά και οι ενέργειες των φωτονίων είναι πολύ μικρές για την κλασική οπτική.



Εικόνα 3: Ανάπτυξη τεχνολογιών THz. NDT, μη καταστρεπτική δοκιμή (Rogalski & Antoni, 2019)

3. Ορισμοί – Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Στις παρακάτω παραγράφους ο γράφων θεώρησε αναγκαία την απόδοση των ορισμών που πλαισιώνουν την έννοια της Τερακυματικής ακτινοβολίας, ενώ ταυτόχρονα γίνεται η προσπάθεια καταγραφής των εννοιών που άπτονται της εφαρμογής της.

Η περιοχή της Τερακυματικής ακτινοβολίας είναι η περιοχή που τοποθετείται μεταξύ των περιοχών χιλιοστών και υπέρυθρων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. (Wallace, et al., 2004)

Οι κύριες πηγές Τερακυματικής ακτινοβολίας είναι οι μοριακές περιστροφές, οι περιστροφές δεσμών χαμηλής συχνότητας, οι κρυσταλλικές δονήσεις φωτονίων, η λύση και η κάμψη δεσμών υδρογόνου. (Pickwell & Wallace, 2006)

Τα κύματα Τερακυματικής ακτινοβολίας, που συνήθως εντοπίζονται σε εύρος συχνοτήτων 0.1 - 10 THz και το μήκος κύματός τους κυμαίνεται από 3.3 έως 133 cm⁻¹, καλούνται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία και ως ακτίνες T. (Day, Zeitler, Jones, Rades, & Taday, 2006), (Shen, 2010)

Η πρόοδος στον κλάδο των ημιαγωγών και τα τεχνολογικά επιτεύγματα των δύο τελευταίων δεκαετιών άλλαξαν καθοριστικά το πεδίο της Τερακυματικής ακτινοβολίας και δημιούργησαν νέες δυνατότητες τόσο για την παραγωγή όσο και για την ανίχνευση των κυμάτων αυτής.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της Τερακυματικής ακτινοβολίας, το οποίο κέντριζε ανέκαθεν το ενδιαφέρον των ερευνητών, είναι το γεγονός ότι πρόκειται για μια μη ιονίζουσα ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να διαθέτει ένα σημαντικό προβάδισμα έναντι των άλλων ακτινοβολιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ιατρική (για ακτινογραφίες, αξονικές τομογραφίες, PET scans, κ.α.) και οι οποίες είναι ιονίζουσες. Βασικό πρόβλημα των τελευταίων αποτελεί το γεγονός ότι οι ιονίζουσες ακτινοβολίες ελλοχεύουν, από τη μία, τον κίνδυνο της πιθανής πρόκλησης παρενεργειών στους ασθενείς και στο ιατρικό προσωπικό, ενώ ταυτόχρονα αξιώνουν την ανάγκη λήψης ιδιαίτερων προστατευτικών μέτρων για το προσωπικό και τους ασθενείς, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και η μέριμνα της θέσπισης ανώτατων επιπέδων ακτινοβολίας που μπορεί να λάβει ο καθένας που εκτίθεται σε αυτές.

Επιπλέον, το εύρος συχνοτήτων και το μήκος κύματος στην περιοχή της Τερακυματικής ακτινοβολίας είναι κατάλληλο για την παραγωγή εξαιρετικής ακρίβειας απεικονίσεων, οι οποίες δίνουν στο ιατρικό προσωπικό τη δυνατότητα να ξεχωρίσουν με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια διάφορους τύπους ιστών, με αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση της ακρίβειας των διαγνώσεων. Ένα στοιχείο που εντάσσεται στα πλεονεκτήματά της συνιστά το γεγονός ότι στην περιοχή της Τερακυματικής ακτινοβολίας, τα κύματα δεν έχουν τόσο μεγάλη

διασπορά όσο τα κύματα στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας, χάρη στο μεγαλύτερο μήκος κύματός τους.

Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί ότι η απεικονιστική ανάλυση μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση της συχνότητας ή με εφαρμογή άλλων τεχνικών όπως η απεικόνιση σε εύρος συχνοτήτων του ορατού φάσματος. Χάρη στην μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης στα σώματα που ακτινοβολούνται, η Τερακυματική ακτινοβολία προσφέρει τη δυνατότητα παροχής λεπτομερών απεικονίσεων από βαθύτερους ιστούς από ό,τι είναι εφικτό με άλλες μεθόδους. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα σημαντικό στον προ εγχειρητικό προσδιορισμό της έκτασης ενός καρκινικού όγκου. Επιπλέον, προσφέρεται η δυνατότητα λήψης όχι μόνον αξονικών αλλά και τρισδιάστατων τομογραφιών με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ακρίβειας της απεικόνισης και ως εκ τούτου την ακριβέστερη διάγνωση. (Titova, και συν., 2013)

Το βασικότερο μειονέκτημα όμως έγκειται στο ότι το νερό απορροφά την ακτινοβολία THz σε πολύ μεγάλο ποσοστό και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να την καθιστά «άχρηστη» σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, απεικόνισης του εν των βάθει σώματος κ.α.

Η μετάδοση και η ανάκλαση είναι οι δύο τρόποι απεικόνισης και φασματοσκοπίας με χρήση Τερακυματικής ακτινοβολίας, οι οποίοι διαφοροποιούνται ανάλογα με το αν ο ανιχνευτής κυμάτων THz τοποθετείται πίσω ή μπροστά από το δείγμα που απεικονίζεται αντίστοιχα. Η μετάδοση επιλέγεται συχνότερα για τον προσδιορισμό των βασικών ιδιοτήτων των ιστών, όπως ο δείκτης διάθλασης και ο συντελεστής απορρόφησης της ακτινοβολίας, ιδιότητες οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στον χαρακτηρισμό του ιστού που απεικονίζεται.

Η φασματοσκοπία χρόνου THz με χρήση μετάδοσης παράγει ένα φάσμα το οποίο απεικονίζεται στον άξονα του χρόνου με αποτέλεσμα την παραγωγή απεικονίσεων με την μεταβολή του δείκτη απορρόφησης, του χρόνου μετάδοσης κ.α., οι οποίες έχουν πολύ μεγάλη ακρίβεια.

Το μέγεθος ιστού του δείγματος που απεικονίζεται πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση και επιλογή του κατάλληλου συστήματος απεικόνισης, με αποτέλεσμα την επιλογή συστημάτων μετάδοσης για δείγματα ιστών μικρού πάχους και την επιλογή συστημάτων ανάκλασης για δείγματα ιστών μεγαλύτερου πάχους. Με αυτόν τρόπο επιλέγεται εκείνο το σύστημα που ανταποκρίνεται κατάλληλα στις ανάγκες της διάγνωσης.

Για το λόγο αυτό, τα συστήματα ανίχνευσης με ανάκλαση χρησιμοποιούνται περισσότερο σε κλινικές απεικονίσεις, ενώ τα συστήματα ανίχνευσης με μετάδοση χρησιμοποιούνται περισσότερο για εργαστηριακούς σκοπούς. (Bowman, El-Shenawee, & Campbell, 2016)

4. Αρχές χρησιμοποίησης Τερακυματικής ακτινοβολίας

Στο πεδίο του χρόνου, με την φασματοσκοπική τεχνική της Τερακυματικής φασματοσκοπίας ερευνώνται οι ιδιότητες ενός υλικού με τη χρήση βραχέων παλμών Τερακυματικής ακτινοβολίας. Το σύστημα το οποίο θα ανιχνεύσει την προσπίπτουσα ακτινοβολία θα πρέπει να διαθέτει υψηλή ευαισθησία ως προς το πλάτος και τη φάση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε επίδραση του δείγματος. Επομένως με την τεχνική αυτή παρέχονται περισσότερες πληροφορίες του δείγματος από τα συμβατικά φασματοσκόπια μετασχηματισμού Φουριέ. (Μπολάκης, 2017)

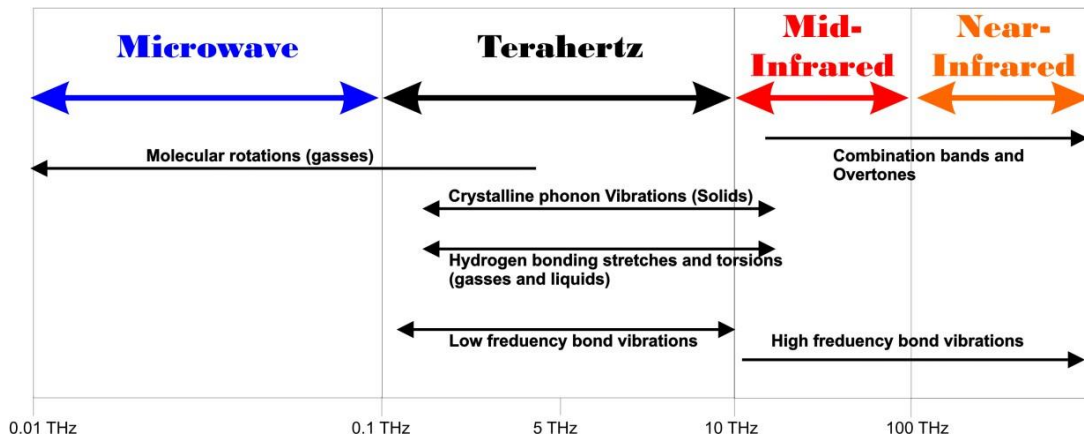
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Τεχνικές παραγωγής και ανίχνευσης κυμάτων THz**1. Αρχή λειτουργίας απεικόνισης με την βοήθεια κυμάτων THz**

Όπως συμβαίνει στη φασματοσκοπία και με ακτινοβολίες σε άλλες περιοχές συχνοτήτων, η φασματοσκοπία με Τερακυματική ακτινοβολία βασίζεται στην παρατήρηση των αλλαγών σε ένα κύμα το οποίο ανακλάται από το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Το πιο κοινά χρησιμοποιούμενο σύστημα φασματοσκοπίας με χρήση Τερακυματικής ακτινοβολίας είναι το σύστημα φασματοσκοπίας στο πεδίο του χρόνου THz, το οποίο στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS). (Mickan, Abbott, Munch, Zhang, & Van Doorn, 2000)

Η ενέργεια δεν επαρκεί για να προκαλέσει μοριακές δονήσεις αλλά επαρκεί για να προκαλέσει την περιστροφή των μορίων στο εύρος συχνοτήτων της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Τα φωτόνια που κινούνται σε συχνότητες Τερακυματικής ακτινοβολίας έχουν επαρκή ενέργεια για να εκκινήσουν τη δόνηση των μορίων και να προκαλέσουν τη διάταση των μοριακών δεσμών ή να προκαλέσουν κινήσεις συστρώφης, οι οποίες γενικώς απαιτούν μικρότερα επίπεδα ενέργειας. (McGoverin, Rades, & Gordon, 2008)

Αποτέλεσμα της υψηλής ενέργειας των κυμάτων της Τερακυματικής ακτινοβολίας είναι ότι η ενέργεια αυτή υπερνικά τους δεσμούς που συγκρατούν τους μοριακούς δεσμούς, με αποτέλεσμα η Τερακυματική ακτινοβολία να μπορεί να διεγείρει τους δεσμούς των φωτονίων και να προκαλέσει χαρακτηριστικά μοτίβα ή καμπύλες απορρόφησης της ακτινοβολίας.

Παρακάτω, στην εικόνα 4 αναπαρίστανται οι αλλαγές στη μοριακή κατάσταση και οι αντίστοιχες περιοχές συχνοτήτων όταν τα μόρια ακτινοβολούνται με κύματα στην περιοχή της Τερακυματικής ακτινοβολίας.



Εικόνα 4: Αλλαγές στη μοριακή κατάσταση στην περιοχή της Τερακυματικής ακτινοβολίας (Pickwell & Wallace, 2006)

2. Παραγωγή κυμάτων Thz

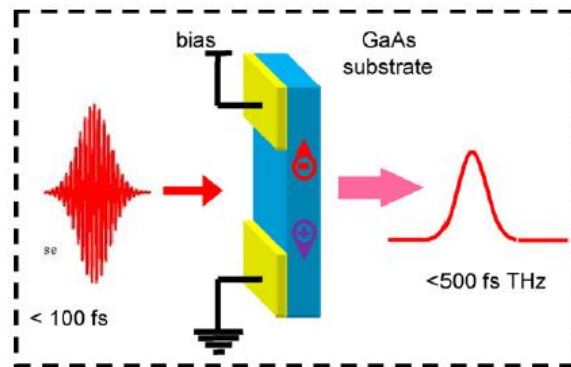
Για τη παραγωγή κυμάτων Τερακυματικής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται πηγές οι οποίες αποτελούνται από λέιζερ, ημιαγωγούς και άλλα ηλεκτρονικά και συνδυάζονται με φακούς και άλλα οπτικά υλικά. Οι πηγές Τερακυματικής ακτινοβολίας μπορούν να δημιουργούν ακτίνες T με διάφορα μήκη κύματος, είτε με τη μορφή παλμών είτε με τη μορφή συνεχούς κύματος.

Με βάση τα πορίσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, οι ακτίνες T μπορούν να δημιουργηθούν από ηλεκτρονικές ή από φωτονικές πηγές.

Οι ηλεκτρονικές πηγές περιλαμβάνουν τους Ταλαντωτές Ανάδρομου Κύματος (Backward Wave Oscillator - BWO) και τις ηλεκτρονικές συσκευές υπέρ πλέγματος (superlattice). Οι πηγές αυτές ακολουθούν τις αρχές των ηλεκτρονικών υψηλής συχνότητας και ως εκ τούτου λειτουργούν μόνο στο ανώτατο όριο της μικροκυματικής περιοχής συχνοτήτων Τερακυματικής ακτινοβολίας. (Humphreys, et al., 2004)

Οι φωτονικές πηγές περιλαμβάνουν λέιζερ, φωτοαγώγιμες κεραίες δίπολων και συσκευές που χρησιμοποιούν οπτικές τεχνικές όπως η ανάμειξη και διόρθωση. Αυτές οι φωτονικές πηγές χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική. Οι δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι και πηγές για τη δημιουργία Τερακυματικής ακτινοβολίας είναι οι φωτοαγώγιοι εκπομποί, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως για εκπομπή και άλλων ακτινοβολιών, και πηγές που βασίζονται στην τεχνική της οπτικής διόρθωσης. Και οι δύο μέθοδοι εφαρμόζονται σε πηγές που αποτελούνται από λέιζερ από τιτάνιο και ζαφείρι και δημιουργούν παλμικές ακτίνες T με πολύ μικρό εύρος ζώνης. (Schmittenmaer, 2004)

Τα λέιζερ από τιτάνιο και ζαφείρι έχουν ενέργεια της τάξης των 800nm, η οποία είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια ζώνης – χάσματος του χρησιμοποιούμενου ημιαγωγού, παράγει τους φορείς ηλεκτρονίων – οπών σε έναν πολωμένο ημιαγωγό, συνηθέστερα σε μία φωτοαγώγιμη κεραία. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος ημιαγωγός είναι το αρσενίδιο του γαλλίου σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία (low temperature GaAs). Η δε πόλωση είναι της τάξης των 40V για τα περισσότερα λέιζερ τιτανίου – ζαφειριού και της τάξης του 1kV για τα ενισχυμένα λέιζερ τιτανίου – ζαφειριού. Πολώνοντας τον ημιαγωγό επιταχύνεται η παραγωγή φορέων ηλεκτρονίων – οπών και προκαλείται η δημιουργία παλμών.



Εικόνα 5: Δημιουργία τερακυματικών παλμών με χρήση φωτοαγώγιμης κεραίας GaAs. Αυτή η πηγή μπορεί να παράγει ακτίνες T με εύρος ζώνης μέχρι 5THz καθώς περιορίζεται από τον τύπο του ημιαγωγού και το εύρος του παλμού του λέιζερ που χρησιμοποιείται (Shen, 2010)

Η δημιουργία των παλμών οφείλεται στον μεταβατικό έλεγχο του πεδίου πόλωσης με χρήση φωτοέγχυσης. Αυτός ο τύπος πηγής μπορεί να δημιουργήσει παλμούς με εύρος ζώνης έως 5THz και χρησιμοποιείται γενικά αποκλειστικά σε πηγές ταλαντωτών. Οι περιορισμοί αυτής της πηγής προκύπτουν από τον χαμηλό χρόνο απόκρισης του χρησιμοποιούμενου αγωγού και το μικρό πλάτος του παλμού του χρησιμοποιούμενου λέιζερ. Ο παλμός δημιουργείται από την κεραία με ρυθμό της τάξης του ενός παλμού ανά 500fs και έπειτα προσπίπτει σε έναν οπτικό φακό από κρυσταλλικό χαλαζία ή σε έναν οπτικό ημισφαιρικό φακό πυριτίου καθώς και σε ένα παραβολικό κάτοπτρο. Οι οπτικές αυτές τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση του παλμού και την κατεύθυνση του στο επιθυμητό σημείο της πηγής.

Οι παλμοί Τερακυματικής ακτινοβολίας που παράγονται από φωτοαγώγιμους εκπομπούς, όπως αυτός στην εικόνα 5, έχουν επίπεδα ισχύος κατά μέσο όρο της τάξης των 10^{-9} Watt, ενώ η μέγιστη ισχύς τους μπορεί να φτάνει σε πολύ μεγαλύτερα επίπεδα. Το δε εύρος ζώνης του παλμού περιορίζεται κυρίως από την δυνατότητα επιτάχυνσης των φορέων ηλεκτρονίων – οπών, η οποία είναι σημαντικά μικρότερη από τη συχνότητα του λέιζερ.

Η δημιουργία κυμάτων Τερακυματικής ακτινοβολίας με οπτική διόρθωση είναι μια αρκετά διαδεδομένη μέθοδος που εφαρμόζεται με τις παραπάνω πηγές ενισχυμένων λέιζερ, τα οποία, σε αδρές γραμμές, φαίνεται να εκμεταλλεύονται τη μη γραμμική ηλεκτρική ευαισθησία ενός κρυσταλλικού υλικού.

Όπως προαναφέρθηκε, η εφαρμογή της οπτικής διόρθωσης δημιουργεί παλμούς Τερακυματικής ακτινοβολίας πολύ μικρού πλάτους, το οποίο μπορεί να αυξηθεί με χρήση ενισχυμένων λέιζερ τιτανίου – ζαφειριού. Ο παραγόμενος παλμός από τα ενισχυμένα αυτά λέιζερ προσπίπτει σε ένα μη γραμμικό μέσο, συνήθως σε ένα διαφανές κρυσταλλικό υλικό όπως το δελουρίδο του ψευδαργύρου (ZnTe), το αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs), το φωσφίδιο γαλλίου (GaP), το φωσφίδιο του ινδίου (InP) ή το σελήνιο γαλλίου (GaSe). Το κρυσταλλικό αυτό υλικό είναι έντονα πολωμένο. Ο συνδυασμός εξαρτημάτων, τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, οδηγεί στην πόλωση του ημιαγωγού, χάρη στην οποία εκπέμπεται η Τερακυματική ακτινοβολία.

Η διάρκεια αυτής της παλμικής ακτινοβολίας, η απορρόφηση από το κρυσταλλικό υλικό, το πάχος του κρυσταλλικού υλικού και η διαφορά της ταχύτητας διάδοσης του παλμού που παράγεται από το λέιζερ και του παλμού πρόσπτωσης στο κρυσταλλικό υλικό, οδηγούν σε περιορισμένο εύρος ζώνης της παλμικής ακτινοβολίας, η οποία ωστόσο μπορεί να φτάσει σε συχνότητες έως και 40THz κατόπιν ενίσχυσης του λέιζερ.

Ένας άλλος μηχανισμός δημιουργίας κυμάτων Τερακυματικής ακτινοβολίας είναι τα μεταβατικά ρεύματα που παρατηρούνται όταν δεν πολώνεται ο χρησιμοποιούμενος ημιαγωγός. Τα μεταβατικά δε ρεύματα δημιουργούνται στην επιφάνεια του ημιαγωγού και οφείλονται σε παραγωγή υπερτάσεων ή σε δημιουργία παροδικών πεδίων λόγω του φαινομένου Photo-Dember, το οποίο παρατηρείται όταν υπάρχει διαφορά στο ποσοστό διάχυσης των δημιουργούμενων ηλεκτρονίων και οπών.

Άλλες μέθοδοι δημιουργίας κυμάτων Τερακυματικής ακτινοβολίας βασίζονται σε διόδους P-N, σε επίπεδες κεραίες, στη χρήση πηγών που βασίζονται στο νιοβικό λίθιο ή σε σύγχροτα, λέιζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων (Free Electron Lasers - FEL), πομποδέκτες, λέιζερ παραγωγής πλάσματος και μεγάλες κεραίες διαφράγματος με ενισχυμένα λέιζερ. Κάθε μέθοδος συγκεντρώνει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και επιλέγεται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. (Scalari, et al., 2009)

Η χρήση των πηγών που αποτελούνται από σύχνοτρα είναι η λιγότερο διαδεδομένη καθώς οι πηγές αυτές έχουν μεγάλο όγκο, απαιτούν μεγάλη ισχύ και έχουν μεγαλύτερο κόστος από ό,τι άλλες πηγές.

Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι οι πηγές αυτές, καθώς και οι πηγές που βασίζονται σε λέιζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων, μπορούν να παραγάγουν στενούς παλμούς Τερακυματικής ακτινοβολίας με ρυθμό της τάξης των 5 έως 10 παλμών ανά ps, με ισχύ της τάξης των 20W, ενώ αντίστοιχα η χρησιμοποιούμενη ακτινοβολία σε εφαρμογές της Ιατρικής είναι της τάξης ισχύος του 1mW. Ως εκ τούτου, γίνεται εύκολα αντιληπτό το πλεονέκτημα των πηγών αυτών αφού είναι σε θέση να παράγουν κύματα μεγαλύτερης ισχύος με μεγαλύτερη συχνότητα, χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν επιφέρουν εργαστηριακά οφέλη, χωρίς ωστόσο να είναι ιδιαιτέρως απαραίτητα για τις Ιατρικές απεικονιστικές εφαρμογές.

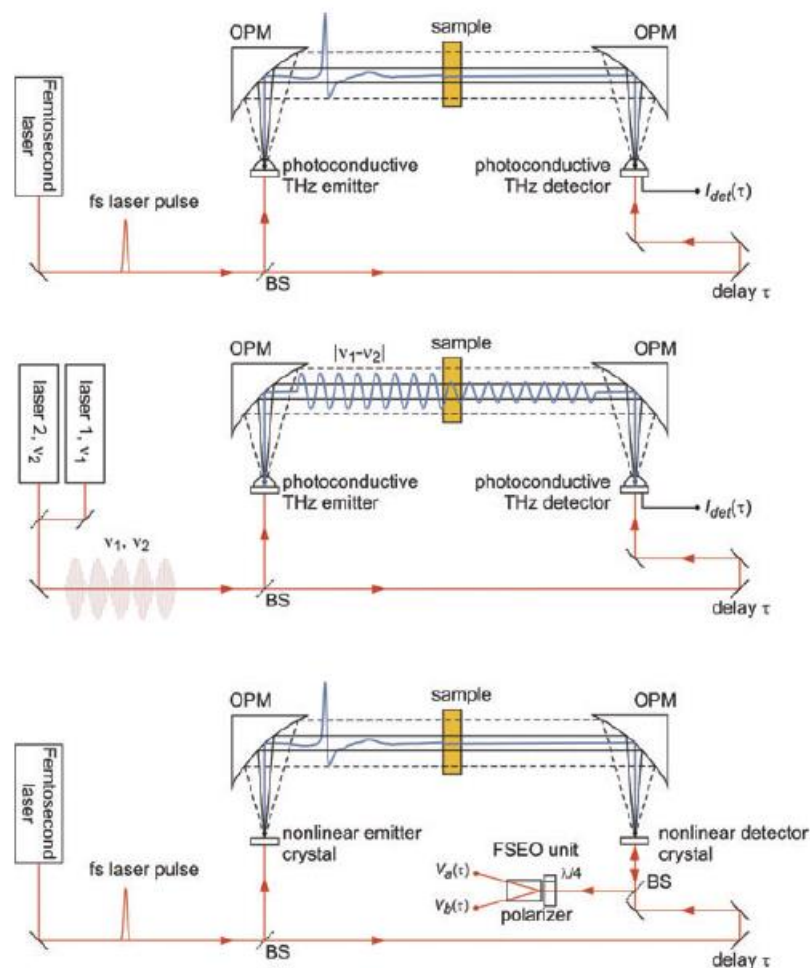
Ταυτόχρονα, η ανάμειξη δύο λέιζερ ακτινών T συνεχούς κύματος τα οποία δημιουργούν κύματα με διαφορετικές συχνότητες, όταν πολωθούν με την ίδια ενέργεια, επιτρέπει την παραγωγή ακτινών T συνεχούς κύματος. Τα οφέλη της μεθόδου αυτής εντοπίζονται στο γεγονός ότι είναι εφικτός ο εντοπισμός συχνοτήτων από 0.3 έως 3THz με αντίστοιχη φασματική ανάλυση της τάξης του MHz. Παράλληλα δεν πρέπει να παραγνωρίζεται και η παράπλευρη ωφέλεια της κατασκευής πηγών χαμηλού κόστους με τη μέθοδο της μίξης δύο λέιζερ συγκριτικά με πηγές που βασίζονται στις προηγούμενες μεθόδους.

Τέλος, άξιες αναφοράς θεωρούνται και οι πηγές που βασίζονται σε λέιζερ Quantum-Cascade (QCLs), τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν κύματα Τερακυματικής ακτινοβολίας. Σε αντίθεση με παλαιότερες πηγές κυμάτων Τερακυματικής ακτινοβολίας, οι οποίες απαιτούσαν την εφαρμογή μεθόδων κρυογονικής ψύξης ή παρήγαγαν ως επί το πλείστο παλμικές ακτίνες T, τα λέιζερ Quantum-Cascade μπορούν να δημιουργούν ακτίνες T συνεχούς κύματος με ισχύ της τάξης των δεκάδων mW. Αυτά τα λέιζερ δεν λειτουργούν με ρυθμό της τάξης των fs, τα οποία είναι σχετικά ογκώδη, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι καθίσταται εφικτή η κατασκευή φορητών πηγών ακτινών T συνεχούς κύματος, ενώ προσφέρουν τη δυνατότητα δημιουργίας ακτινών T και απεικονίσεις με λιγότερο, αναλογικά, θόρυβο. (Scalari, et al., 2009)

Ωστόσο, εντοπίζεται έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για την εύρεση του κατάλληλου τρόπου ψύξης των λέιζερ Quantum-Cascade, ούτως ώστε να μπορούν να δημιουργούν κύματα με συχνότητες στα κάτω άκρα της περιοχής της Τερακυματικής ακτινοβολίας, κάτω από τα 2THz, γεγονός που θα επιτρέψει την ευρεία εφαρμογή τους σε ιατρικές

εφαρμογές όπως στην απεικόνιση όγκων και στην ακριβέστερη διάκριση των όγκων από τους φυσιολογικούς ιστούς, η οποία είναι πιο ακριβής στα κάτω άκρα της περιοχής της Τερακυματικής ακτινοβολίας. (Scalari, et al., 2009).

Στην συνέχεια, για την καλύτερη κατανόηση των διαφορών των παραπάνω μεθόδων, παρουσιάζεται σχηματικά η γραφική αναπαράσταση τριών διαφορετικών πρακτικών δημιουργίας των κυμάτων της Τερακυματικής ακτινοβολίας με χρήση της τεχνικής της ανάλυσης χρόνου. Ως ένα πρώτο εξαγωγίμο συμπέρασμα συνιστά η διαφορά στο κύμα της Τερακυματικής ακτινοβολίας (παλμός ή συνεχές κύμα) ανάμεσα στην πηγή και τον ανιχνευτή, καθώς και διαφορά στην τρίτη μέθοδο, κατά την οποία έγινε επιπλέον χρήση των μη γραμμικών κρυστάλλων, στους οποίους προσπίπτει η εξερχόμενη από τον ανιχνευτή ακτινοβολία.



Εικόνα 6: Φασματοσκοπία χρόνου με τερακυματική ακτινοβολία (επάνω και κάτω πηγή παλμικής τερακυματικής ακτινοβολίας βασισμένη σε fs laser, στη μέση πηγή συνεχούς τερακυματικής ακτινοβολίας με οπτική μίξη δύο διαφορετικών laser και χρήση μη γραμμικών κρυστάλλων) (Jepsen, Cooke, & Koch, 2011)

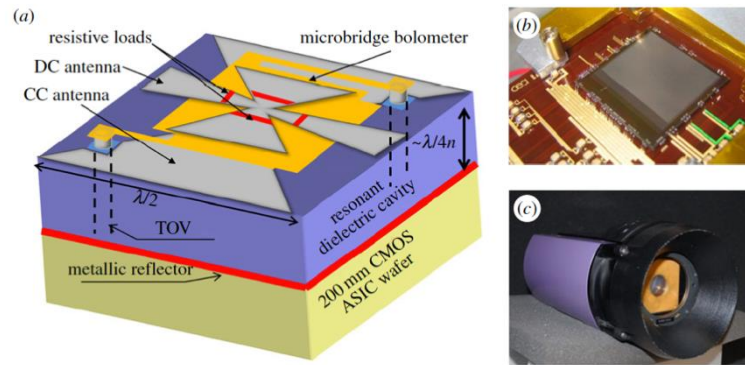
3. Ανίχνευση κυμάτων Thz

3.1 Θερμικοί Ανιχνευτές

Θερμικοί ανιχνευτές όπως βολόμετρα, κυψέλες Golay και πυροηλεκτρικές συσκευές χρησιμοποιούνται συνήθως για την παρατήρηση της ακτινοβολίας CW THz. Ένας απορροφητής ακτινοβολίας συνδεδεμένος σε μια ψήκτρα θερμότητας είναι το βασικό στοιχείο όλων των θερμικών ανιχνευτών. Η ενέργεια ακτινοβολίας που απορροφάτε από τον απορροφητή μετατρέπεται σε θερμότητα και ένα θερμόμετρο μετρά την αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από τη θερμότητα. Ο απορροφητής έχει χαμηλή χωρητικότητα θερμότητας, έτσι ώστε η θερμότητα να επιφέρει οξείες αλλαγές θερμοκρασίας. Κάθε τύπος θερμικού ανιχνευτή διακρίνεται από το συγκεκριμένο σχήμα που χρησιμοποιεί για τη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του απορροφητή και της ψύκτρας. Η απορροφούμενη ενέργεια ακτινοβολίας προσδιορίζεται με βαθμονόμηση της εξόδου μέτρησης. (Yun, Shik, & Lee, 2008)

3.1.1 Βολόμετρο

Ο πιο κοινός θερμικός ανιχνευτής που χρησιμοποιείται είναι το Βολόμετρο, που αποτέλεσε αντικείμενο εφεύρεσης του Αμερικανού αστρονόμου Samuel Pierpont Langley. Αυτό είναι εξοπλισμένο με ένα θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του απορροφητή ακτινοβολίας. Συνήθως, το βολόμετρο είναι κατασκευασμένο από έναν βαριά ενισχυμένο ημιαγωγό όπως πυρίτιο (Si) ή γερμάνιο (Ge), εκμεταλλευόμενο το γεγονός ότι η αντίσταση τέτοιων υλικών είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία. Απεναντίας, ένα βολόμετρο είναι ένας κρυογονικός ανιχνευτής που λειτουργεί με υγρό ήλιο (Liquid Helium - L-He) για υψηλή ευαισθησία ανίχνευσης. (θερμοκρασίες 4 K).



Εικόνα 7: (α) Μη ψυγμένη δομή pixel μικροβολόμετρου κεραίας και κοιλότητας THz. (β) Διακοπτικό τσιπ συστοιχίας 320×240 pixel. (γ) Πρωτότυπο κάμερας που ενσωματώνει τη διάταξη βολόμετρου THz στη συσκευασία κενού. (Sizon, 2019) (Simoes & Meilhan, 2014)

3.1.2 Πυροηλεκτρικός Ανιχνευτής

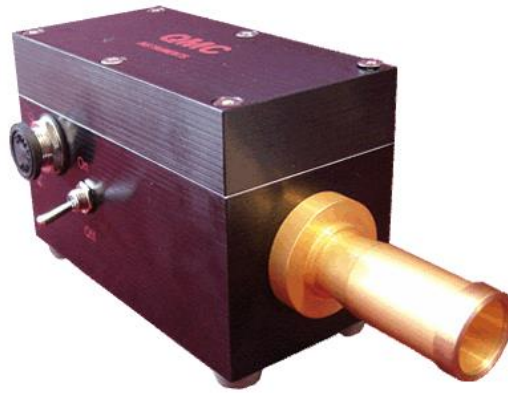
Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι κρυογονικές τεχνικές θεωρούνται συχνά ως τεχνικά δύσκολες, χρονοβόρες και δαπανηρές, αναπτύχθηκαν ανιχνευτές θερμοκρασίας δωματίου όπως ο πυροηλεκτρικός ανιχνευτής. Ένας πυροηλεκτρικός ανιχνευτής εκμεταλλεύεται ένα πυροηλεκτρικό υλικό στο οποίο οι αλλαγές θερμοκρασίας προκαλούν αυθόρμητη ηλεκτρική πόλωση, αλλάζοντας έτσι τη διηλεκτρική σταθερά. Ένα βασικό συστατικό αυτού του τύπου ανιχνευτή είναι ένας πυκνωτής που περιέχει αυτό το πυροηλεκτρικό υλικό, ενώ οποιαδήποτε αλλαγή στη θερμοκρασία του ανιχνευτή προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρικού φορτίου τα ηλεκτρόδια.

Τα πυροηλεκτρικά υλικά προκαλούν αυθόρμητη ηλεκτρική πόλωση και ο βαθμός πόλωσης συνήθως εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Καθώς η θερμοκρασία απορροφάτε, η θερμοκρασία αυξάνεται, αλλάζοντας το ηλεκτρικό πεδίο στις απέναντι όψεις του υλικού. Για την παρακολούθηση αυτής της αλλαγής, το πυροηλεκτρικό υλικό εισάγεται συνήθως ως διηλεκτρικό σε έναν πυκνωτή. (Lewis, 2019)

Στην πράξη, παρέχεται αντίστροφο ρεύμα κατά μήκος του πυροηλεκτρικού στοιχείου για να μηδενιστεί το αποτέλεσμα της συσσώρευσης επιφανειακού φορτίου και αυτό καθορίζει τη θερμοκρασία και ως εκ τούτου και το σήμα Terahertz. Συνήθως χρησιμοποιούνται τα εξής υλικά, δηλαδή η θεική τριγλυκίνη (TGS) και δευτεριωμένη θεική τριγλυκίνη (DTGS). Άλλα υλικά περιλαμβάνουν τιτανικό μόλυβδο ζικρονικού (PZT), τιτανικό στρόντιο βαρίου (BST) και τανταλικό λίθιο (LT). (Lewis, 2019)

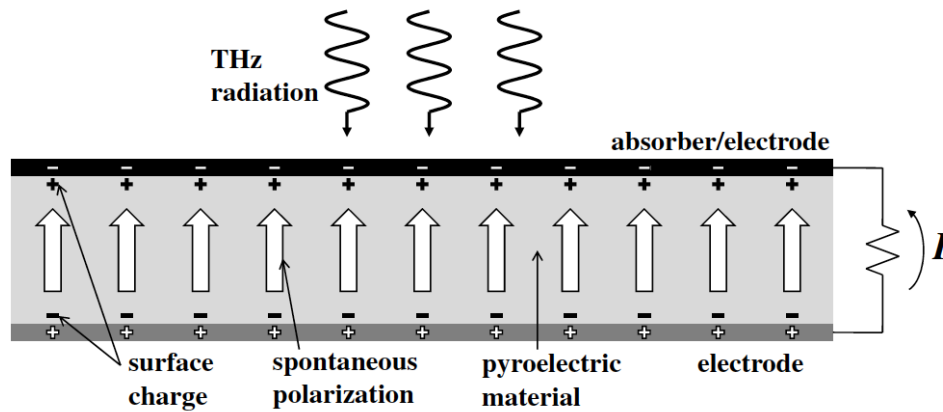
Προσθέτοντας επιπλέον απορροφητές στους συμβατικούς πυροηλεκτρικούς ανιχνευτές σχεδιασμένους για την υπέρυθη ακτινοβολία, το εύρος της λειτουργίας τους

μπορεί να επεκταθεί σε χαμηλότερες συχνότητες. Για παράδειγμα, ένας απορροφητής μεταλλικού επιτρέπει στον ανιχνευτή υπέρυθρων να λειτουργήσει και στο εύρος 0.1-0.18 THz με απόκριση τάσης $(4.0-5.6) \times 10^4 \text{ V W}^{-1}$ και $\text{NEP } 2 \times 10^{-9} \text{ W Hz}^{-1/2}$, μειωμένο μόνο από τον έναν από τους δύο συντελεστές σε σύγκριση με τις αρχικές προδιαγραφές των υπέρυθρων. (Lewis, 2019)



Εικόνα 8: Πυροηλεκτρικός ανιχνευτής της εταιρίας QMC Instruments Ltd.

Στην εικόνα 9 απεικονίζεται το βασικό σχήμα ενός πυροηλεκτρικού ανιχνευτή. Μια πυροηλεκτρική κρυστάλλινη τομή κάθετη προς τον πολικό άξονα στριμώχνεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (sandwiched). Το πάνω μέρος είναι συνήθως χρώματος μαύρου για να είναι απορροφητής ακτινοβολίας. Εάν το ηλεκτρόδιο είναι διαφανές στην επιθυμητή φασματική περιοχή, η ίδια η κρυσταλλική επιφάνεια επεξεργάζεται για να απορροφά την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η θερμότητα που παράγεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία αυξάνει τη θερμοκρασία του πυροηλεκτρικού κρυστάλλου. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της αυθόρμητης πόλωσης και, ταυτόχρονα, του επιφανειακού φορτίου. Τα ηλεκτρόδια που συνδέονται στις δύο απέναντι κρυσταλλικές επιφάνειες σχηματίζουν έναν πυκνωτή. Εάν το κύκλωμα είναι κλειστό, ένα ρεύμα ρέει μέσα από αυτό για να αντισταθμίσει την αλλαγή στο επιφανειακό φορτίο. Τα κυκλώματα σε πραγματικούς ανιχνευτές είναι λίγο πιο περίπλοκα. Ο πυροηλεκτρικός πυκνωτής λειτουργεί είτε ως πηγή τάσης ή ρεύματος. (Yun, Shik, & Lee, 2008)



Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση τυπικής διάταξης πυροηλεκτρικού ανιχνευτή (Yun, Shik, & Lee, 2008)

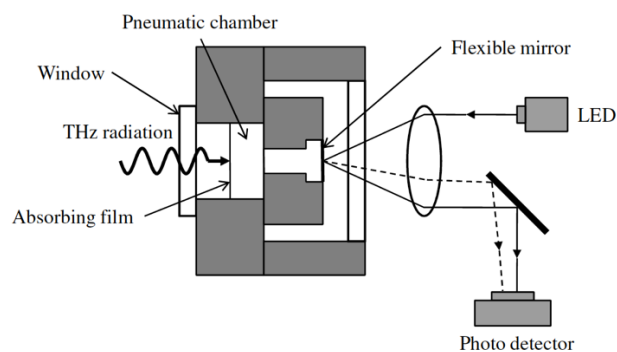
3.1.3 Cell Goley

Ο απορροφητής ακτινοβολίας ενός κυττάρου Golay είναι ένα λεπτό μεταλλικό φιλμ χρώματος μαύρου σε ένα υπόστρωμα. Η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα μικρό όγκο αερίου σε ένα σφραγισμένο θάλαμο πίσω από τον απορροφητή έτσι ώστε η πίεση να αυξάνεται στον θάλαμο. Μία ανακλαστική και εύκαμπτη μεμβράνη προσαρτάται στην πίσω πλευρά του θαλάμου και μια μέτρηση οπτικής ανακλαστικότητας ανιχνεύει την παραμόρφωση της μεμβράνης που προκαλείται από την αύξηση της πίεσης. Έχει δυνατότητα ανίχνευσης επίπεδα ισχύος ακτινοβολίας έως 10 μW σε συχνότητες THz. Στην εικόνα 9 φαίνονται τα βασικά συστατικά και η λειτουργία ενός cell Golay.

Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι όσον αφορά την έρευνα των ανιχνευτών Terahertz, το κύτταρο Goley ή πνευματικό κύτταρο αφορά έναν απορροφητή ακτινοβολίας, συνήθως μια λεπτή μεμβράνη, που προσαρτάται σε έναν σφραγισμένο όγκο αερίου. Όταν εναποτίθεται θερμότητα, το αέριο διαστέλλεται και αυτό οδηγεί στην παραμόρφωση μιας λεπτής μεμβράνης που αποτελεί ένα τοίχωμα του θαλάμου αερίου. Ένας καθρέφτης προσαρτημένος σε αυτήν τη μεμβράνη εκτρέπει το φως από μια δέσμη ανιχνευτή. Το αέριο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι ατομικό αέριο, όπως είναι το αργό ή το ξέnon, έτσι ώστε όλη η θερμική ενέργεια θα εξελιχθεί σε μεταγραφική κίνηση των ατόμων και θα απορροφηθεί σε εσωτερικούς τρόπους, όπως θα συνέβαινε σε ένα αέριο κατασκευασμένο από μόρια. Επιπλέον, σε ένα μονοατομικό αέριο, η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρή, που σημαίνει ότι η θερμότητα διατηρείται καλύτερα στο μεγαλύτερο μέρος του αερίου. Μια νέα εφαρμογή κυττάρου Golay χρησιμοποιεί σήραγγα ηλεκτρονίων μεταξύ ενός σταθερού άκρου και μια μεμβράνη νιτριδίου με επικάλυψη χρυσού (συνήθως 1.5 nA στους 10 A) για

να μετρηθεί η μετατόπιση της μεμβράνης. Η ευαισθησία του κυττάρου Golay είναι συνήθως 105 V W^{-1} . (Lewis, 2019)

Η διαμορφούμενη ακτινοβολία THz περνά από το μπροστινό παράθυρο και απορροφάτε από το απορροφητικό φιλμ. Με την απορροφούμενη ενέργεια θερμαίνεται ένας μικρός όγκος αερίου που περικλείεται στο θάλαμο πίεσης (pneumatic chamber), ο οποίος προκαλεί θερμική διαστολή του αερίου. Η προκύπτουσα αύξηση πίεσης παραμορφώνει τον εύκαμπτο καθρέπτη (flexible mirror) που είναι τοποθετημένος στο πίσω μέρος του θαλάμου. Μια οπτική δέσμη από μια δίοδο εκπομπής εστιάζεται στον εύκαμπτο καθρέπτη και η ανακλώμενη δέσμη συλλέγεται και εστιάζεται σε έναν φωτοανιχνευτή. Η παραμόρφωση που προκαλείται από την παραμόρφωση της μεμβράνης ανιχνεύεται από το σύστημα ανάγνωσης ανίχνευσης.



Εικόνα 10: Σχηματικό διάγραμμα ενός cell Goley (Yun, Shik, & Lee, 2008)

Η υψηλή ευαισθησία ανίχνευσης ενός cell Golay απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες στα απάρτιά του. Στην ιδανική περίπτωση, η απορροφητική μεμβράνη θα πρέπει να είναι το μόνο μέσο στο οποίο προκαλείται ανταλλαγή θερμότητας. Για να συμβεί αυτό τα υπόλοιπα υλικά που είναι κατασκευασμένο το cell Goley θα πρέπει να είναι θερμομονωτικά υψηλής ποιότητας και το αέριο να είναι διαφανές σε όλο το φάσμα ανίχνευσης. Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα του αερίου πρέπει να είναι μικρή. Ένα αέριο το οποίο παρουσιάζει τη μικρότερη αγωγιμότητα είναι το Xenon, το οποίο χρησιμοποιείται στις περισσότερες των περιπτώσεων.



Εικόνα 11: Ανιχνευτής THz ακτινοβολίας της εταιρίας Acal BFi

Αντικείμενο προβολής της εικόνας 11 αποτελεί ένας ανιχνευτής THz ακτινοβολίας της εταιρίας Acal BFi με εύρος ανίχνευσης 0.02-20 THz, που διαθέτει ενσωματωμένο προενισχυτή και βάση απομόνωσης κραδασμών για ελαχιστοποίηση του θορύβου που προκαλείται στις χαμηλές συχνότητες.

Μια ευνοϊκή ιδιότητα των θερμικών ανιχνευτών είναι ότι αποκρίνονται στην ακτινοβολία σε ένα πολύ ευρύ φάσμα, το οποίο δεν είναι εφικτό για τους περισσότερους ανιχνευτές φωτονίων. Από την άλλη πλευρά, οι θερμικοί ανιχνευτές είναι σχετικά αργοί σε σύγκριση με τους τυπικούς ανιχνευτές φωτονίων, επειδή ο απορροφητής ακτινοβολίας πρέπει να φθάσει στη θερμική ισορροπία πριν γίνει μια μέτρηση θερμοκρασίας. Η σταθερά χρόνου ενός τυπικού βολόμετρου είναι $\sim 0,1$ ms σε θερμοκρασία L-He (-269 °C). Τα cell Golay και οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές λειτουργούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά είναι πολύ πιο αργά από τα βολόμετρα, με σταθερές χρόνου της τάξης του 1 s. Λόγω της ισχυρής επίδρασης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η ανίχνευση της επιθυμητής ακτινοβολίας THz απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για την αντιστάθμιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ένα κοινό, αλλά ισχυρό σχήμα για τη διάκριση της επιθυμητής ακτινοβολίας THz από το σήμα φόντου είναι να ρυθμιστεί η ένταση της προσπίπτουσας δέσμης THz και να μετρηθούν οι επακόλουθες αλλαγές στο σήμα εξόδου.

Επομένως, ένα πλεονέκτημα του κυττάρου Golay είναι ότι λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου, οπότε δεν είναι αναγκαίες ρυθμίσεις ψύξης. Παράλληλα, η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει και απλότητα στην χρήση, με πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας λόγω του ότι χρειάζεται μια μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, από πρίζα ή μπαταρία. (Lewis, 2019)

Από την άλλη, ένα βασικό μειονέκτημα του κυττάρου Golay είναι ότι λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου και για το λόγο αυτό η ανιχνευσιμότητα περιορίζεται από τη

θερμική διακύμανση του ίδιου του ανιχνευτή. Λόγω της μεγάλης θερμικής μάζας, είναι σχετικά αργό, με σταθερά χρόνου της τάξης του 1 sec. Τέλος, είναι επίσης εύθραυστο για δύο λόγους, καθώς, πρώτον, είναι ευαίσθητο σε κραδασμούς και δεύτερον, είναι ευπαθές σε βλάβη από ισχυρή ακτινοβολία. (Lewis, 2019)

3.1.4 Τάση ανάπτυξης ανιχνευτών THz

Τα τελευταία χρόνια υφίσταται μεγάλη ανάπτυξη των ανιχνευτών THz, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία παραδοσιακών βαθιάς ψύξης ανιχνευτών μήκους κύματος mm και sub-mm (κυρίως βολόμετρα), καθώς και νέες προτάσεις που βασίζονται σε οπτοηλεκτρονικές κβαντικές συσκευές, νανοσωλήνων άνθρακα (carbon nanotubes, CNTs) βολόμετρα, ανίχνευση κυμάτων πλάσματος από (Field-Effect Transistor, FETs) και διπολικό ημιαγωγό θερμοκρασίας θερμού ηλεκτρονίου.

Ταυτόχρονα, ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο τομέας ανάπτυξης της ζήτησης και για τους ανιχνευτές «θερμοκρασίας δωματίου», οι οποίοι παρέχουν μεγάλο δυναμικό για απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο, διατηρώντας παράλληλα ένα υψηλό δυναμικό εύρος σε λειτουργία θερμοκρασίας δωματίου. Ενδεικτικά, για την πλήρη κάλυψη του εν λόγω ζητήματος επισημαίνονται οι παρακάτω ανιχνευτές:

- Microbolometers
- Field-Effect Transistor ανιχνευτές
- Extrinsic ανιχνευτές
- Πρωτότυποι THz ανιχνευτές (Novel detectors) κα

3.1.5 Τα φωτόνια και οι ιδιότητες ανίχνευση

Το πρωταρχικό χαρακτηριστικό ενός THz ανιχνευτή είναι το γεγονός της ευαισθησίας του στα φωτόνια των συχνοτήτων THz. Πιο συγκεκριμένα, το είδος αυτό του ανιχνευτή μπορεί περιγραφικά να αποδοθεί με τους όρους της ίδιας της συχνότητας των THz, ή, ακόμα και των συχνοτήτων στις οποίες αυτή ανταποκρίνεται. Σε γενικές γραμμές, ο ανιχνευτής θα παρουσιάζει μεγαλύτερη ανταπόκριση σε ορισμένες μόνο συχνότητες συγκριτικά με άλλους, ενώ ταυτόχρονα δεν ανταποκρίνεται καθόλου στις συχνότητες έξω από το εύρος συχνοτήτων του ανιχνευτή. Το εύρος συχνοτήτων αναφέρεται επίσης ως φασματική περιοχή, ως φάσμα εύρους ζώνης ή, διαφορετικά, ως εύρος ζώνης συχνότητας. Μερικοί από τους ανιχνευτές διακρίνουν τα φωτόνια των διαφορετικών συχνοτήτων και ακριβώς η ικανότητα του ανιχνευτή για την αναγνώριση αυτή περιγράφεται από την ανάλυση της συχνότητας. (Lewis, 2019)

Την ίδια στιγμή, ανιχνευτές που δεν είναι σε θέση να διακρίνουν τα φωτόνια των διαφορετικών συχνοτήτων, συνήθως επιλέγεται να συνδυαστούν με ένα στοιχείο επιλογής συχνότητας, όπως είναι για παράδειγμα το κιγκλίδωμα περίθλασης προκειμένου να δημιουργηθεί ένα φασματόμετρο. Γενικά, μια ευρεία απόκριση συχνότητας είναι επιθυμητή, αν και σε ορισμένες εφαρμογές, ο ανιχνευτής που ανταποκρίνεται μόνο σε μια μικρή ζώνη συχνοτήτων είναι επαρκής, και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι και προτιμητέα. (Karasik, Sergeev, & Prober, 2011)

Σε οποιαδήποτε πρακτική κατάσταση, υπάρχει μια αναπόφευκτη ελάχιστη και τυχαία διακύμανση στην έξοδο του ανιχνευτή, το οποίο χαρακτηρίζεται ως θόρυβος. Ο θόρυβος υπάρχει ακόμη και όταν δεν υπάρχει οποιαδήποτε ακτινοβολία που να προσκρούει στον ανιχνευτή. Η ακτινοβολία που διεγείρει τον ανιχνευτή παράγει την επιθυμητή έξοδο του ανιχνευτή, γνωστή ως το σήμα. Ωστόσο, το επιθυμητό σήμα είναι πάντα προσμειγμένο από έναν ανεπιθύμητο θόρυβο. Ένας τρόπος για να εκφραστεί αυτή η ανεπιθύμητη πρόσμιξη είναι από την αναλογία του σήματος προς τον θόρυβο (Signal-to-noise ratio - SNR). Το όριο της ανίχνευσης μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει όταν το σήμα είναι ακριβώς το μέγεθος του θορύβου, δηλαδή όταν το SNR ισούται με το 1 (Lewis, 2019). Το σήμα και ο θόρυβος εκφράζονται στις ίδιες ποσότητες, που μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την περίπτωση, όπως για παράδειγμα με τη μορφή της τάσης, του ρεύματος ή της ισχύος. Όσον αφορά στην ισοδύναμη ισχύ θορύβου (Noise equivalent power - NEP), αυτή μπορεί να αποδοθεί ως η ισχύς στον ανιχνευτή ανά τετραγωνική ρίζα εύρους ζώνης, προκειμένου να καταχωρηθεί ένα σήμα ίσο με το θόρυβο. (Lewis, 2019)

Παράλληλα, ένας ανιχνευτής μπορεί να είναι εγγενώς ευαίσθητος στην πόλωση των φωτονίων THz. Για παράδειγμα, ο ανιχνευτής μπορεί να ανιχνεύσει όλα τα φωτόνια που είναι πολωμένα στο οριζόντιο επίπεδο αλλά δεν ανταποκρίνεται στα φωτόνια που είναι πολωμένα στην κατακόρυφη διάταξη. Εάν ο ανιχνευτής δεν είναι εγγενώς ευαίσθητος στην πόλωση, ένα πολωτικό στοιχείο μπορεί να τοποθετηθεί πριν από τον ανιχνευτή, προκειμένου να υπάρξει ένα φίλτρο στα φωτόνια των ανεπιθύμητων πολώσεων. (Karasik, Sergeev, & Prober, 2011)

Επιπλέον, ένας ανιχνευτής θεωρείται συχνά ως η καταγραφή των φωτονίων THz, σε μια συγκεκριμένη θέση στο χώρο. Μερικοί, βέβαια ανιχνευτές μπορούν να μετρήσουν το σήμα των THz, συνδυαστικά και σε ταυτόχρονες πολλαπλές θέσεις, με αποτέλεσμα να αποτυπώνεται η THz εικόνα. Η ποσότητα των λεπτομερειών στην εικόνα αυτή θα εξαρτηθεί, σε μεγάλο βαθμό, από πόσες θέσεις λαμβάνονται δείγματα και πώς

κατανέμονται στο χώρο. Τα μεμονωμένα αυτά στοιχεία ονομάζονται pixel. Έτσι, το μέγεθος κάθε pixel και ο αριθμός των pixel χρησιμοποιούνται στην περιγραφή η εικόνα. Εάν ο ανιχνευτής αποκρίνεται μόνο σε μία θέση στο χώρο, μια εικόνα μπορεί να δημιουργηθεί με την μετακίνηση του ανιχνευτή σε διαφορετικές θέσεις στο χώρο με την πάροδο του χρόνου («μεγέθυνση ψηφιακής εικόνας»). Εναλλακτικά, ο ανιχνευτής μπορεί να παραμείνει σταθερός, και είτε το δείγμα είτε τα φωτόνια από συγκεκριμένα σημεία του δείγματος, μεγεθύνονται πάνω από τον ανιχνευτή. (Zhang, Shkurinov, & Zhang , 2017)

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός ανιχνευτή είναι πώς αλληλεπιδρά με την ακτινοβολία THz που καλείται να μετρήσει, ενώ τα δευτερεύοντα γνωρίσματά του μπορούν να εξαντληθούν στην πρακτική κατασκευή και λειτουργία του. Πάντως, σε γενικές γραμμές, προτιμώνται μικρότεροι ανιχνευτές, μιας και η απεικόνιση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων ανιχνευτή μικρών και στενών αποστάσεων. Επιπλέον, ένας φορητός ανιχνευτής επιλέγεται και προτιμάται συγκριτικά με έναν που δεν μπορεί να μετακινηθεί. Με άλλα λόγια η φορητότητα, γενικά υποδηλώνει ότι ο ανιχνευτής είναι μικρός και υπονοεί ότι ο ανιχνευτής δεν απαιτεί ειδικές συνθήκες περιβάλλοντος, όπως είναι χαμηλή θερμοκρασία ή υψηλό μαγνητικό πεδίο, αλλά μπορεί να λειτουργήσει σε ατμοσφαιρικές συνθήκες περιβάλλοντος, χωρίς ανάγκη για ειδικά τροφοδοτικά ή άλλα παρόμοια. (Lewis, 2019)

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι ανιχνευτές μπορούν να τροφοδοτηθούν από συμβατικές πρίζες. Ωστόσο, κάποιοι μπορεί να απαιτούν περισσότερες εμπλεκόμενες παροχές, όπως για παράδειγμα, τριφασικά ή άλλες υψηλής ισχύος παροχές, ενώ άλλοι μπορούν να λειτουργούν με τη χρήση μιας απλής μπαταρίας (Lewis, 2019). Από την άλλη, δεν πρέπει να παραγνωρίζεται το γεγονός ότι ορισμένοι ανιχνευτές απαιτούν ειδικές συνθήκες θερμοκρασίας ή μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, η πλειοψηφία των ανιχνευτών περιορίζονται σε ένα συγκεκριμένο εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία προκειμένου να λειτουργήσουν. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι ορισμένοι ανιχνευτές είναι ευαίσθητοι σε μηχανικές δονήσεις, ενώ άλλες μένουν ανεπηρέαστες από αυτές. (Zhang, Shkurinov, & Zhang , 2017)

Κλείνοντας, όσον αφορά την ευκολία στη χρησιμοποίησή τους, οι ανιχνευτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες και μπορούν είτε να απαιτούν ένα απλό βύσμα για τη λειτουργία τους, είτε να χρειάζονται έναν πιο ευαίσθητο χειρισμό και συντονισμό, αλλά και πιο ειδικές συνθήκες λειτουργίας. Φυσικά, το κόστος της κατοχής ενός τέτοιου

ανιχνευτή περιλαμβάνει και το κόστος παραγωγής ή αγοράς, αλλά και το κόστος λειτουργίας και συντήρησής του σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. (Lewis, 2019)

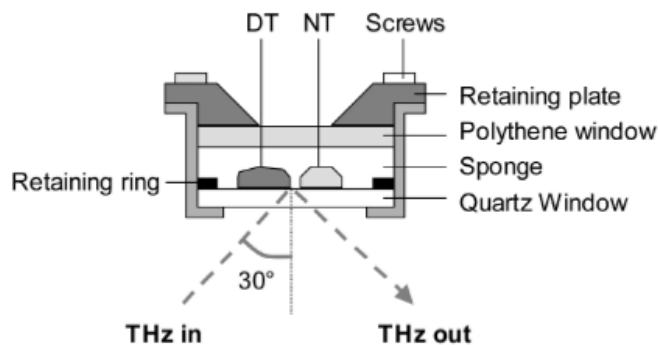
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Εφαρμογές - Πειράματα Συστημάτων THz

1. Φασματοσκοπία THz για διάγνωση καρκίνου

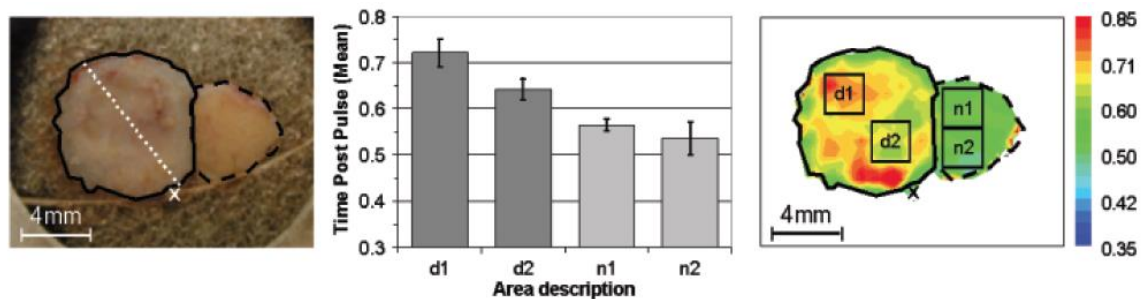
Η απεικόνιση με παλμούς THz χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη καρκινώματος κυττάρων της πιο κοινής μορφής καρκίνου του δέρματος. Με αυτή τη μη επεμβατική τεχνική χρησιμοποιείται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα στο εύρος συχνοτήτων 0,1 έως 2,7 THz.

Στη μελέτη των (Woodward, και συν., 2003) εξετάστηκαν 21 δείγματα τα οποία συγκρίθηκαν με την ιστολογία, βρέθηκε ότι αυτά απαρτίζονταν από πιθανό νοσούντα και φυσιολογικό ιστό από τον ίδιο ασθενή. Από τη μία, ο νοσούν ιστός έδειξε αύξηση της απορρόφησης σε σύγκριση με τον κανονικό ιστό το οποίο οφείλεται σε αύξηση του παρενθετικού νερού εντός του νοσούντος ιστού ή σε αλλαγή στους τρόπους δόνησης των μορίων νερού με άλλες λειτουργικές ομάδες. Οι διατομές των εικόνων THz, που δείχνουν την απορρόφηση THz συγκρίθηκαν με την ιστολογική εξέταση. Οι περιοχές αύξησης της απορρόφησης THz συμφώνησαν με τον περιορισμό των θέσεων του όγκου. Τα συγκεκριμένα, με ακρίβεια εξαγόμενα αποτελέσματα, καταδεικνύουν την ικανότητα της παλμικής απεικόνισης THz να διακρίνει το βασικό κυτταρικό καρκίνωμα από τον κανονικό ιστό και αυτή η μακροσκοπική τεχνική μπορεί να βοηθήσει στο σχεδιασμό χειρουργικής επέμβασης. (Woodward, et al., 2003)

Παράλληλα, επιλέχθηκε και εξήχθη ιστός από ασθενείς και προσβεβλημένος και υγιής, οι οποίοι τοποθετήθηκαν πλάι στη θήκη του δείγματος όπως φαίνεται στην εικόνα 12. Το δέρμα τοποθετήθηκε σε άμεση επαφή με το παράθυρο χαλαζία, με την επάνω επιφάνεια του δέρματος να βλέπει προς τον πομπό και δέκτη THz. Μετά την απεικόνιση, ο ιστός φωτογραφήθηκε, αφαιρέθηκε και τοποθετήθηκε σε φορμαλίνη για να υποβληθεί σε ιστολογική εξέταση.



δείχνει ένα ομοιόμορφο πράσινο χρώμα σε ολόκληρο. Αυτή η αντίθεση δεν είναι τόσο εμφανής στην ορατή εικόνα. Η ιστολογία δείχνει ένα οζώδες BCC και το ράμμα υποδεικνύεται στα αριστερά με ένα X. Το πρόγραμμα απορρόφησης terahertz δείχνει ένα μέγιστο στην απορρόφηση 6 mm από το ράμμα, υποδεικνύοντας ασθενή ιστό, ο οποίος συσχετίζεται καλά με τη θέση του όγκου στο τμήμα ιστολογίας.



Εικόνα 14: Ορατές και εικόνες THz. Μια σύγκριση μεταξύ των ορατών εικόνων, στα αριστερά και των εικόνων THz, στα δεξιά, των δειγμάτων 1, 8 και 12. Ο παθολογικός ιστός, στα αριστερά της ορατής εικόνας, επισημαίνεται από ένα σταθερό όριο, τον υγιή ιστό στα δεξιά από ένα διακεκομμένο όριο. Η διακεκομμένη λευκή γραμμή δείχνει τον άξονα της κάθετης ιστολογίας. Το λευκό «x» σηματοδοτεί τη θέση του ράμματος. (Woodward, et al., 2003)

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, οδηγούν αβίαστα στο συμπέρασμα την ικανότητα του TPI να διακρίνει τον φυσιολογικό ιστό από τον καρκινικό ιστό. Η αύξηση της απορρόφησης που παρατηρείται στον ασθενή ιστό σε σχέση με τον φυσιολογικό ιστό αποδίδεται είτε σε αύξηση του παρενθετικού νερού εντός του νοσούντος ιστού είτε σε αλλαγή στον τρόπο δόνησης των μορίων νερού. Τα αποτελέσματα αντιπροσωπεύουν την έναρξη νέων μεθόδων για τη χρήση της ακτινοβολίας THz για διάκριση καρκινώματος από φυσιολογικό ιστό. (Woodward, et al., 2003)

Γενικά είναι χρήσιμο να αναφερθεί η χρήση της τεχνολογίας γενικά στη βιοϊατρική. Σύντομα, αξίζει να αναφερθεί ότι σε σχέση με τις ακτίνες X, η σημαντικότερη διαφορά εντοπίζεται κυρίως στο γεγονός ότι τα φωτόνια της ακτινοβολίας THz παρουσιάζουν κατά πολύ μικρότερη ενέργεια και έχουν άμεσο αποτέλεσμα με αποφυγή βλάβης στους ιστούς του σώματος, καθώς και στο DNA (Peironen, Zeitler & Kuwata-Gonokami, 2012). Επίσης, με την τεχνολογία αυτή είναι δυνατόν να παρατηρηθούν διαφοροποιήσεις στα ποσοστά της ενυδάτωσης και της πυκνότητας των ιστών των ανθρώπων. Μάλιστα, κάποιες συγκεκριμένες συχνότητες της τεχνολογίας αυτής είναι σε θέση να εισχωρήσουν και σε συγκεκριμένα χιλιοστά ενός ιστού που παρουσιάζει μικρή ενυδάτωση, και εν συνεχεία να απομακρυνθούν ή να ανακλαστούν. Για τους λόγους αυτούς, η ικανότητα αυτή της τεχνολογίας μπορούν να εντοπίσουν για παράδειγμα μία μορφή καρκίνου με τη μεγαλύτερη

δυνατή ασφάλεια και με τη λιγότερο επεμβατική και επώδυνη διαγνωστική διαδικασία (Fitzgerald et al, 2002).

Η διαδικασία με την οποία λειτουργεί αυτή η μέθοδος αφορά τις θερμικές και τις μικροθερμικές βιολογικές επιδράσεις, καθώς όταν μία ακτινοβολία προσπίπτει στο βιολογικό δείγμα προκαλεί συνακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας. Μάλιστα, η ενέργεια THz κατά την διείσδυση σε βιολογικά υλικά, απορροφάτε από τα σωματίδια που φέρουν χρώμα και στην συνέχεια μετατρέπεται σε θερμότητα, πυροδοτώντας μία σειρά φωτοθερμικών διεργασιών. Όταν, λοιπόν, δεν υφίστανται οι φωτοχημικές αυτές διεργασίες, η τερακυματική ενέργεια στο σύνολό της απορροφάτε από τον ιστό, αυξάνοντας ανάλογα και τη θερμοκρασία. Έτσι, με βάση την ένταση της τερακυματικής ακτινοβολίας και τον συντελεστή της απορρόφησης από το δέρμα υπολογίζεται και το ποσό της ενέργειας στον ιστό. Υπολογίζεται, μάλιστα, με βάση την εξίσωση $\Delta T(r,z) = S(r,z)\Delta t / \rho c$, όπου S (Wm^{-3}) είναι το ποσό της παραγομένης θερμότητας, ΔT είναι η αύξηση της θερμοκρασίας (σε Kelvin) στην αυθαίρετη θέση (r), Δt η διάρκεια της εκθέσεως του ιστού στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, ρ είναι η πυκνότητα του ιστού (gm^{-3}) και c είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του (σε $Jg^{-1} K^{-1}$) (Peiponen, Zeitler & Kuwata-Gonokami, 2012).

Αυτό που καθιστά την τεχνολογία αυτή πολύ ελκυστική και χρήσιμη για την ιατρική είναι κυρίως ότι η ακτινοβολία THz έχει χαμηλή ενέργεια φωτονίου (4 MEV σε 1 THz), συμπίπτοντας έτσι με τα επίπεδα της ενέργειας που σχετίζονται με τις λειτουργίες περιστροφικών και δονητικών διεργασιών μέσα στα μόρια και τις διαμοριακές δονήσεις, όπως για παράδειγμα είναι οι δεσμοί υδρογόνου. Επειδή, λοιπόν, οι κινήσεις αυτές είναι χαμηλής συχνότητας καθιστούν εφικτή την ταυτοποίηση των βιομορίων, χαρακτηρίζοντας τα φασματικά χαρακτηριστικά τους στην περιοχή THz. Παράλληλα, επειδή η ενέργεια των φωτονίων είναι χαμηλή δεν είναι σε θέση αν προκαλέσει ιονισμό των ατόμων και άρα πρόκειται για μη παρεμβατικό τρόπο απεικόνισης, σε αντίθεση με τις ακτίνες του X. (D'Arco et al, 2020)

Έχουν γίνει σημαντικές έρευνες με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό των θεωρητικών πλαισίων για την επεξήγηση του φαινόμενο της μικροθερμικής επίδρασης της ακτινοβολίας THz στα βιολογικά δείγματα (Dexheimer, 2017). Η σύγχρονη έρευνα θεωρεί τους μικροθερμικούς μηχανισμούς σύζευξης των μορίων ως το αποτέλεσμα της σύμπτωσης της τεχνολογίας αυτής με την συχνότητα ταλάντωσης των φωτονίων στα βιολογικά. Υπάρχει όμως σημαντική δυσκολία στην πειραματική απόδοση των θεωριών αυτών. (Peiponen, Zeitler & Kuwata-Gonokami, 2012)

Γενικότερα έχει παρατηρηθεί ότι με την τεχνολογία αυτή σε δείγματα ζωντανών σπονδυλωτών οργανισμών ενισχύεται η εξέλιξη της θρομβολυτικής διεργασίας και επουλώνονται τραύματα, ενώ σε άλλες έρευνες παρατηρήθηκε και η πρόκληση ποικιλομορφίας στη διάταξη των πρωτεϊνών (Wilmink & Grundt, 2011). Όσον αφορά τον κυτταρικό πολλαπλασιασμό, όταν η έκθεση είναι χαμηλότερης έντασης, είναι και αυτός ελεγχόμενος. Οι βασικότερες χρήσεις της τεχνολογίας αυτής στη βιοϊατρική αφορά κυρίως τη φασματοσκοπία για τις καρκινικές διαγνώσεις, τη στα φαρμακευτικά προϊόντα, τη φασματοσκοπία στην οδοντιατρική καθώς και τη φασματοσκοπία στις πρωτεϊνικές διατάξεις (Dexheimer, 2017).

Αναφορικά με την πιο διαδομένη χρήση της τεχνολογίας των Τερακυμάτων στην βιοϊατρική, δηλαδή σχετικά με τη διάγνωση του καρκίνου, η Τερακυματική απεικονιστική μέθοδος με παλμούς (TPI), όπως προαναφέρθηκε, είναι σε θέση να εντοπίσει ανωμαλίες και ποσοστά ενυδάτωσης. Πάντως μέχρι σήμερα, οι μετρήσεις της Τερακυματικής ανάλυσης που έχουν πραγματοποιηθεί είναι ελάχιστες και οι έρευνες για τον προσδιορισμό των τιμών των συντελεστών απορρόφησης είναι σε πρώιμο στάδιο (D'Arco et al, 2020). Επίσης, με ανασκόπηση σε όλες τις έρευνες για τον καρκίνο βρίσκει κανείς αποτελέσματα της τεχνολογίας αυτής σε *ex vivo* δείγματα για τα εξής είδη καρκίνου: στο συκώτι, στο στήθος, στον εγκέφαλο, στο δέρμα, στη μήτρα και στο στόμα. Υπάρχουν και κάποιες έρευνες *in vivo* και *in vitro*, ενώ η μη παρεμβατική φύση της τεχνολογίας αυτής την καθιστά κατάλληλη και για *in vivo* διάγνωση (D'Arco et al, 2020).

Μάλιστα, σχετικά με την πιθανή θεραπεία του καρκίνου, σε πρόσφατη έρευνα παρατηρήθηκε και αποδείχθηκε ότι οι ισχυροί Τερακυματικοί παλμοί είναι σε θέση να κινητοποιήσουν τη διαδικασία της φωσφορυλίωσης, με την οποία φωσφορικές ομάδες προστίθενται σε ένα συγκεκριμένο μόριο. Αυτή η διαδικασία στην έρευνα αφορούσε την φωσφορυλίωση της ουσίας H2AX του ανθρώπινου δερματικού ιστού, η οποία αποδεικνύει μία συγκεκριμένη δυσλειτουργία του DNA. Παράλληλα, με την παρατήρηση αυτή, όμως, αυξήθηκε και το επίπεδο των ογκοκατασταλτικών πρωτεϊνών, γεγονός που υποδηλώνει την ενεργοποίηση του μηχανισμού επιδιόρθωσης της βλάβης στο DNA (Titova et al, 2013).

Παράλληλα, ένα επίσης σημαντικό πεδίο αξιοποίησης της τεχνολογίας αυτής είναι ο τομέας της οδοντιατρικής, καθώς η τερακυματική απεικονιστική μέθοδος δίνει τη δυνατότητα για την εκτίμηση της κατάστασης δοντιών και περιοδοντικών δομών χωρίς όμως να υπάρχει ο κίνδυνος για πρόκληση ιονισμού στον ιστό. Μάλιστα, σε μελέτη του

(Pickwell et al, 2007) ex vivo μπόρεσαν να καθορίσουν οι επιστήμονες με την απεικόνιση των Τερακυματικών παλμών την έκταση της παθογόνου περιοχής των δοντιών (Pickwell et al, 2007).

Έχουν γίνει την τελευταία δεκαετία έρευνες που αποδεικνύουν την χρησιμότητα της τεχνολογίας αυτής για την καλύτερη και ταχύτερη διάγνωση οδοντικών προβλημάτων. Πάντως στην οδοντιατρική χρησιμοποιούνται ευρέως και άλλες τεχνικές, όπως οι υπέρηχοι, η ακτίνες X κ.ά., οι οποίες όμως παρουσιάζουν προβλήματα και ελλείψεις. Για τους λόγους αυτούς, είναι απαραίτητη η επιπρόσθετη έρευνα στην χρήση των στρατηγικών του TPI για την παρακολούθηση των οδοντιατρικών προβλημάτων (D'Arco et al, 2020).

Από την άλλη στις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις της τεχνολογίας αυτής στον τομέα της ιατρικής, είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι υπάρχει και η άποψη ότι η ακτινοβολία THz, ενώ δεν βλάπτει άμεσα το DNA, είναι πιθανόν να λειτουργήσει ως συνεπαγωγέας για μη θερμικά αποτελέσματα (Wilmink & Grundt, 2011). Οι πιο πρόσφατες μελέτες δείχνουν ενδείξεις πιθανών θερμικών και μη θερμικών αποτελεσμάτων τα οποία προκαλούνται από την έκθεση στην ακτινοβολία αυτή (Fedorov, Serdyukov, Cherkasova, Popova, & Nemova, 2017). Για το λόγο αυτό προτείνεται από τους ερευνητές της τεχνολογίας αυτής, η οποία είναι ακόμη αναπτυσσόμενη, να παρακολουθείται στενά η εξέλιξή της και να οργανωθούν περισσότερες έρευνες ώστε να είναι αποτελεσματικότερη και ασφαλέστερη η εφαρμογή της. (D'Arco, Di Fabrizio, Dolci, Petrarca, & Lupi, 2020)

2. Εφαρμογές μέτρησης σακχάρου στο αίμα με χρήση ακτινοβολίας THz

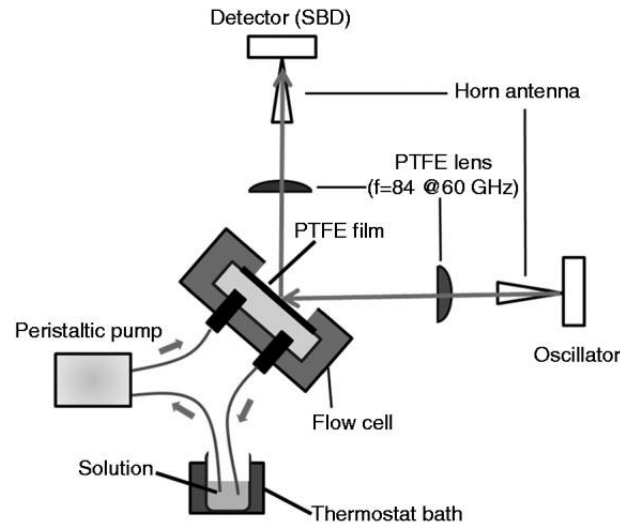
Τα περισσότερα βιομόρια ενεργοποιούνται μόνο σε υδατικά διαλύματα, επομένως, για να κατανοηθεί η λειτουργία και η δομή των βιομορίων είναι απαραίτητο να διερευνηθούν τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ενυδατωμένα δείγματα. Επειδή η ακτινοβολία THz είναι ιδιαίτερα απορροφήσιμη στο νερό χρησιμοποιείται ακτινοβολία sub-THz (με συχνότητες κοντά στο 0,1 THz), όπου η απορρόφηση είναι χαμηλότερη με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μέτρηση της ανάκλασης ενός διαλύματος νερού γλυκόζης. Έχει βρεθεί ότι η ανάκλαση μειώνεται ανάλογα με τη συγκέντρωση γλυκόζης. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η ακτινοβολία sub-THz μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μη επεμβατική μέτρηση των επιπέδων γλυκόζης στο αίμα.

Η επικρατέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της γλυκόζης στο αίμα είναι από λήψη δείγματος αίματος με τρύπημα της άκρης του δακτύλου, τη μεταφορά του σε τσιπ και μέτρηση με τη μέθοδο ηλεκτροδίου οξυγόνου ή με χρωματομετρικό

προσδιορισμό. Μία πιο προηγμένη μέθοδος χρησιμοποιεί μια συσκευή ρολογιού χειρός που ονομάζεται «γλυκοσκόπιο», η οποία καθορίζει το επίπεδο γλυκόζης στο αίμα χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρόδιο το οποίο είναι σε επαφή με το δέρμα. Και οι δύο παραπάνω μέθοδοι δημιουργούν κάποιο πόνο στο χρήστη, ενώ ταυτόχρονα, απαιτείται μια περισσότερο μη επεμβατική μέθοδος, ώστε να γίνει πιο φιλική στο χρήστη. Προς αυτήν την κατεύθυνση, οι ερευνητές έχουν προτείνει ένα νέο σύστημα για μη επεμβατικές μετρήσεις, με τη σημαντικότερη από αυτές να είναι η χρησιμοποίηση της ακτινοβολίας THz που είναι ανώδυνη (Torii, Chiba, Tanabe, & Oyama, 2017). Συγκεκριμένοι τρόποι δόνησης πολλών βιομορίων βρίσκονται στο εύρος συχνοτήτων THz, επομένως χρησιμοποιώντας την ακτινοβολία αυτή, είναι σε θέση να εξαχθούν συμπεράσματα μέσα από τα οποία, οι ειδικοί μπορούν να εκτιμήσουν και να προσδιορίσουν τις καταστάσεις βιολογικών μοριακών δεσμών.

Στην μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους (Torii, Chiba, Tanabe, & Oyama, 2017) ελέγχθηκε η διακύμανση της συγκέντρωσης γλυκόζης σε ένα μοντέλο διαλύματος σε συχνότητα 60 GHz, αξιοποιώντας απιονισμένο νερό, γλυκόζη και βόεια αλβουμίνη ορού για τα διαλύματα του δείγματος. Πιο συγκεκριμένα, η αλβουμίνη ελέγχει την οσμωτική πίεση που απαιτείται για τη διανομή των σωματικών υγρών μεταξύ των ενδοαγγειακών τμημάτων των ιστών του σώματος. Για να προσομοιωθεί το ανθρώπινο αίμα, θα πρέπει να εξεταστούν τα αποτελέσματα της αλβουμίνης.

Έτσι, χρησιμοποιήθηκε μια δίοδος TUNNETT και μια δίοδος GUNN για τον ταλαντωτή. Η ισχύς εξόδου της διόδου TUNNETT είναι περίπου 0,18mW και το πλάτος της γραμμής είναι περίπου 0,25 GHz. Η ισχύς της διόδου GUNN είναι περίπου 60mW. Στην εικόνα 15 απεικονίζεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση.



Εικόνα 15: Σχηματικό σχέδιο που δείχνει την οπτική διαμόρφωση του συστήματος μέτρησης ανάκλασης sub-THz (Torii, Chiba, Tanabe, & Oyama, 2017)

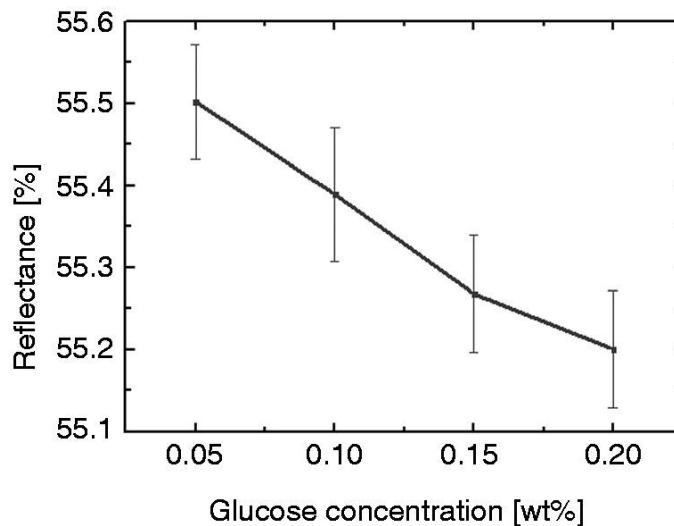
Η ακτινοβολία THz, που εκπέμπεται από μια συσκευή ταλαντωτή ημιαγωγών, εστιάζεται από έναν φακό πολύτετραφθοροαιθυλενίου (Plano-Convex Lenses - PTFE) σε μια κυψέλη ροής, στην οποία το δείγμα κυκλοφορεί από μια περισταλτική αντλία. Μετά την ανάκλαση από το κελί ροής, η ακτινοβολία THz εστιάζεται από έναν άλλο φακό PTFE και στη συνέχεια ανιχνεύεται από μια δίοδο φραγμού (Schottky Barrier Diode - SBD). Η αναλογία σήματος προς θόρυβο (S/N) του πειραματικού συστήματος είναι περίπου 140 dB. Η γωνία πρόπτωσης είναι 45 μοίρες και η ανακλαστικότητα υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$Refractance = \frac{V_{sol} - V_{noise}}{V_{back} - V_{noise}} \times 100[\%]$$

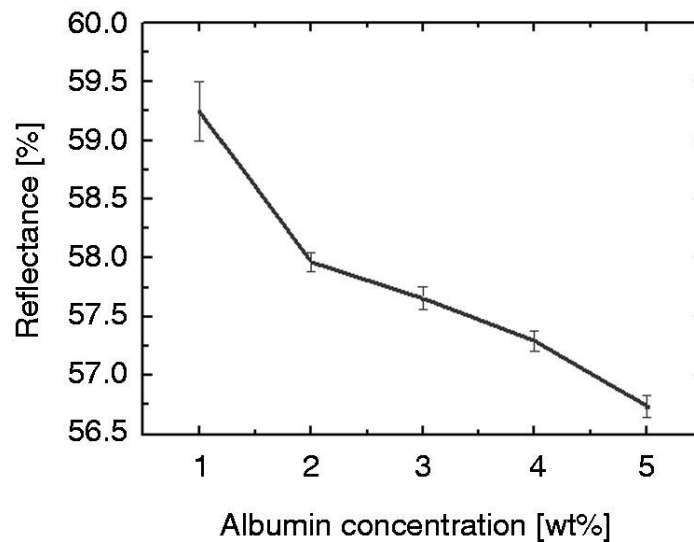
Όπου V_{sol} είναι η τάση που μετράτε όταν η ακτινοβολία THz ανακλάται από το υγρό δείγμα στο στοιχείο ροής, το V_{noise} είναι η τάση που μετράτε χωρίς την πηγή φωτός sub-THz και το V_{back} είναι η τάση που μετράτε όταν τοποθετείται μια μεταλλική πλάκα στη θέση του χαμηλού στοιχείου για αναφορά. Το V_{back} είναι η τάση για την ανακλαστικότητα αναφοράς σε αυτή τη μελέτη. Όταν η κυψελίδα ροής δεν περιέχει υγρό, η ακτινοβολία THz διέρχεται από αυτήν, διότι είναι κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο, υλικό το οποίο είναι εξαιρετικά διαφανές σε αυτές τις συχνότητες. Έτσι χρησιμοποιείται μία μεταλλική πλάκα για να μετρηθεί η ανακλαστικότητα του φόντου.

Το στοιχείο που μας ενδιαφέρει λοιπόν είναι η εξάρτηση της ανακλαστικότητας από τη συγκέντρωση της γλυκόζης. Στην εικόνα 16 απεικονίζεται η εξάρτηση της

ανακλαστικότητα για συγκεντρώσεις γλυκόζης από 0,05 έως 0,20% κ.β. και στην εικόνα 17 φαίνεται η εξάρτηση της ανακλαστικότητας για συγκεντρώσεις λευκοματίνης από 1,0 έως 5,0 κ.β.



Εικόνα 16: Εξάρτηση συγκέντρωσης 60 GHz ανάκλασης για συγκεντρώσεις γλυκόζης από 0,05% κ.β. έως 0,20% κ.β. σε 37 °C (Torii, Chiba, Tanabe, & Oyama, 2017)



Εικόνα 17: Εξάρτηση συγκέντρωσης 60 GHz ανάκλασης για συγκεντρώσεις λευκοματίνης από 1,0% κ.β. έως 5,0% κ.β. στα 37 °C. (Torii, Chiba, Tanabe, & Oyama, 2017)

Μετρώντας λοιπόν την εξάρτηση της αντανάκλασης της ακτινοβολίας THz από τη συγκέντρωση γλυκόζης και αλβουμίνης σε υδατικά διαλύματα σε θερμοκρασία 37 °C (Θερμοκρασία ανθρώπινου σώματος), αποδεικνύεται ότι η ανάκλαση μειώνεται ανάλογα με τη συγκέντρωση της γλυκόζης. Είναι δυνατή η καταγραφή συγκέντρωσης γλυκόζης από 0,05% κ.β., επίπεδο ευαισθησίας που μας επιτρέπει να κάνουμε διακρίσεις μεταξύ των επιπέδων γλυκόζης στο αίμα των διαβητικών και των υγιών ατόμων.

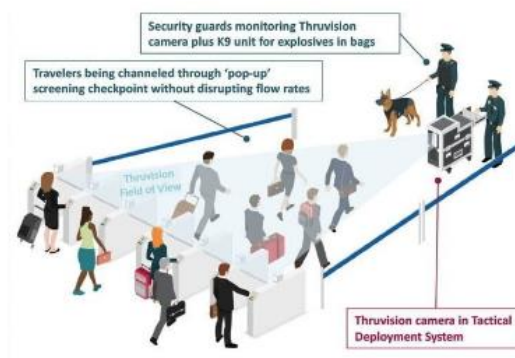
3. Τεχνολογία THz σε Στρατιωτικούς Σκοπούς – Έλεγχοι ασφαλείας

Με τον κίνδυνο των τρομοκρατικών επιθέσεων και μαζικών δολοφονιών των τελευταίων δεκαετιών αναδείχθηκε το πρόβλημα της ασφάλειας στον πολιτικό και τον στρατιωτικό κόσμο. Μια από τις πρόσφατες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν βασίζεται στην ανίχνευση εκρηκτικών υλών με τη βοήθεια της THz ακτινοβολίας. Μέχρι πριν από λίγα χρόνια τα προβλήματα λειτουργικών συσκευών (αισθητήρες και πηγές) καθιστούσαν απαγορευτική τη χρησιμοποίηση της τεχνολογίας αυτής για την ανίχνευση εκρηκτικών υλών. Η μέθοδος αυτή επικεντρώνεται στον έλεγχο ασφαλείας στη διαδικασία check-in των αεροδρομίων και στην ανίχνευση εκρηκτικών που πιθανών θα προσπαθήσουν να διέλθουν από τον έλεγχο.

Όσοι παρακολουθούνται δεν χρειάζεται να εισέλθουν σε κάποιο χώρο αλλά περπατώντας ανιχνεύονται χωρίς να το παρατηρήσουν. Δεν εκτίθενται σε κάποια ακτινοβολία αλλά η μέτρηση βασίζεται στην παθητική μέτρηση της ακτινοβολίας THz. Η τεχνολογία αυτή έχει ήδη υιοθετηθεί από επιλεγμένα λιμάνια εισόδου, τελωνεία και αεροδρόμια σε όλο τον κόσμο. Ανιχνεύοντας την θερμική ενέργεια που προέρχεται από το ανθρώπινο σώμα, μπορούμε να εντοπίσουμε κρυφά αντικείμενα σε ένα άτομο.

Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα στους ελέγχους ασφαλείας είναι πχ

1. Φασματοσκοπία μάζας χρωματογραφίας αερίου (GC-MS)
2. Χημειοφωτανγεία μάζας χρωματογραφίας αερίου (GC-CL)
3. Φασματόμετρα κινητικότητας ιόντων (IMS)



Εικόνα 18: THz σάρωση ατόμων για τον εντοπισμό κρυφών αντικειμένων (esa.int, 2020)

Σε στρατιωτικές εφαρμογές δύναται να πραγματοποιηθεί η ανίχνευση των χημικών ιχών και των μοριακών χαρακτηριστικών. Έχει αποδειχθεί ότι τα περισσότερα από αυτά τα μόρια έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά απορρόφησης/διασποράς, τα οποία είναι σε θέση να παρέχουν ορισμένες πληροφορίες. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η αποκάλυψη αεροσκαφών, εξοπλισμού καυσίμων και συντήρησης καθώς και αντιαεροπορικά πυροβολικά συστήματα, με βάση την χημική τους σύνθεση και το επίπεδο της απορρόφησης. Επίσης, μέσω της διάκρισης μεταξύ των διαφόρων τύπων εκρηκτικών υλών, υφασμάτων και μετάλλων μέσα στο βουνό θα μπορούσε να εντοπίσει καθαρά την ύπαρξη κάποιων στρατιωτικών εγκαταστάσεων στο σημείο.

Μια άλλη στρατιωτική εφαρμογή είναι η διαδικασία της στοχοποίησης. Τα περισσότερα αεροσκάφη χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό από ραντάρ συνθετικού διαφράγματος (Synthetic-aperture radar - SAR) και από ροές βίντεο οπτικών/υπέρυθρων (Electro-Optical/Infra-Red - EO/IR) για την στόχευση συγκεκριμένων αντικειμένων στο έδαφος. Η ανάπτυξη και η εξέλιξη της ικανότητας στόχευσης με την THz ακτινοβολία συνεργαζόμενη με το SAR θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στόχευσης. Παράλληλα, η συνεργασία με τους αισθητήρες EO/IR θα προσέφερε μία επικαλυπτικά ακριβή εικόνα και θα επιτάχυνε την εύρεση των στόχων σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα. Η ανίχνευση της αυτοσχέδιας εκρηκτικής ύλης σε συνδυασμό με ενδείξεις ότι υπάρχουν άνθρωποι κρυμμένοι στα οχήματα θα μπορούσαν να είναι ενδείκτες μιας επικείμενης επίθεσης. (Εικόνα 19)



Εικόνα 19: Χάρτης SAR και εικόνα βίντεο pod EO / IR με δυνατότητα φίλτρου THz (Υποθετική εικόνα) (Damien , 2020)

Επίσης μπορεί να βοηθήσει σε αποστολές εντοπισμού προσωπικού σε αεροπορικά ατυχήματα ή ομάδες ατόμων, τα οποία χρήζουν διάσωσης. Επίσης, σε περιβάλλοντα όπου οι καταιγίδες σκόνης στη Μέση Ανατολή είναι συχνές, οι συχνότητες THz, λόγω του

μικρού μήκους κύματος, αποτελούν την ιδανική επιλογή για εύρεση και παρακολούθηση στόχων σε μέγεθος ανθρώπου.

Πέραν των ανωτέρω, είναι χρήσιμο να παρατεθεί η σχετική ανάλυση του NATO για την εφαρμογή της Φυσικής και της Βιοφυσικής THz για την Ασφάλεια, όπως κωδικοποιήθηκε από τους Corsi & Sizov, στο έργο του 2014. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο των λειτουργιών που μπορούν να επιτευχθούν μέσω της τεχνολογίας των THz, έχει καταγραφεί η αξιοσημείωτη χρήση της και ως ένα καινοτόμο σύστημα με κύριο σκοπό την ανίχνευση και εύρεση αντικειμένων που βρίσκονται κάτω από τα ρούχα των ανθρώπων. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα δυνατότητα γίνεται πιο εύγλωττη και κατανοητή αν αναζητηθεί το σύστημα στο οποίο βασίζεται. Έτσι, το ίδιο είναι απότοκο μιας εμπορικά διαθέσιμης κάμερας THz, η οποία δεν είναι μια συμβατική μηχανική συσκευή αλλά στην πραγματικότητα διαθέτει ένα ειδικά σχεδιασμένο λογισμικό που επεξεργάζεται απεικονιστικά σχήματα και τη σύντηξη. (Corsi & Sizov, 2014)

Εν συνεχεία, υπάρχει μια άλλη κάμερα για το ορατό φως, προκειμένου να καταγραφεί η ίδια εικόνα που επεξεργάζεται αργότερα και βρίσκεται σε άμεσο συσχετισμό με την εικόνα που έχει αποδώσει η τεχνολογία THz μέσω του σχεδιασμένου αλγορίθμου σύντηξης. Στην πραγματικότητα, αυτή η τελικά συγχωνευμένη εικόνα δημιουργεί τις προϋποθέσεις, ούτως ώστε η ορατότητα των ανιχνευόμενων αντικειμένων να αυξηθεί σημαντικά σε βαθμό που μπορεί να επιτευχθεί ο στόχος της εξακρίβωσης κεκαλυμμένων αντικειμένων. (Vaseashta, 2014)

Ταυτόχρονα, μια αξιοσημείωτη πτυχή της χρησιμότητας των διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας της εικόνας αυτής συνιστά η καταληκτική και κατάλληλη αξιολόγηση της ποιότητάς της. Για την επίτευξη του παρόντος στόχου έχουν προταθεί, στη συγκεκριμένη βιβλιογραφία, η αξιοποίηση ενός συνδυαστικού μοντέλου αξιολόγησης δύο εικόνων, ως μια από τις σημαντικότερες μεθόδους εξακρίβωσης της ποιότητας των συγχωνευμένων εικόνων, από τη μία, και για τη σύγκριση των αλγορίθμων σύντηξης εικόνας, από την άλλη. (Corsi & Sizov, 2014)

Παράλληλα, σχεδιάστηκε ένα κινούμενο, αλλά ασύρματα ελεγχόμενο θερμικό ομοίωμα για τη δοκιμή της λειτουργίας των καμερών στο βεληνεκές δράσης της τεχνολογίας των THz. Κατά συνέπεια, η κάμερα των THz που λειτουργεί στα 0,25 THz, και η τυπική θερμική κάμερα χρησιμοποιήθηκαν για τις εν λόγω δοκιμές. Για να δοθούν σωστές συμπερασματικές τοποθετήσεις από το εν λόγω πειραματικό στάδιο, οι αρμόδιοι προχώρησαν στη σύγκριση των εικόνων που λήφθηκαν για το ομοίωμα και για έναν άντρα. Το απότοκο της διαδικασίας αποτύπωσης των εικόνων ήταν αρκετά ικανοποιητικό, ως προς

τις ομοιότητες που ενυπάρχουν και στην περίπτωση γυμνών και ντυμένων «στόχων» με κρυμμένα αντικείμενα, όπως όπλα, μαχαίρια, ή ακόμα και βόμβες. Είναι φανερό, επομένως, ότι η σταθερότητα της θερμοκρασίας του ομοιώματος είναι επαρκής για την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με την αποτελεσματικότητα των καμερών αυτών για τον ανωτέρω στόχο. (Vaseashta, 2014)

Με βάση τις επιστημονικές αυτές συμπερασματικές θέσεις, επισημαίνεται ως ιδιαίτερα υποσχόμενη αλλά και οικονομική η υπολογιστικά αποκτώμενη επεξεργασία των εικόνων από την κάμερα THz, ειδικά όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε απαιτητικές διαδικασίες ασφάλειας και άμυνας. Η εκμετάλλευση των ερευνητικών εργαλείων ανάλυσης δεδομένων και η προετοιμασία προγνωστικών μοντέλων είναι το επόμενο βήμα στην κατάκτηση της παραπάνω τεχνολογίας. (Corsi & Sizov, 2014)

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας έρευνας, δοκιμάστηκαν διαφορετικές μέθοδοι επεξεργασίας εικόνας και αλγόριθμοι, προκειμένου να υπολογισθεί η αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητά τους. Κατά συνέπεια, η αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν αλλά και των λογισμικών κωδίκων, κατά βάση εξαρτώνται από την απόσταση μεταξύ του ανθρώπινου σώματος της κάμερας, βασίζεται στο μέγεθος του στόχου και στον τύπο του. (Corsi & Sizov, 2014)

Κρίθηκε αναγκαίο να επισημανθεί ότι το μοντέλο της χρήσης μίας μεθόδου, ως ο μοναδικός ασφαλής τρόπος επεξεργασίας εικόνας για κάθε δυνατό σενάριο και κατάσταση που μπορεί να προκύψει, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μία αποτελεσματική πρακτική. Επιπρόσθετα, για να λυθεί το ακανθώδες ζήτημα της ανάγκης για βελτίωση της ποιότητας της εικόνας πρέπει να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά διαφορετικοί αλγόριθμοι. Σε αυτήν την προσπάθεια, ένα πολλά υποσχόμενο αποτέλεσμα της έρευνας συνιστά ο αλγόριθμος της σύντηξης εικόνας. (Corsi & Sizov, 2014)

Στις διεξαχθείσες έρευνες αναφορικά με τον συνδυασμό των εικόνων της τεχνολογίας των THz και της οπτικά ορατής εικόνας (Visible Imaging System - VIS) παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μεγάλη προοπτική στο συνδυασμό δύο εικόνων από διαφορετικές φασματικές περιοχές, ειδικά για τις εφαρμογές της πρακτικής αυτής στον τομέα της ασφάλειας. (Vaseashta, 2014)

Σε συνέχεια των παραπάνω, στην εργασία των Corsi & Sizov (2014), το βάρος της επιστημονικής προσοχής επικεντρώθηκε στην εξαγωγή των πιο πολύτιμων χαρακτηριστικών που κάθε εικόνα μπορούσε να προσφέρει, και στην συνέχεια εγχειρήθηκε η διαδικασία του συνδυασμού τους. Βέβαια, απαιτείται μεγαλύτερη και πιο εμπειρισταωμένη έρευνα του συγκεκριμένου κλάδου, προκειμένου μακροπρόθεσμα να

επιτευχθεί η περαιτέρω ανάπτυξη των αλγορίθμων σύντηξης εικόνας καθώς και ο συνδυασμός της VIS, της τεχνολογίας των THz και των θερμικών εικόνων. (Corsi & Sizov, 2014)

Η μεθοδολογία αξιολόγησης της ποιότητας της εικόνας καταφέρνει να καταδείξει την δυνατότητα εκτίμησης των εικόνων και την ίδια την ανθρώπινη αντίληψη αυτών, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό διαφόρων IQA μεθόδων, μιας και κατά τη διάρκεια των ερευνών της τεχνικής της σύντηξης εικόνας επέτρεψε στους επιστήμονες να επιλέξουν τον καταλληλότερο αλγόριθμο σύντηξης για περαιτέρω εφαρμογή στο τελικό σύστημα. (Corsi & Sizov, 2014)

Κλείνοντας, είναι ανάγκη να επισημανθεί ότι οι τελικές εικόνες που ανακτήθηκαν από την χρήση της παρούσας τεχνολογίας στο ζήτημα της εξακρίβωσης και ανίχνευσης κρυφών αντικειμένων παρουσίασαν μία ικανοποιητική ομοιότητα μεταξύ του άνδρα και του ομοιώματος που παρατηρείται στα THz και τις υπέρυθρες ακτινοβολίες. Το ομοίωμα υποβλήθηκε στον έλεγχο των θερμικών και των φωτογραφικών μηχανών της τεχνολογίας των THz, με τις ομοιότητες μεταξύ των εικόνων ενός ατόμου και εκείνου, να είναι υπαρκτές είτε με την παρουσία ένδυσης είτε όχι, ενώ η σταθερότητα της θερμοκρασίας του απέφερε ικανοποιητικά αποτελέσματα. (Corsi & Sizov, 2014)

Πέραν των ανωτέρω, είναι γνωστό, όπως προαναφέρθηκε ότι τα συστήματα THz είναι αρκετά μεγάλα και πολύ ακριβά, είτε αφορά τα ολοκληρωμένα συστήματα, είτε τις μεμονωμένες ενεργές συσκευές front - end και τα παθητικά εξαρτήματα. Αυτός είναι και ένας από τους πιο σημαντικούς λόγους, για τον οποίο δεν υπάρχουν επί του παρόντος εφαρμογές της τεχνολογίας του φάσματος της συχνότητας THz, από το 0,3 έως τα 10 THz. Καθώς, όμως, κινείται κανείς προς το υψηλότερο μέρος του φάσματος THz , από 10 έως 100 THz, είναι δυνατή η δημιουργία προσιτών συστημάτων για εμπορική εκμετάλλευση, για συγκεκριμένες εξειδικευμένες εφαρμογές, με τις θερμικές υπέρυθρες ζώνες συχνοτήτων, συνήθως από 20–40 THz και 60–100 THz, να είναι οι πιο γνωστές εφαρμογές στη θερμογραφία. (Vaseashta, 2014)

Πρόσφατα παρουσιάστηκε και η ιδέα «THz Torch», μία τεχνολογία , η οποία εκμεταλλεύεται ριζικά την ακτινοβολία μαύρου σώματος, με το εξαιρετικά χαμηλό κόστος παραγωγής της, διαχωρίζοντας τη θερμικά παραγόμενη ισχύ φασματικού θορύβου σε προκαθορισμένα και προδιαγεγραμμένα κανάλια συχνότητας. Στην συνέχεια η ενέργεια αυτή σε κάθε κανάλι προκαλεί ανεξάρτητα παλμική διαμόρφωση και μετάδοση, δημιουργώντας μια ισχυρή μορφή ασφαλούς μικρής εμβέλειας επικοινωνία στην ακρότατη ή μεσαία υπέρυθρη ακτινοβολία. (Corsi & Sizov, 2014)

Κάποια πρόσφατα ή και παλαιότερα περιστατικά σχετικά με την ασφάλεια και το έλεγχο έχουν προκαλέσει αλλαγές στις μεθόδους. Τα συστήματα ελέγχου και ασφάλειας, τα οποία χρησιμοποιούνταν στους ελέγχους ασφαλείας στα αεροδρόμια και σημεία ελέγχου ασφαλείας στα σύνορα, αποδείχθηκε ότι χρήζουν προσθηκών και βελτιώσεων (Vaseashta, 2014). Για παράδειγμα, κατά τον έλεγχο των φορτίων σε μεγάλα μεταφορικά μέσα στα πολυσύχναστα συνοριακά σημεία ελέγχου, είναι αναγκαίος ο έλεγχος χιλιάδων εμπορευματοκιβωτίων σε πολύ σύντομο χρόνο. Για το λόγο αυτό με τα σύγχρονα μέσα ελέγχου δεν είναι εφικτή η αποτελεσματική και γρήγορη διερεύνηση κάθε κοντέινερ. Και έτσι υπήρξε μεγάλη ανάγκη και μία συνεχώς αυξανόμενη εστίαση στις νέες τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν στους ελέγχους ασφαλείας σε κατάσταση αναμονής, είτε με σκοπό την απλοποίηση είτε με σκοπό την επιτάχυνση της διαδικασίας του, είτε με σκοπό την παροχή πρόσθετης λειτουργικότητας. (Corsi & Sizov, 2014)

Η τεχνολογία THz, όπως αναλύθηκε και ανωτέρω, είναι μια πολλά υποσχόμενη και αναδυόμενη τεχνολογία και έχει εξεταστεί σε διάφορες μορφές. Πιο συγκεκριμένα, στο πεδίο της μάχης, ένας από τους σημαντικότερους φορείς απειλής είναι αυτοσχέδιες εκρηκτικές συσκευές (improvised explosive devices – IEDs), τα οποία χρησιμοποιούνται σε διάφορες μορφές, όπως είναι για παράδειγμα τα οχήματα που φέρουν οχήματα (vehicle borne IEDs - VBIEDs) ή δεμένα σε ανθρώπους σε εμφανείς τοποθεσίες. Τα συστήματα απεικόνισης THz μπορούν να αξιοποιηθούν και να χρησιμοποιηθούν για την απεικόνιση τέτοιων διανυσμάτων απειλής, καθώς τέτοια υλικά έχουν χαρακτηριστικά φάσματα THz. (Corsi & Sizov, 2014)

Η χρήση του φωτισμού THz με επαρκή επίπεδα ισχύος σε συνδυασμό με την χρήση της γρήγορης εικόνας για την ανίχνευση και την επεξεργασία των στόχων, έχει δείξει ότι μπορεί να απεικονιστούν τα μη μεταλλικά όπλα όταν αυτά κρύβονται κάτω από τα ρούχα. Επίσης, και τα υλικά εμπόδια, τα οποία είναι πιθανόν να προκαλέσουν σύγχυση, έχουν ομαλά φάσματα με σχετικά χαμηλή εξασθένηση. Επίσης, οι συχνότητες THz και η τεχνολογία αυτή, που αρχικά αποσκοπούσε στην στενή ζώνη των 830 GHz μαζί με οπτική ανάμιξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό μεταλλικών και διηλεκτρικών αντικειμένων. (Vaseashta, 2014)

Από την άλλη, όταν ο σκοπός είναι ο προσδιορισμός των χημικών συνθέσεων των εκρηκτικών υλικών και των μικτών χημικών, θα πρέπει να αξιοποιηθούν οι κεραίες ευρείας ζώνης (ευρυζωνικές). Έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία η πιθανή χρήση της απεικόνισης και της τεχνολογίας THz σε ενεργά και παθητικά συστήματα απεικόνισης με σκοπό την

ανίχνευση των χημικών και των βιολογικών παραγόντων με την απομακρυσμένη παρακολούθηση των σημάτων. (Corsi & Sizov, 2014)

Επίσης, όσον αφορά την ασφάλεια είναι πολύ σημαντική και η χρήση της τεχνολογίας αυτής για την stand-off ανίχνευση, με την χρήση νανοϋλικών για τη δημιουργία και την ανίχνευση σήματος απόκρισης. Παράλληλα, αυτό επίσης έχει αξιοποιηθεί για να αποδειχθεί ότι τα φάσματα THz πολλών κοινών χημικών, οι εκρηκτικές ενώσεις και τα φαρμακευτικά προϊόντα χαρακτηρίζονται από ευκολία αναγνώρισης μέσω της τεχνολογίας αυτής. (Corsi & Sizov, 2014)

Παράλληλα, στον τομέα αυτό, η επιτυχής χρήση των συστημάτων κύματος χιλιοστών, έχει οδηγήσει στο να αξιοποιούνται και να χρησιμοποιούνται υψηλότερες συχνότητες, οι οποίες συχνότητες προσφέρουν συμπαγή συστήματα, ειδικά χρησιμοποιώντας υλικά σε μειωμένες διαστάσεις. (Corsi & Sizov, 2014)

Αξίζει να αναφερθεί ότι πολλά εξαρτήματα και συστήματα βρίσκονται υπό ανάπτυξη σχετικά με την συγκεκριμένη τεχνολογία, σε εύρος μεγάλο συχνοτήτων THz. Το τρέχον σύστημα THz είναι ακόμα σε εργαστηριακή κλίμακα R&D, ωστόσο, οι προβλεπόμενες εφαρμογές κυμαίνονται από την καταστροφή των όπλων από απόσταση, την απεικόνιση κρυφών μεταλλικών αντικειμένων και την ανίχνευση παραποιημένων νομισμάτων, την προστασία διαβαθμισμένων πληροφοριών και τον ψηφιακό έλεγχο γνησιότητας των προϊόντων. Ακόμα, όμως είναι απαραίτητη η έρευνα με σκοπό την βελτιστοποίηση των τεχνολογιών και την επίλυση πιθανών προβλημάτων, κυρίως λόγω της χρήσης ελαφρών συσκευών THz με την τεχνολογία συστημάτων νανοτεχνολογίας. (Corsi & Sizov, 2014)

4. Τομογραφία εντοπισμού ελαττωμάτων σε μη μεταλλικά διηλεκτρικά υλικά

Τα συστήματα φασματοσκοπίας (THz-TDS) μπορούν να εφαρμοστούν σε λειτουργία «pulse echo» για τομογραφική εφαρμογή. Στο πείραμα εκτελείται μια επιθεώρηση κυλινδρικών δειγμάτων πολυαιθυλενίου με εσωτερικά κενά γνωστού σχήματος. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης και του αλγόριθμου ανασυγκρότησης, με βάση μια τροποποιημένη τεχνική συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Focusing Technique - SAFT). Με βάση αυτό, βελτιώθηκε η ποιότητα των ανακατασκευασμένων τομογραφιών. (Fratzscher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012)

Για την ογκομετρική εξέταση της ακεραιότητας ενός υλικού, απαιτείται να βρεθούν διαχωρισμοί επιπέδων υλικών καθώς και πιθανά ογκομετρικά κενά μέσα στο αντικείμενο.

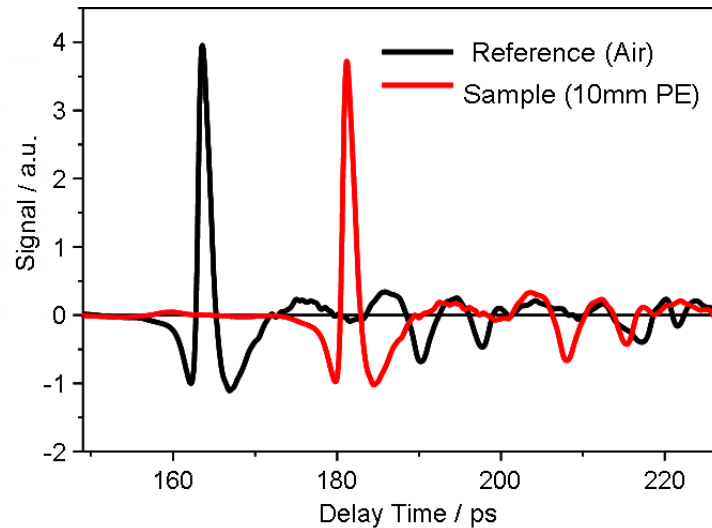
Οι επικρατούσες μέθοδοι σε τέτοιες εξετάσεις υλικών είναι δοκιμές υπερήχου (UT) και η ακτινογραφία ακτίνων X. Και οι δύο παρέχουν διαφορετικές πιθανότητες ανίχνευσης για διαχωρισμούς επιπέδου υλικού ανάλογα με την κατεύθυνση του διαχωρισμού. Η ακτινογραφία μπορεί να ανιχνεύσει επίπεδα αλλοιώσεις, προσανατολισμένα προς την κατεύθυνση της ακτίνας X, ενώ στις δοκιμές με τη μέθοδο του υπερήχου ανιχνεύονται καλύτερα τα αλλοιώσεις που είναι κάθετα προσανατολισμένα προς την ηχητική κατεύθυνση. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει ο υπέρηχος είναι ότι η πρώτη ασυνέχεια που θα συναντήσει στο υλικό θα αποκρύψει πιθανές ασυνέχειες πίσω από αυτή. Οι τεχνολογίες απεικόνισης THz για μη μεταλλικά υλικά δείχνουν κάποιες ομοιότητες με τον υπέρηχο, διότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μια τεχνική παλμού echo (PE) (Fratzscher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012).

Υλικά που μπορεί να εξεταστούν είναι οπτικά αδιαφανή διηλεκτρικά όπως το χαρτί, τα υφάσματα και τα πλαστικά. Αντίθετα, τα ηλεκτρικά αγωγά υλικά, όπως τα μέταλλα δεν μπορούν να εξεταστούν με κύματα THz λόγω του φαινομένου «Electric-field screening». Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται πιθανές αλληλεπιδράσεις των κυμάτων THz με διαφορετικά υλικά.

	Penetration	Reflection	Volumetric	Surface
Metals	no	interfaces	no	yes
Plastics (low DK)	high	interfaces	yes	yes
Plastics (high DK)	medium	interfaces	limited	yes
Plastic on metals (low DK)	high	interfaces	yes	yes
Glass fiber composites	medium	interfaces	limited	yes
Carbon fiber composites unidirectional	Medium, polarized radiation	interfaces	limited	yes
Carbon fiber composites multidirectional	no	interfaces	no	yes
Human Skin, water	low	interfaces	low	yes

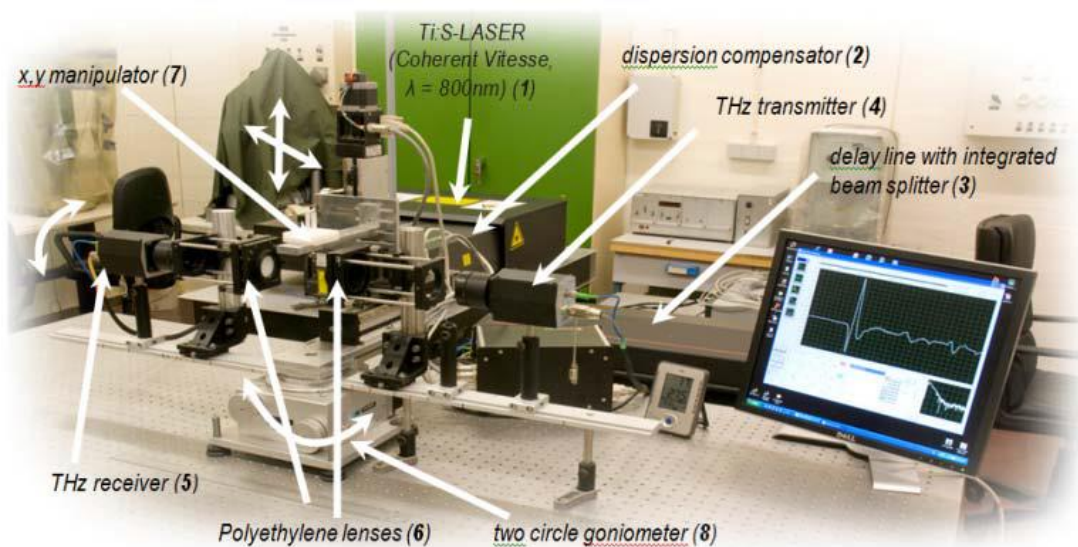
Πίνακας 1: Περιοχές εφαρμογής επιθεώρησης με βάση τα κύματα THz (Fratzscher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012)

Στην εικόνα 20 απεικονίζεται μέτρηση δείγματος πολυαιθυλενίου πάχους 10 mm όπου παρατηρούμε την αλλαγή του παλμού αφού περάσει το δείγμα σε σχέση με τον παλμό εισόδου. Η μετατόπιση του χρόνου καθώς και η πτώση του μέγιστου πλάτους δίνει τις πρώτες πληροφορίες για τις διηλεκτρικές ιδιότητες του δείγματος που διερευνάται.



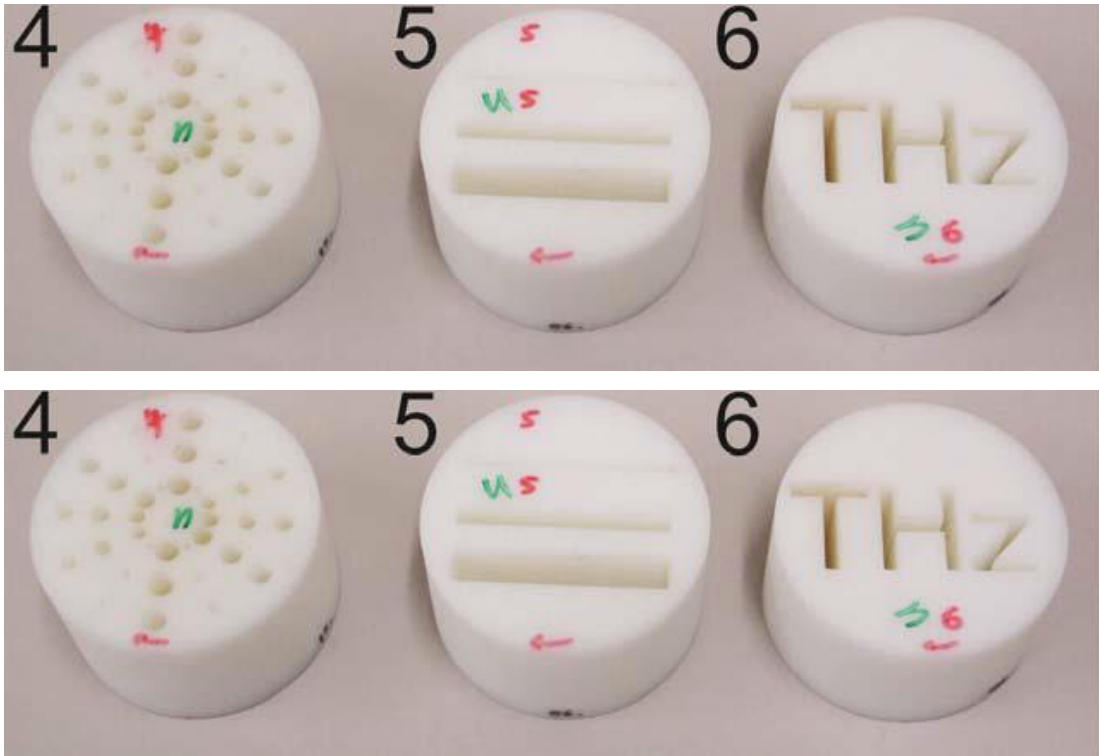
Εικόνα 20: Μετρημένο πλάτος του ηλεκτρικού παλμού μιας ελεύθερης διάδοσης δέσμης terahertz σε καθαρό αέρα (μαύρο) και μετά από διέλευση 10 mm πολυαιθυλενίου (κόκκινο) (Fratzcher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012)

Η εγκατάσταση όπου γίνεται η δοκιμή σύμφωνα με τη μελέτη των (Fratzcher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012) φαίνεται στην εικόνα 21. Το σύστημα (THz-TDS) που χρησιμοποιείται αποτελείται από ένα παλμικό λέιζερ (1), έναν αντισταθμιστή διασποράς (2), καλώδια από ίνες υάλου, μία γραμμή καθυστέρησης με έναν ενσωματωμένο διαχωριστή δέσμης (3), ένα πομπό THz (4) και έναν δέκτη THz (5). Φακοί πολυαιθυλενίου (6) είναι τοποθετημένοι σε γωνιόμετρο δύο κύκλων (8) ενώ για εφαρμογές απεικόνισης ενσωματώνεται ένας χειριστής x,y (7).



Εικόνα 21: Φωτογραφία του χρησιμοποιούμενου φασματομέτρου περιοχής χρόνου THz με ενσωματωμένους χειριστές στη διαμόρφωση μετάδοσης (Fratzcher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012)

Τα δείγματα της εικόνας 22 που χρησιμοποιήθηκαν είναι κύλινδροι πολυαιθυλενίου με διάμετρο 60mm με ποικιλία γεωμετρικών κενών όπως οπές, σχισμές, ορθογώνια και ελλειψοειδή με διαφορετικές γεωμετρικές επεκτάσεις. Τοποθετούνται σε μία ομοαξονική περιστρεφόμενη βάση για την εκτέλεση της σάρωσης.

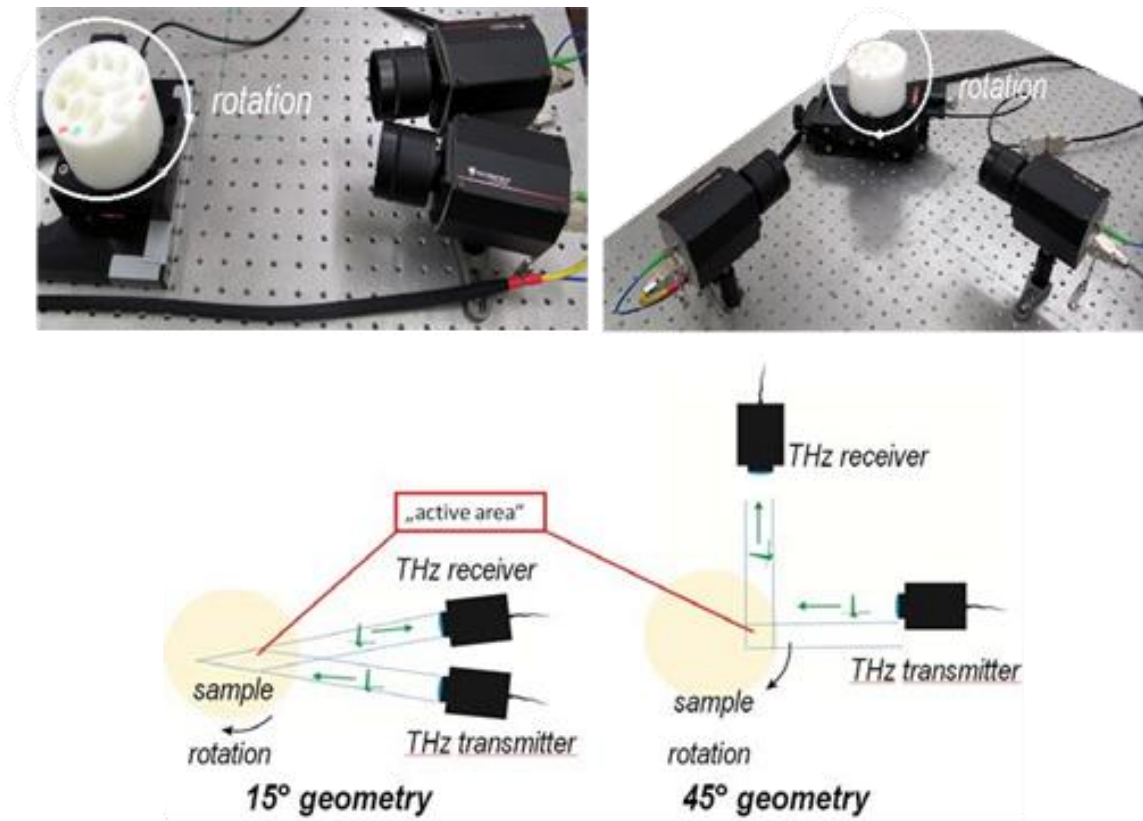


Εικόνα 22: Κύλινδροι δοκιμής υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) με διαφορετικούς τύπους κενών (Daniel, Joerg, Lars) (Fratzcher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012)

Οι φωτογραφίες και τα σχέδια της εικόνας 23 δείχνουν τις δύο διαφορετικές θέσεις πομπού και δέκτη THz που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Επιλέχθηκε μια γωνία πρόσπτωσης $\pm 15^\circ$ ή $\pm 45^\circ$ σε σχέση με την κανονική επιφάνεια για να αλλάξει η διατομή της παρατηρήσιμης περιοχής ενδιαφέροντος (ενεργή περιοχή) μέσα στο αντικείμενο.

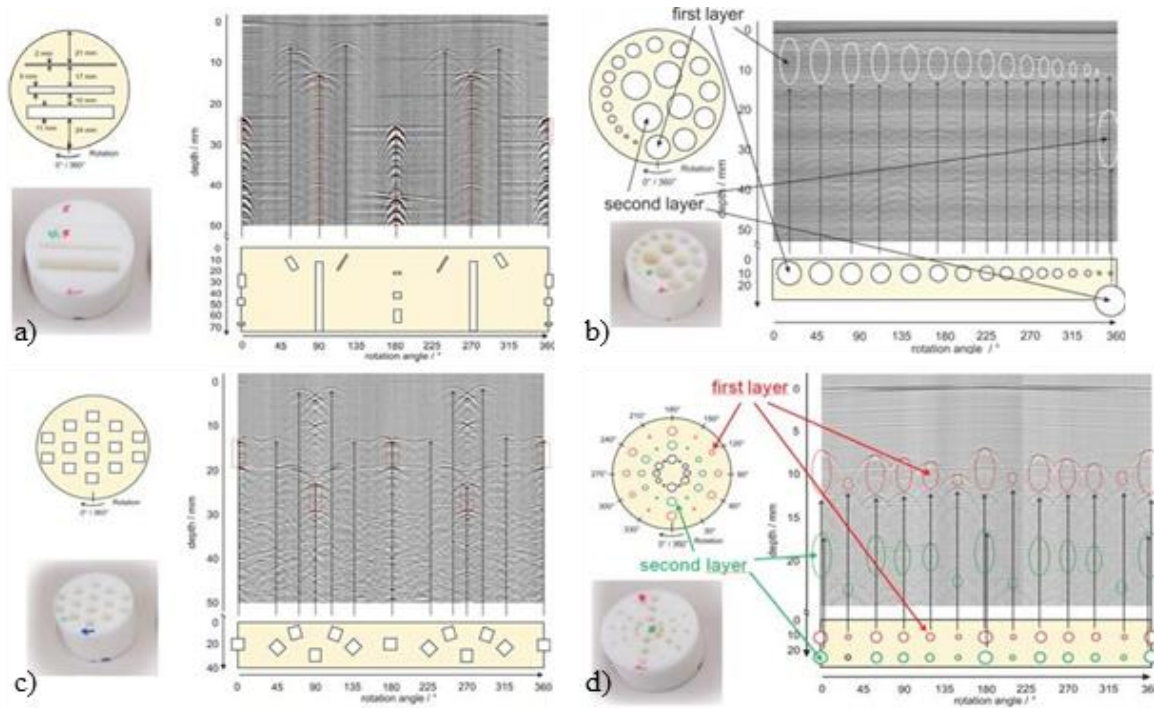
Τα βήματα περιστροφής επιλέχθηκαν σε κάθε 2° από 0° - 360° για σάρωση του σφαιρικού δείγματος δοκιμής.

Για κάθε θέση γωνίας, η ανακλώμενη παλμός παλμού THz καταγράφηκε με τη λειτουργία μακράς σάρωσης για να αυξηθεί το ανιχνεύσιμο χρονικό διάστημα καθυστέρησης. Οι πληροφορίες ToF (Time of Flight) αποθηκεύτηκαν κατά τη διάρκεια της σάρωσης από τον υπολογιστή.



Εικόνα 23: (Fratzsch, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012)

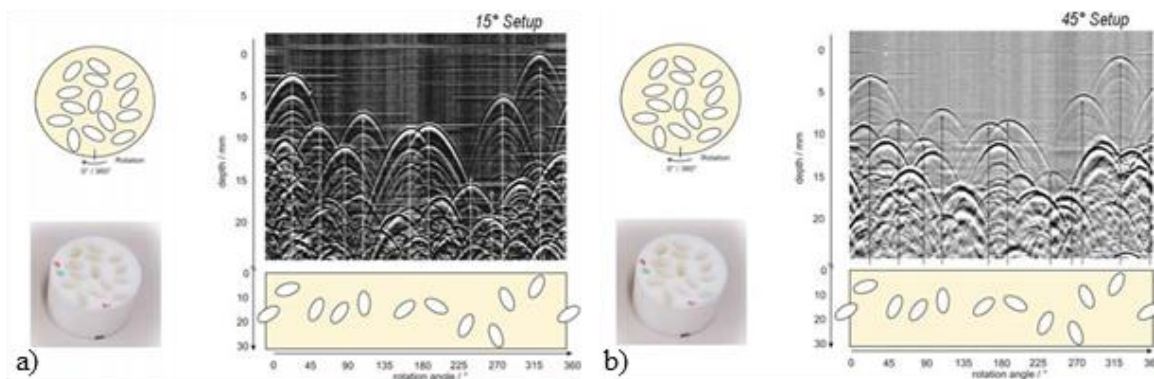
Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν δύο διαστάσεις που παρουσιάζουν την κατανομή των εύρους παλμού του ήχου, ως συνάρτηση του χρόνου για κάθε θέση γωνίας. Οι τιμές του πλάτους έχουν μετατραπεί σε γκρι τιμές για καλύτερη οπτικοποίηση. Η σάρωση b) περιέχει γενικά τις πληροφορίες πλάτους της ηχώ, αλλά δεν διαχωρίζει τα ανακλώμενα και τα διαθλασμένα κύματα.



Εικόνα 24: Απεικονίσεις (ToF εικόνες) από δείγματα (Fratzcher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012)

Στην εικόνα 24 παρατηρούμε τα αποτελέσματα για κάθε γωνία πρόσπτωσης. Οι λευκοί κύκλοι στην σάρωση b) έχουν σχεδιαστεί για να τονιστεί η κατανομή των κυλινδρικών οπών με διαφορετική διάταξη και μέγεθος στην εικόνα. Ανάλογα με την γεωμετρία των κενών παρατηρείται και μία διαφοροποίηση των καμπυλών, ειδικά στα σχήματα a) και d). Παρατηρούμε επίσης και την ανίχνευση σε βάθος, στο σχήμα d. Τα κόκκινα σημάδια δείχνουν κενά που είναι στην επιφάνεια του αντικειμένου και τα πράσινα στο κέντρο.

Στην εικόνα 25 απεικονίζονται αποτελέσματα δείγματος με διάσπαρτες καμπύλες με γωνίες πρόσκρουσης $\pm 45^\circ$ και $\pm 15^\circ$. Παρατηρούμε ότι οι τμηματοποιημένες καμπύλες δείχνουν ισχυρότερη εξασθένηση προς τα πλάγια για τις $\pm 45^\circ$ απ'ότι στις $\pm 15^\circ$. Αυτό εξηγείται από την μικρότερη ενεργή περιοχή όπως στην εικόνα 23.



Εικόνα 25: Σύγκριση σαρώσεων σε γωνίες 15 και 45 μοιρών (Fratzcher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012)

Οι σαρώσεις δείχνουν συσχέτιση των καμπυλών με την γεωμετρία των εσωτερικών κενών και το μέγεθός τους ανάλογα με την ενεργή περιοχή. Δεν παρέχεται όμως άμεσα η πληροφορία για την θέση και το σχήμα των κενών. Προς επίλυση του προβλήματος αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος, ανάλογα με το ραντάρ συνθετικού διαφράγματος (SAR) και την τεχνική εστίαση συνθετικού ανοίγματος (SAFT), όπως εφαρμόζεται στις τεχνικές UT για τον υπολογισμό της διατομής του δείγματος.

Από το παραπάνω πείραμα συνάγεται εύλογα το συμπέρασμα ότι η τεχνική απεικόνισης με παλμό THz είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε μη μεταλλικά διηλεκτρικά υλικά. Με τον τρόπο αυτό, έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο προσομοίωσης για την ανακατασκευή ενός τομογράφου διατομής. Η τομογραφία THz με βάση τον αλγόριθμο SAFT επιτρέπει την οπτικοποίηση του μεγέθους και της θέσης των κενών στο συνολικό όγκο του αντικειμένου που διερευνήθηκε. Η ποιότητα μιας ανακατασκευασμένης εικόνας μπορεί να βελτιωθεί διερευνώντας τη φωτιζόμενη περιοχή μέσα στο αντικείμενο, τη θέση και το άνοιγμα του πομπού και του δέκτη καθώς και το σχήμα της δέσμης. Η ποιότητα μειώνεται εάν το μέγεθος των κενών είναι μεγαλύτερο από την ενεργή περιοχή. (Fratzcher, Beckmann, Chranowski, & Ewert, 2012).

5. Γεωργικές εφαρμογές της τεχνολογίας THz

Όπως προαναφέρθηκε, τα κύματα Terahertz (THz) είναι οι μη ιονίζουσες ακτινοβολίες που παρουσιάζουν τις μοναδικές ιδιότητες τόσο των μικροκυμάτων όσο και των υπέρυθρων. Η απεικόνιση και η φασματοσκοπία με THz έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στις λεγόμενες «μη καταστρεπτικές δοκιμές», στις επικοινωνίες, στη διαλογή ασφαλείας, στην βιοϊατρική απεικόνιση, καθώς και στον ποιοτικό έλεγχο σε αμφότερες τις βιομηχανίες τροφίμων και τις βιομηχανίες γεωργίας (Wang et al, 2018).

Αρχικά, η πρώτη χρήση της τεχνολογίας αυτής στην γεωργία έγινε για την παρακολούθηση της περιεκτικότητας των φύλων σε νερό. Λόγω της ισχυρής απορρόφησης της ακτινοβολίας THz από τα μόρια του νερού, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την παρακολούθηση της περιεκτικότητας σε νερό των φύλων των φυτών και την ανταπόκριση του προβλήματος (άγχους) της ξηρασίας στα φυτά. Οι μετρήσεις του περιεχομένου του νερού και η παρακολούθηση του στρες της ξηρασίας μπορούν να αξιοποιηθούν από τους αγρότες για τη διαχείριση της άρδευσης και για τον σωστό προγραμματισμό του ποτίσματος (Afsah-Hejri et al, 2020).

Παράλληλα, η δεύτερη αξιοποίηση της τεχνολογίας αυτής στην γεωργία αφορά την ανίχνευση των φυτοφαρμάκων, των μυκητοκτόνων, των εντομοκτόνων και των επιβλαβών ενώσεων στο έδαφος. Αυτές οι ουσίες, δηλαδή τα φυτοφάρμακα, (τα εντομοκτόνα, τα ζιζανιοκτόνα και τα μυκητοκτόνα), αξιοποιούνται στην γεωργική βιομηχανία προκειμένου να ελέγχεται και να περιορίζεται τακτικά η παρουσία των βακτηρίων, των καλουπιών, των παρασίτων, των ζιζανίων, των τρωκτικών και των εντόμων στο γεωργικό πεδίο, καθώς υπάρχει ένα μέγιστο όριο υπολειμμάτων (Maximum Residue Levels - MRL) για τα υπολείμματα των φυτοφαρμάκων στα τρόφιμα και στα γεωργικά προϊόντα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται σήμερα οι πολύ κοστοβόρες τεχνικές της φασματομετρίας και της χρωματογραφίας, προκειμένου να γίνει η ανίχνευση και η ποσοτικοποίηση των φυτοφαρμάκων στα τρόφιμα. Αντιθέτως, η φασματοσκοπία THz είναι μία πολύ χρήσιμη εναλλακτική, καθώς είναι ταχύτατη και μη καταστρεπτική προκειμένου να ανιχνευθούν τα φυτοφάρμακα στα γεωργικά προϊόντα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ενός πειράματος με κυφθρίνη, η οποία είναι ένα φυτοφάρμακο που χρησιμοποιείται συνήθως για το βαμβάκι, το καλαμπόκι, τα δημητριακά και τα φιστίκια, καθώς και για τα φρούτα, και τα λαχανικά. Με την χρήση ενός συνδυασμού από χημομετρικές μεθόδους με (THZ-TDS) για την ανίχνευση κυφθρίνης, στην έρευνα αυτή βρέθηκε ότι η κυφθρίνη είχε ένα φάσμα απορρόφησης στην περιοχή του 0,5-1,5 THz. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος (Partial Least Squares - PLS) έδειξε ότι είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την ποσοτικοποίηση της κυφθρίνης στα διαλύματα. Το (THZ-TDS) χρησιμοποιήθηκε επίσης και για την ανίχνευση της ιμιδακλοπρίδης, της βουπροφέζινης και άλλων ουσιών στο κολλώδες ρύζι, στην γλυκοπατάτα και σε δείγματα από σκόνη της ρίζας του λωτού (Hua, Zhang, & Zhou, 2010).

Επίσης με την έρευνα του (Suzuki et al., 2010), ανιχνευθήκαν έξι φυτοφάρμακα όπως το Fludioxonil, το cis-permethrin, το metalaxyI κ.α. σε λαχανικά και αποδείχθηκε ότι παρουσιάζουν μοναδικά φάσματα απορρόφησης μεταξύ των 0,7 και των 14 THz. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται υψηλή συσχέτιση ($R^2 > 0,96$) μεταξύ της συγκεντρώσεως των φυτοφαρμάκων και της δευτερογενούς παράγωγης αξίας του κάθε φάσματος, γεγονός που υποδεικνύει ότι τα φυτοφάρμακα θα μπορούσαν ποσοτικοποιούνται με βάση τα φάσματα τους (Suzuki et al., 2010). Βέβαια η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μερικές ελλείψεις, όπως η χαμηλή ευαισθησία και η ανάγκη για μακρά προκατεργασία του δείγματος (Afsah-Hejri, et al., 2020).

Προχωρώντας ιδιαίτερη σημασία για την γεωργική βιομηχανία έχει και η επιθεώρηση του εδάφους μέσω της τεχνολογίας αυτής. Με δεδομένο ότι η ρύπανση του εδάφους από τα βαρέα μέταλλα, δηλαδή από τις μεταλλικές ενώσεις με σχετική πυκνότητα > 5 , αποτελεί ένα ιδιαίτερα σοβαρό ζήτημα που επηρεάζει την ποιότητα των γεωργικών προϊόντων και των τροφίμων καθώς και την ανθρώπινη υγεία είναι απολύτως αναγκαία η σωστή ανίχνευση των βαρέων μετάλλων στο έδαφος πριν αυτά εισαχθούν στην τροφική αλυσίδα μέσω των μολυσμένων καλλιεργειών.

Η πρώτη έκθεση σχετικά με την χρήση φασματοσκοπίας THz για την ανίχνευση ψευδαργύρου και χαλκού σε μολυσμένο έγινε από τους (Li et al., 2009) και παρουσίασε ότι τα εδάφη που είχαν μολυνθεί με θειικό ψευδάργυρο παρουσίαζαν ένα διαφορετικό αποτύπωμα THz σε σχέση με τα εδάφη που περιείχαν θειικό χαλκό. Έτσι, διερευνήθηκε η χρησιμότητα της χρήσης της φασματοσκοπίας THz για την ανίχνευση δύο άλλων ιόντων βαρέων μετάλλων σε γεωργικό έδαφος. Με τον τρόπο αυτό αποδείχθηκε από την έρευνα ότι το κάθε βαρύ μέταλλο παρουσιάζει ένα μοναδικό και εξαρτώμενο από τη δόση THz αποτύπωμα. Και τα τέσσερα ιόντα βαρέων μετάλλων (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , και Cr^{3+}) ανιχνεύθηκαν στη χαμηλότερη συγκέντρωση $50 \mu\text{g} / \text{ml}$. Αν και αυτή η τεχνολογία THz είναι πολύ χρήσιμη για την ανίχνευση βαρέων μετάλλων σε γεωργικό έδαφος, είναι αναγκαία η επιπλέον εμπεριστατωμένη έρευνα προκειμένου να μειωθεί το κόστος, να ενισχυθεί η ευαισθησία και να αυξηθεί η αναλογία S/N του συστήματος (Afsah-Hejri et al, 2020).

Παράλληλα, στον γεωργικό τομέα η φασματογραφία αυτή αξιοποιείται επιπλέον και για τη μέτρηση των σημείων επιθεώρησης των σπόρων και των καταστροφών των εντόμων. Η φασματοσκοπία THz έχει χρησιμοποιηθεί για μη καταστρεπτικό έλεγχο ποιότητας των σπόρων. Στην έρευνα του (Chua et al, 2004) ερευνήθηκε μία από τις πρώτες εφαρμογές της THz φασματοσκοπίας στον ποιοτικό έλεγχο του σιταριού, μέσω της διερεύνησης της σχέσης μεταξύ της περιεκτικότητας σε υγρασία και της απορρόφησης THz του ολόκληρου κόκκου και του θρυμματισμένου σιταριού. Από τα προκαταρκτικά αποτελέσματα της έρευνας αυτής αναδείχθηκε ότι οι αισθητήρες THz μπορούν να αξιοποιηθούν για τη μέτρηση της υγρασίας στο δίκτυο και για την ποιοτική επιθεώρηση των κόκκων (Chua et al., 2004).

Επίσης, το υγιές σιτάρι με κανονικό μέγεθος στο έμβρυο μπορούσε να διαφοροποιηθεί από το τσαλακωμένο σιτάρι ή από το νεκρωμένο σιτάρι με το υποβαθμισμένο έμβρυο. Οι Jiang & Zhang (2014) χρησιμοποίησαν τη φασματοσκοπία THz για τον εντοπισμό σπόρων

σιταριού με μούχλα, με έντομα, με βλάστηση καθώς και το κανονικό σιτάρι. Έτσι, εφάρμοσαν την τεχνική Διακριτής Μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transforms) στους χρονικούς παλμούς THz και υπολογίστηκαν τα φάσματα απορρόφησης των 120 δειγμάτων σίτου (Jiang & Zhang, 2014). Έτσι, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του (PLS) και των μεθόδων «back-propagation neural networks» (BPNN) με το ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis-support vector machine) (SVM) Αλγορίθμων με Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vector Machines - SVM) και αυτό το μοντέλο (PCA-SVM) είχε τα καλύτερα αποτελέσματα. Η απόδοση του μοντέλου ήταν μεγαλύτερη από 95% και η ακρίβεια πρόβλεψης αυτού του μοντέλου και για τα δύο, δηλαδή και για τους φυτρωμένους και για τους φυσιολογικούς κόκκους σιταριού ήταν 100%. Απέδειξαν, με άλλα λόγια ότι ο συνδυασμός της φασματοσκοπίας THz με τις υπολογιστικές μεθόδους μπορεί να εντοπίσει με επιτυχία τους διαφορετικούς κόκκους σιταριού και αυτός ο συνδυασμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χρήσιμο εργαλείο για τον μη καταστρεπτικό ποιοτικό έλεγχο του σιταριού (Afsah-Hejri, et al., 2020).

Πέραν αυτών η φασματογραφία μπορεί αν αξιοποιηθεί και για την ανίχνευση των διαγονιδιακών και γενετικώς τροποποιημένων καλλιεργειών, καθώς υπάρχουν στους πολίτες ορισμένες ανησυχίες που σχετίζονται με την κατανάλωση γενετικά τροποποιημένων (Genetically Modified - GM) προϊόντων. Οι μέθοδοι για την αναγνώριση των GMS είναι μέσω του DNA, και αποτελεί μία μέθοδο καταστροφική, ακριβή και χρονοβόρα. Ωστόσο το 2015 αξιοποιήθηκε από τους Liu et al ένας συνδυασμός φασματοσκοπίας THz με χημομετρικές μεθόδους για την ταυτοποίηση του βαμβακιού GMO. Το γενετικώς τροποποιημένο βαμβάκι παρουσίαζε πολύ παρόμοια φάσματα THz και έτσι η ανακάλυψη αυτή χρησιμοποιήθηκε για την αναγνώριση προτύπων μέθοδοι διαφοροποίησης μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος ομαδοποίησης πολλαπλασιασμού (active learning affinity propagation ALAP) χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση της εκπαιδευτικής ομάδας και η SVM (Support Vector Machine) χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του μοντέλου ταξινόμησης. Το (ALAP-SVM) στη συνέχεια συγκρίθηκε με τρεις αλγόριθμους SVM (τυχαία SVM, εντροπία SVM και αβεβαιότητα SVM) και έδειξε υψηλότερη ακρίβεια ταξινόμησης. Το ποσοστό αναγνώρισης του μοντέλου ALAP-SVM ήταν 97,79% για το GM βαμβάκι. (Afsah-Hejri, et al., 2020)

Τέλος, μεγάλη είναι και η αξία της φασματογραφίας THz για τον έλεγχο της ποιότητας και την ανίχνευση νοθείας. Πιο συγκεκριμένα, η φασματοσκοπία THz έχει χρησιμοποιηθεί

για την αξιολόγηση της ποιότητας των γεωργικών προϊόντων, όπως είναι η ανίχνευση των ζωντανών και νεκρών εντόμων στο Pecan, με βάση τους συντελεστές απορρόφησής τους στις συχνότητες που ήταν υψηλότερες από 1,2 THz. Τα ζωντανά έντομα είχαν μεγαλύτερη απορροφητικότητα THz από τα νεκρά. (Afsah-Hejri, et al., 2020)

Επομένως, από όλα τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι η φασματογραφία THz είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία ανίχνευσης με αποδεδειγμένες εφαρμογές σε πολλές βιομηχανίες, όπως είναι και αυτή της γεωργίας. Οι ερευνητές με επιτυχία μπόρεσαν να εντοπίσουν τα ελαττώματα στα γεωργικά προϊόντα με την απεικόνιση THz, διακρίνοντας ακόμη και ανάμεσα σε ζωντανά και νεκρά έντομα. Επίσης ο συνδυασμός της με χημομετρικές μεθόδους βοήθησε τους επιστήμονες να κατασκευάσουν κάποια μοντέλα ταξινόμησης για τις διακρίσεις των διαγονιδιακών σπόρων, των φυτοφαρμάκων, των επιβλαβών ενώσεων και των δηλητηριωδών φυτών. Κάποια από τα μοντέλα αυτά παρήγαγαν 100% επιτυχή ταξινόμηση τόσο για GM όσο και για μη- GM καλλιέργειες. Επίσης η φασματοσκοπία THz έχει χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση βαρέων μετάλλων και θαμμένων βιολογικών αντικειμένων στο έδαφος. (Qin, Ying, & Xie, 2013)

Επίσης, υπάρχει ερευνητικό πλαίσιο, το οποίο αναλύει την χρήση της τεχνολογίας αυτής σε γεωργικές δραστηριότητες, όπως είναι για παράδειγμα η χρήση της φασματοσκοπίας για τη μέτρηση της περιεκτικότητας των φυτικών φύλλων σε νερό και η χρήση της για την ανίχνευση νεκρών και ζωντανών εντόμων και παράσιτων σε γεωργικά προϊόντα (Qin, Ying & Xie, 2013). Παράλληλα, με την χρήση της φασματοσκοπίας THz σε συνδυασμό με την χημομετρία, τις μεθόδους, την εκμάθηση μέσω μηχανών και τους αλγόριθμους, οι επιστήμονες πέτυχαν την κατασκευή συγκεκριμένων μοντέλων ταξινόμησης για τη διάκριση των παρασιτοκτόνων, των διαγονιδιακών σπόρων, των επιβλαβών ενώσεων και των δηλητηριωδών φυτών. Πέραν των ανωτέρω, η φασματοσκοπία THz έχει επίσης χρησιμοποιηθεί και για την επιθεώρηση του εδάφους καθώς και για την ανίχνευση των βαρέων μετάλλων και των θαμμένων αντικείμενων στο υπέδαφος. (Afsah-Hejri et al, 2020)

Καθώς προχωρά η τεχνολογία και αναπτύσσεται η έρευνα στον τομέα αυτών, τα τελευταία χρόνια, πραγματοποιήθηκαν πολλές τεχνολογικές βελτιώσεις στην ανάπτυξη των πηγών και των ανιχνευτών THz, οι οποίες έδωσαν στους ερευνητές τη δυνατότητα να εκτελούν εξαιρετικά γρήγορες σαρώσεις και να λαμβάνουν εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης. Έτσι, με τη χρήση των νέων τεχνολογιών THz, οι ερευνητές έχουν αποκτήσει την πολύ χρήσιμη δυνατότητα να διακρίνουν τα φρέσκα από τα παλιά φύλλα, να ελέγχουν

την κατάσταση του νερού στα φυτά και να υπολογίζουν την πιθανή απόδοση της καλλιέργειας. (Qin, Ying & Xie, 2013)

Αν και από τα όσα αναλύθηκαν παραπάνω φαίνεται ότι η τεχνολογία THz αποτελεί ένα ιδιαίτερος χρήσιμο εργαλείο για τον μη καταστρεπτικό έλεγχο της ποιότητας στα γεωργικά προϊόντα και στο έδαφος, η τεχνική έχει και συγκεκριμένους σημαντικούς περιορισμούς, όπως είναι το χαμηλό όριο ανίχνευσης (low limit of detection – LOD) για τα φυτοφάρμακα, η χαμηλή χωρική ανάλυση και η περιορισμένη διείσδυση. (Qin, Ying & Xie, 2013) Παράλληλα, στα αρνητικά της τεχνολογίας αυτής εντάσσεται και η πιθανότητα να επηρεαστεί από τις φυσικές ιδιότητες των δειγμάτων όπως είναι το μέγεθος των σωματιδίων και η τραχύτητα της επιφάνειας ελέγχου. Από την άλλη πλευρά, όσον αφορά τους αισθητήρες, είναι απαραίτητη η περισσότερη και εξειδικευμένη έρευνα σχετικά με τη βελτίωση της απόδοσης τους συστήματα THz, με τη μείωση του κόστους κατασκευής τους και με την ανθεκτικότητα του συστήματος εφαρμογών στη γεωργία. (Afsah-Hejri et al, 2020)

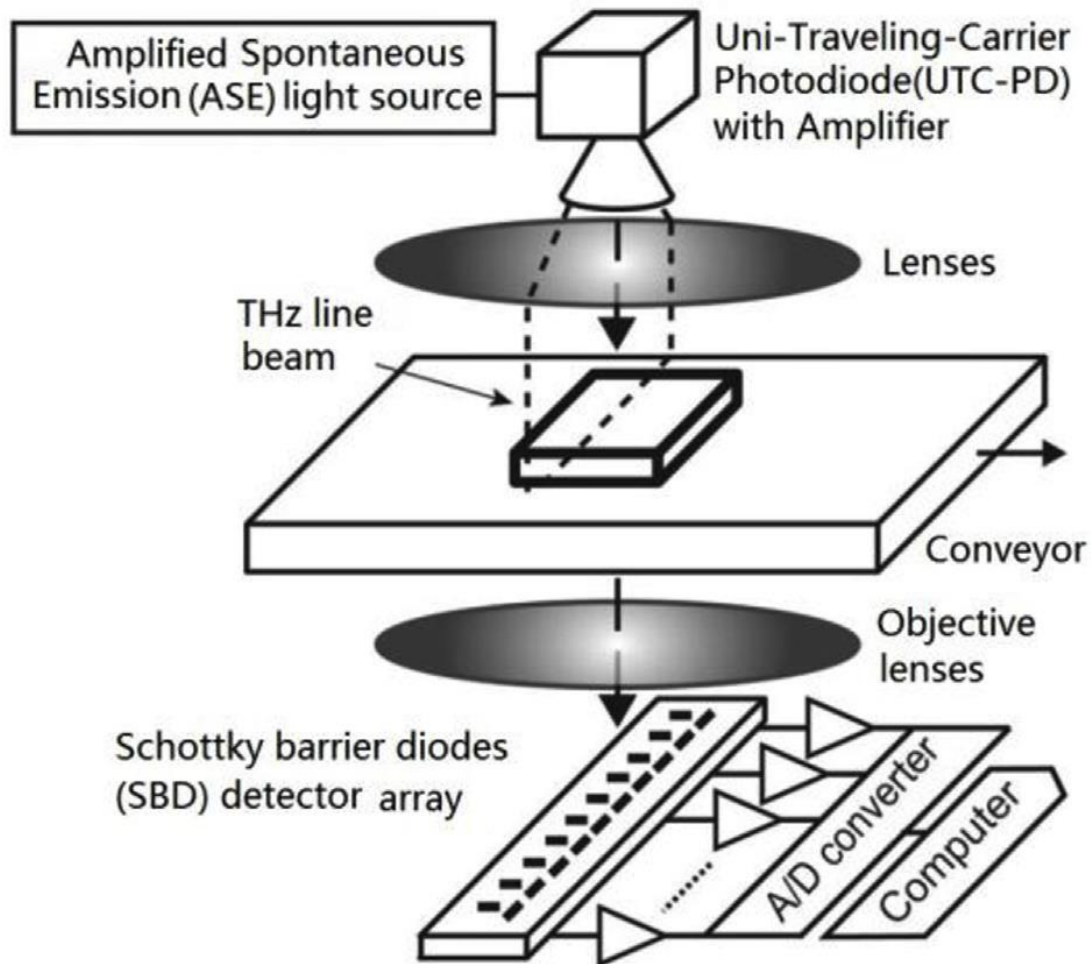
6. Η τεχνολογία THz για την ανίχνευση ουσιών στα τρόφιμα και την ανίχνευση της μόλυνσης του νερού

Κατά τα τελευταία χρόνια υπήρξε μια δραματική αλλαγή στον τομέα της τεχνολογίας THz. Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της ακτινοβολίας THz σχετικά με τη δημιουργία, τους χειρισμούς και την ανίχνευση δημιούργησε μία επανάσταση στον τομέα των συστημάτων ανίχνευσης. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία THz παρουσιάζει τεχνικές ανίχνευσης για διάφορα θέματα, όπως ο έλεγχος των τροφίμων και η ανίχνευση της μόλυνσης του νερού.

Με δεδομένο ότι η μικροβιακή ρύπανση στο νερό και τα τρόφιμα είναι ένα από τα κρίσιμα ζητήματα όσον αφορά την υγειονομική κατάσταση των ανθρώπινων κοινωνιών, η ανίχνευση της μικροβιακής κατάστασης των τροφίμων και του νερού είναι υψίστης σημασίας, καθώς η κατανάλωση ανθυγιεινών τροφίμων ή νερού μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές και μολυσματικές ασθένειες. (Ren et al, 2019)

Ο πρώτος τρόπος αξιοποίησης της τεχνολογίας αυτής στα τρόφιμα είναι μέσω της ανίχνευσης με ανάλυση της περιεκτικότητας σε υγρασία. Η περιεκτικότητα σε υγρασία ή περιεκτικότητα σε νερό, ορίζεται ως η ποσότητα του νερού που περιέχεται σε ένα υλικό, όπως είναι οι σπόροι και τα σιτηρά, τα τρόφιμα και τα ποτά, τα γεωργικά προϊόντα και τα προϊόντα πετρελαίου.

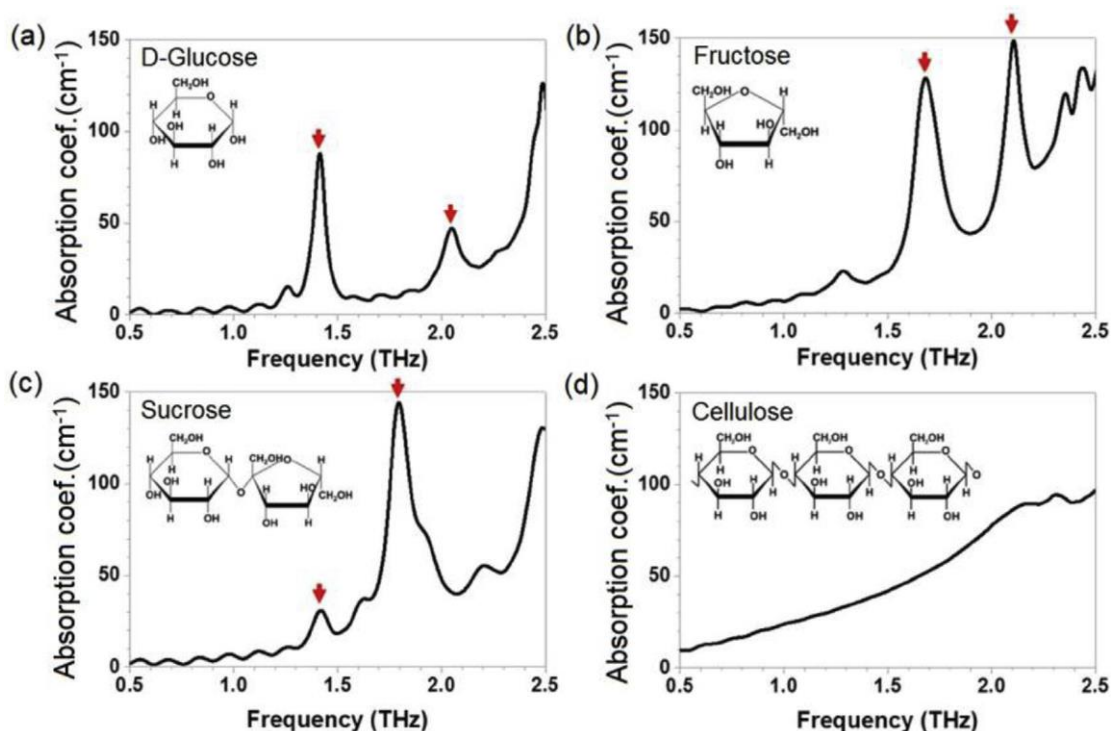
Η ακτινοβολία THz μπορεί να ανιχνεύσει και να απεικονίσει τον χάρτη υγρασίας με τρόπο μη καταστρεπτικό, αξιολογώντας τα επίπεδα ενυδάτωσης στα διάφορα υλικά. Με την πρώτη μέθοδο της ανίχνευσης της περιεκτικότητας σε νερό στο ζωντανό φυτό και τα φύλλα του μπορούν οι επιστήμονες να ελέγξουν και να αξιολογήσουν τα επίπεδα υγρασίας των φυτικών φύλλων, ώστε να κατανοήσουν το επίπεδο της ξηρασία των φυτών και διαχείριση άρδευσης (Ren et al, 2019).



Εικόνα 26: Σχηματική παράσταση του συστήματος απεικόνισης 0.1 THz (Takehara et al.,2018. Ren et al, 2019)

Μέσω της ανίχνευσης αυτής, όπως φαίνεται και στο σχεδιάγραμμα, μπορούν μη παρεμβατικά να εντοπιστούν εντομοκτόνα. Επίσης, ανάλογα με τους διαφορετικούς συντελεστές απορρόφησης και τους δείκτες διάθλασης της υγρασίας στο λεπτό επιφανειακό στρώμα των φρούτων, μπορεί να αξιολογηθεί η εσωτερική ποιότητα στα φρούτα με μη καταστρεπτική ανίχνευση (Ren et al, 2019).

Παράλληλα, μία ακόμη τεχνική είναι η ανίχνευση μέσα από χημική αναγνώριση με παλμούς THz. Λόγω της περιστροφής ή των μεταβάσεων στάθμης των κραδασμών μέσα σε ένα μόριο, τα διάφορα χημικά και βιολογικά μόρια θα εμφανίσουν συγκεκριμένα εγγενή χαρακτηριστικά συντονισμού στην περιοχή του κύματος THz, τα οποία συσχετίζονται με τη φύση και τη χημική σύνθεση του δείγματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ανίχνευσή τους και ο προσδιορισμός της σύστασης και της δομής του ελεγχόμενου δείγματος. (Ren et al, 2019)



Εικόνα 27: Η απορρόφηση των διαφόρων μορίων σακχάρων μετρημένα THz-TDS
 A. D-glucose($C_6H_{12}O_6$), B. Fructose($C_6H_{12}O_6$), C. Sucrose($C_{12}H_{22}O_{11}$),
 D. Cellulose ($C_6H_{10}O_5$) pellets (Lee et al., 2015. Ren et al, 2019)

Από την άλλη, πέραν των τροφίμων η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται και όσον αφορά την ανίχνευση της μόλυνσης στο νερό, αξιοποιώντας το μηχανισμό της αντίθεσης, προκειμένου να γίνει η ανίχνευση. Πιο αναλυτικά, το πάχος και το σχήμα του δείγματος μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικούς συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης για το κάθε δείγμα (Ren et al, 2019).

Θεωρητικά, η διαπερατότητα του δείγματος είναι μια σημαντική παράμετρος για να αναγνωριστεί η συμπεριφορά του δείγματος. Παρόλο που το νερό είναι ένα ισχυρό απορροφητικό υγρό της ακτινοβολίας THz, υπάρχει το ειδικό σύστημα πρωτοτύπου THz-

TDS, το οποίο είναι διαθέσιμο για την ευαίσθητη φασματοσκοπία υγρής μετάδοσης. Κατά συνέπεια, ο μηχανισμός αυτός της αντίθεσης αξιοποιώντας την υψηλή διαπερατότητα του νερού είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί για τη διερεύνηση της μοριακής φύσης των υδατικών διαλυμάτων και συνακόλουθα για την ανάλυση του περιεχομένου του νερού. (Afsah-Hejri et al,2019)

Ενώ υπάρχουν πολλές μελέτες σχετικά με την ανίχνευση στα τρόφιμα με την χρήση της τεχνολογίας THz, έχει γίνει περιορισμένη έρευνα όσον αφορά τον έλεγχο της μόλυνσης στο νερό. Οι πιο πρόσφατες ανακαλύψεις αφορούν την ενσωμάτωση του βιοαισθητήρα και οι τεχνικές με δονητικές φασματοσκοπικές για την ανάλυση της μόλυνσης του νερού. (Ren et al, 2019)

Τέλος, όσον αφορά τα ξένα σώματα, όπως είναι τα μεταλλικά κομμάτια, τα πλαστικά, οι πέτρες, το γυαλί, τα νύχια και τα μαλλιά αυτά πρέπει σε κάθε περίπτωση να ελεγχθούν στα προϊόντα διατροφής κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή στις διαδικασίες συσκευασίας. Συγκρινόμενα με τους μη μεταλλικούς ρύπους, η ανίχνευση των μεταλλικών μολυσματικών ουσιών στο φαγητό είναι πιο εύκολη. Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις αυτών των σωμάτων αξιοποιείται η απεικόνιση των ακτινών X. Η τεχνολογία αυτή δεν είναι κατάλληλη για την ανίχνευση των ρύπων χαμηλής πυκνότητας όταν είναι κρυμμένοι σε οπτικά αδιαφανείς τροφές. Έτσι, τα κύματα THz λόγω της μη ιονίζουσας φύσης τους, είναι ασφαλή για να χρησιμοποιηθούν στις διαδικασίες ελέγχου των τροφίμων. Επίσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη αυτή η τεχνολογία γιατί τα κύματα THz μπορούν να διεισδύσουν μέσω πολλών κοινών υλικών, όπως είναι για παράδειγμα, το χαρτί και το πλαστικό, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία τροφίμων. (Afsah-Hejri et al,2019)

7. Η τεχνολογία THz για την ανίχνευση στα μετα-υλικά ή metamaterials

Η τεχνολογία THz, όπως έχει προαναφερθεί, βρίσκεται ανάμεσα στο υπέρυθρο φως και στην ακτινοβολία των μικροκυμάτων και σχετίζεται με την απορρόφηση των ακτινών THz στα μοριακά και βιομοριακά συστήματα μέσα από τη διέγερση των ενδομοριακών και των διαμοριακών κραδασμών. Έτσι, έχει μεγάλη χρηστικότητα στις εφαρμογές ανίχνευσης. Ωστόσο, η χαμηλή ευαισθησία της ανίχνευσης της ακτινοβολίας THz στον ελεύθερο χώρο περιορίζει τις εφαρμογές της ανίχνευσης, οι οποίες δίνουν μια μεγάλη ευκαιρία για τα μεταυλικά ή metamaterials. Τα μεταυλικά ορίζονται ως περιοδικά τεχνητά ηλεκτρομαγνητικά μέσα δομημένα σε κλίμακα μεγέθους μικρότερη από το μήκος κύματος των εξωτερικών ερεθισμάτων. Επίσης, παρουσιάζουν τοπική ενίσχυση ηλεκτρικού πεδίου και μεγάλες αξίες του παράγοντα ποιότητας (Q παράγοντα), ενώ παράλληλα, εμφανίζουν

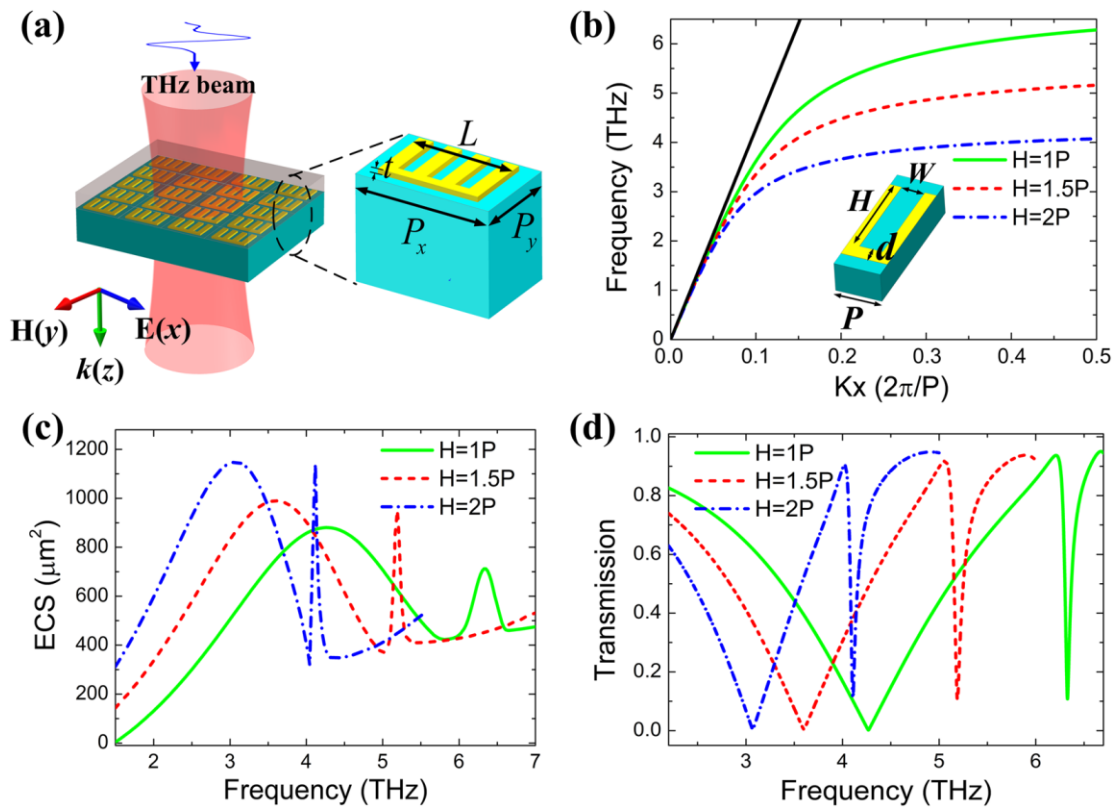
υψηλή ευαισθησία έστω και στις μικρότερες αλλαγές του περιβάλλοντος. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν για τις καταπληκτικές ιδιότητες, όπως τον αρνητικό δείκτη διάθλασης. (Xu, Xie & Ying, 2017)

Τα THz μεταϋλικά, καταρχάς αναφέρθηκαν από την ομάδα του καθηγητή Xiang Zhang και συμπεριλάμβαναν διαμορφωτές μεταϋλικών, πολωτές μεταϋλικών, THz απορροφητές κύματος κ.α. Κατα τα τελευταία χρόνια οι αισθητήρες με βάση τα μεταϋλικά έχουν δείξει τις δυνατότητές τους σε διαφορετικές εφαρμογές. Αυτά τα υλικά είναι κατάλληλα για εφαρμογές ανίχνευσης, με τοπική ενίσχυση ηλεκτρικού πεδίου και μεγάλες τιμές του παράγοντα ποιότητας (παράγοντα Q) που δείχνουν υψηλή ευαισθησία σε μικρές αλλαγές του περιβάλλοντος. Τα THz μεταϋλικά, λόγω των πιθανών ικανοτήτων ανίχνευσης, αναμένεται να παρέχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στο εγγύς μέλλον. Η έρευνα στους ανιχνευτές THz μεταϋλικών, αναδεικνύει μία ευρεία γκάμα εφαρμογών, όπως η τυπική ανίχνευση βασισμένη σε metasurface, η ανίχνευση με μεταλλική συσκευή πλέγματος (metallic mesh device based sensing - MMD) και η ανίχνευση με βάση την απορρόφηση μετα-υλικών. (Xu, Xie & Ying, 2017)

Πρόσφατα, οι συσκευές THz που βασίζονται σε μεταϋλικά έχουν χρησιμοποιηθεί για χημική και βιολογική ανίχνευση σε μικρές περιβαλλοντικές αλλαγές. Λόγω του ότι η ποιότητα (Q) αντηχήσεως είναι μικρή και προκαλείται από απώλειες ακτινοβολίας και από την έλλειψη ισχυρής ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, η ευαισθησία και ο αριθμός αξίας (FOM) αυτών των αναφερόμενων αισθητήρων είναι σχετικά χαμηλές. Λόγω λοιπόν του ότι οι δομές μεταϋλικών διαθέτουν έντονα περιορισμένο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και χαρακτηριστικά γνωρίσματα φασματικής αντήχησης, είναι σε θέση να ενισχύσουν την αλληλεπίδραση πεδίου-ύλης και να βελτιώσουν τον παράγοντα Q, ο οποίος είναι παρόμοιος με την επιφάνεια (Surface plasmon polaritons - SPP) που ανιχνεύει στα ορατά μήκη κύματος. (Chen & Fan, 2017)

Η εφαρμογή αυτή φαίνεται στην εικόνα 28 παρακάτω. Στην εικόνα που έπεται, παρουσιάζεται: α) σχηματικά η γεωμετρία της δομής των μεταϋλικών, στην οποία το κελί μονάδας αποτελείται από κυματοειδή μεταλλική λωρίδα διάτρητη από τρεις αυλακώσεις ορθογωνίων που είναι περιοδικά τοποθετημένες προς την κατεύθυνση x και y. Οι γεωμετρικές παράμετροι του κυττάρου μονάδας περιγράφονται στα στοιχεία 1 στοιχεία α) και β). β) οι υπολογισμένες καμπύλες διασποράς των λειτουργιών SSP για τη συστοιχία αυλακιού περιόδου με διαφορετικό βάθος αυλακιού H, αυλάκωση πλάτος $W = 0,5 P$, $P = 6 \mu m$, απόσταση $d = 2 \mu m$. Τα υπολογιζόμενα φάσματα ECS (γ) και τα φάσματα μετάδοσης

δ) της Δομής μεταλλικών με το διαφορετικό βάθος αυλακιού X. επομένως, με βάση τα σχήματα αυτά συνάγουμε συμπεράσματα για τη δομή και τις βασικές αρχές της τεχνολογίας αυτής. Στο σχήμα 1 στοιχείο α) φαίνεται σχηματικά η γεωμετρία της δομής των μεταλλικών, στην οποία το κελί της μονάδας αποτελείται από κάποιες κυματοειδείς μεταλλικές λωρίδες, οι οποίες είναι διάτρητες από τρεις αυλακώσεις ορθογωνίων που παρατάσσονται περιοδικά προς την κατεύθυνση x και y. Το υπόστρωμα είναι πολυιμίδιο (PI) με διηλεκτρική σταθερά 3 και εφαπτομένη απώλειας 0,00533, η οποία δείχνει υψηλή διαφάνεια την περιοχή THz 34. Οι γεωμετρικές παράμετροι του κυττάρου μονάδας περιγράφονται στα στοιχεία 1 στοιχείο α) και β) (Chen & Fan, 2017).



Εικόνα 28: (Chen & Fan, 2017)

Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία στην τεχνολογία αυτή είναι η ευαισθησία της ανίχνευσης, η οποία βασίζεται εν μέρει στη βελτίωση των δομών των μεταλλικών. Η αύξηση του διεγερμένου ηλεκτρικού πεδίου ή η αξιοποίηση του υψηλού ηλεκτρικού πεδίου για την ανίχνευση είναι οι δύο λύσεις που έχουν προταθεί. Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι πιθανός τρόπος ενίσχυσης της υπερευαισθησίας στις εφαρμογές ανίχνευσης, είναι η αξιοποίηση μιας δομής απορροφητή των μεταλλικών που προσομοιάζει σε Fano, και συμπιέζει το κύμα THz σε ένα nanovolume, καθώς η κοινή

μέθοδος που αξιοποιείται είναι η μείωση του χάσματος στο επίπεδο νανομέτρων μαζί με το ηλεκτρικό πεδίο. (Xu, Xie & Ying, 2017)

Πέραν της ευαισθησίας, μια άλλη κρίσιμη οπτική της τεχνολογίας που θα πρέπει να βελτιωθεί είναι η επιλεκτικότητα της συσκευής. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει σύζευξη Fano των στόχων ανίχνευσης και της συσκευής μεταλλικών, όταν η κορυφή του στόχου ανίχνευσης και η αντήχηση των μεταλλικών ταιριάζουν. Έτσι, οι εφαρμογές της ανίχνευσης μπορούν να βελτιώσουν την ευαισθησία. Από την άλλη, όσον αφορά τα νανοϋλικά, όπως νανοσωματίδια χρυσού, κβαντικές κουκίδες κ.λπ., αυτά αποτελούν ελκυστικές επιλογές στις διάφορες εφαρμογές ανίχνευσης. Ωστόσο, οι πλασμοί αυτών των νανοσωματιδίων δεν βρίσκονται στην περιοχή THz, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε πολλές εφαρμογές ανίχνευσης. Για το λόγο αυτό αξιοποιούνται οι κβαντικές κουκίδες στην THz ανίχνευση, γεγονός που υποδεικνύει ότι τα μεταλλικά THz μπορούν να εντοπίσουν πάρα πολύ λεπτές ταινίες με πάχος κάτω στο επίπεδο νανομέτρου. (Xu, Xie & Ying, 2017)

Στην έρευνα των Chen & Fan, του 2017, δημιουργήθηκε θεωρητικά μία κατασκευή με βάση την τεχνολογία αυτή, σχηματίζοντας έναν υπερευαίσθητο αισθητήρα μεταλλικών, στον οποίο το κύτταρο της μονάδας αποτελείται από κυματοειδείς μεταλλικές λωρίδες διάτρητες από τρεις αυλακώσεις ορθογωνίων. Λόγω της διέγερσης των πλασματικών πολώσεων επιφάνειας στο καθεστώς THz, μπορεί να παραχθεί εξαιρετικά αιχμηρή - υψηλής τάξης αντήχηση και αυτό αξιοποιείται για την ανίχνευση της κάθε αναλυτέας ουσίας. (Chen & Fan, 2017)

Μάλιστα μέσα από την έρευνα, οι επιστήμονες που ελέγχουν τους αισθητήρες μεταλλικών με διαφορετικά πάχη αναλυτέας ουσίας και διαθλαστικούς δείκτες, εξήγαγαν το συμπέρασμα ότι από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο υψηλός παράγοντας Q και FOM μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα, και επομένως η ευαισθησία της συχνότητας μπορεί να είναι επιτευχθεί μέχρι και στα 1,966 THz/RIU, όταν το πάχος του μετάλλου είναι 7 μm . Επιπλέον, κατά την έρευνα προέκυψε ότι αυτή η συσκευή είναι εξαιρετικά ευαίσθητη σε πολύ λεπτό πάχος αναλυτέας ουσίας. Έτσι, ανοίγει ένας νέος δρόμος έρευνας και εφαρμογής εξαιρετικά αποδοτικών αισθητήρων THz. (Chen & Fan, 2017)

8. Τα φορητά συστήματα THz

Σε μελέτη των (Hillger, και συν., 2020), ελέγχθηκε η δυνατότητα και οι πρόοδοι που σχετίζονται με την ενσωμάτωση στο μέλλον φορητών συστημάτων THz. Καθώς πολλά

πολυμερή, πλαστικά και χαρτιά είναι ιδιαίτερα διαφανή στην ακτινοβολία THz, η φασματοσκοπία THz μπορεί να δώσει πρόσβαση σε αναγνώριση αντικειμένων κρυμμένων πίσω από οπτικά αδιαφανή υλικά ή υπόγεια και πολυεπίπεδα σύνθετα υλικά. Μάλιστα, η φασματοσκοπική απεικόνιση THz μπορεί να συμπληρώσει μεθόδους φασματοσκοπίας όπως είναι η φασματοσκοπία Raman ή η φασματοσκοπία με υπέρυθρες ακτίνες μετασχηματισμού Fourier. Επιπλέον, η ζώνη συχνοτήτων THz προσφέρει μια μεγάλη έκταση σε εύρος ζώνης, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία αυτή κατάλληλη αυτό να εφαρμοστεί στη μελλοντική υποδομή ασύρματων επικοινωνιών. Μάλιστα, ο συνδυασμός ακριβούς εντοπισμού και φασματοσκοπικού χαρακτηρισμού των υλικών, παράλληλα με την χρήση του υλικού για τις κινητές συσκευές, είναι δυνατόν να ενεργοποιήσουν την τρέχουσα ανέφικτη «τηλεπισκόπηση» με εφαρμογές για την χαρτογράφηση επικινδύνων περιβαλλόντων σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης με ιπτάμενα ρομπότ. Προς το παρόν οι διατυπώσεις αυτές μοιάζουν να βρίσκονται στο επίπεδο της διερεύνησης, καθώς ο φασματοσκοπικός εξοπλισμός για την τεχνολογία αυτή την καθιστά ιδιαίτερος ακριβή και μόνο για εργαστηριακή χρήση. Για να αξιοποιηθεί η τεχνολογία THz σε εφαρμογές της πραγματικής ζωής σε ανοικτά περιβάλλοντα, είναι απαραίτητη η σμίκρυνση και ο περιορισμός του κόστους. Η τεχνολογία του πυριτίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση αυτή, προσφέροντας ταυτόχρονα παράγοντες μικρής κλίμακας, οικονομίες κλίμακας και άνευ προηγουμένου ικανότητα ολοκλήρωσης με τα υψηλότερα βιομηχανικά πρότυπα. Ωστόσο, τα συστήματα πυριτίου ωθούνται να λειτουργούν πέραν των τεχνολογικών ορίων τους στην περιοχή των THz. (Hillger et al,2020)

Η έρευνα στη βιβλιογραφία και τα επιστημονικά περιοδικά ανέδειξε ότι στο μέλλον οι εφαρμογές THz χρειάζεται να επικεντρωθούν σε φορητά συστατικά, τα οποία θα πρέπει να συνδυάσουν το υψηλό επίπεδο ολοκλήρωσης, με την κατανάλωση χαμηλής ισχύος και την συμβατότητα με τη μικροηλεκτρονική και την λειτουργικότητα για προσαρμογή σε δυναμικά περιβάλλοντα. Οι πλέον πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία αυτή σχετίζονται την χρήση και την υλοποίηση συστατικών στην κατηγορία χημικών ενώσεων III-V και την τεχνολογία του πυριτίου. (Hillger et al,2020)

Επιπλέον, όσον αφορά την υλοποίηση των κινητών THz ραντάρ MIMO (multi-input multi-output) στην τεχνολογία πυριτίου, τα ραντάρ MIMO χρειάζονται νέα ενσωμάτωση στις σύγχρονες τεχνικές για την αντιμετώπιση των προκλήσεων του σχεδιασμού των κυκλωμάτων της διανομής LO και την υλοποίηση πολλαπλών καναλιών. (Oppelt et al,2017)

Οι προκλήσεις εφαρμογής για τα συστήματα αυτά δεν σχετίζονται μόνο με το frontend THz, αλλά και με το χιλιοστομετρικό mmWave και το ψηφιακό οπίσθιο άκρο, καθώς τα ραντάρ THz απαιτούν σήματα αναφοράς ευρείας ζώνης mmWave με σταθερότητα υψηλής φάσης. Η προτεινόμενη λύση στην παρούσα έρευνα αφορά το σήμα αναφοράς mmWave. Το εύρος ζώνης εξόδου που λαμβάνεται είναι $32 \text{ GHz} \leq f_{\text{YTO}} \leq 48 \text{ GHz}$ και η προσομοιωμένη διακύμανση του $\tau = 7,5 \text{ fs}$ αποτελούν τη βάση για τις ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις THz υψηλής απόδοσης με αναλύσεις φάσης $< 15^\circ$ σε συχνότητα 4 THz. (Hillger et al,2020)

Από την άλλη και στον ιστότοπο της επεξεργασίας του σήματος είναι απαραίτητοι οι αλγόριθμοι για την απεικόνιση και την ανίχνευση της εκτίμησης. Έτσι, προτείνεται η προσέγγιση με ακύρωση (SI), με βάση το φίλτρο Kalman και συγκρίνεται με τις προσεγγίσεις προσαρμοστικής (SI) τελευταίας τεχνολογίας, όπως οι αλγόριθμοι ελάχιστων τετραγώνων (least mean square- LMS) και αναδρομικά ελάχιστα τετράγωνα (recursive least squares - RLS). Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας, ο αλγόριθμος δείχνει να παρέχει καλή απόδοση με χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. (Hillger et al,2020)

Επομένως συνάγεται το συμπέρασμα ότι το προτεινόμενο ασύρματο σύστημα της τεχνολογίας THz παρουσιάζει δυνατότητες εφαρμογής στο μέλλον, με την συνακόλουθη μείωση του κόστους κατασκευής και τον περιορισμό του μεγέθους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Συμπεράσματα

Συμπερασματικά η THz τεχνολογία μέχρι σήμερα ήταν ένας ανεξερεύνητος τομέας της επιστήμης, κυρίως λόγω της δυσκολίας παραγωγής της αλλά και της ανίχνευσής της. Υπήρχε δηλαδή ένα, λεγόμενο, «χάσμα»/«κενό» στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Με τη βελτίωση, λοιπόν, τεχνολογικά των πηγών παραγωγής των κυμάτων THz, αλλά και των ανιχνευτών της τεχνολογίας αυτής, είναι δυνατόν να επιτευχθεί ένα άλμα στη μη καταστρεπτική αξιολόγηση, στην ασφάλεια, στη βιοϊατρική και στην ασύρματη τεχνολογία.

Μια από τις ιδιαιτερότητες που αντιμετωπίστηκε είναι η αλληλεπίδραση με το νερό. Η ακτινοβολία THz είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στο νερό με αποτέλεσμα μια μικρή ποσότητα νερού να απορροφά σε μεγάλο βαθμό την ακτινοβολία αυτή. Το πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα προσδιορισμού του περιεχομένου νερού σε υλικά μέσω της THz φασματοσκοπίας.

Με την εκμετάλλευση του πλήθους των ιδιαιτεροτήτων της τεχνολογίας αυτής δίδεται η δυνατότητα της αξιοποίησης του «χάσματος» της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές, οι οποίες μελλοντικά θα ωφελήσουν την ανθρωπότητα μέσω των πολλαπλών εφαρμογών τους.

Αυτό που αποτελεί το όραμα για το μέλλον της τεχνολογίας αυτής, αφορά αστυνομικές και στρατιωτικές επεμβάσεις, θα είναι οι ευκολότερες περιπολίες ασφαλείας για τον εντοπισμό ύποπτων τρομοκρατών ή εγκαταστάσεων κατασκευής αυτοσχέδιων βομβών. Παράλληλα, μεγάλες ποσότητες δεδομένων στον πόλεμο θα διαβιβάζονται ασύρματα γρήγορα σε κόμβους τεχνητής νοημοσύνης για να παράγουν κοινή εικόνα λειτουργίας στους στρατιωτικούς Διοικητές. (Salih & Selcur, 2015)

Τέλος, στο ιατρικό επίπεδο, στο μέλλον θα είναι δυνατή η διάγνωση του καρκίνου πολύ πιο εύκολα και με μεγαλύτερη ακρίβεια απ' ό,τι με τις σημερινές μεθόδους. Παράλληλα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται στις γεωργικές δραστηριότητες και στην επεξεργασία των τροφίμων.

Επίσης, η πλέον πρόσφατη ανακάλυψη σχετικά με την τεχνολογία αυτή αφορά τις φορητές συσκευές και την αξιοποίηση των μεταϋλικών, δύο τεχνολογίες που βρίσκονται ακόμα στο επίπεδο της έρευνας και της ανάπτυξης και δεν αξιοποιούνται.

Παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία ο ορισμός και η ιστορική αναδρομή σχετικά με την εξέλιξη της ακτινοβολίας THz. Επίσης, εξετάστηκαν οι μέθοδοι παραγωγής και κυρίως οι μέθοδοι ανίχνευσης, οι οποίες έχουν πλέον εξελιχθεί αρκετά ώστε η τεχνολογία αυτήν να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τέλος αναλύθηκαν και ορισμένες εφαρμογές, οι οποίες, είτε ήδη χρησιμοποιούνται είτε βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, προκειμένου στα επόμενα χρόνια να επιχειρήσουν να λύσουν πολλά από τα σημερινά προβλήματα και ίσως να ωθήσουν την ανθρωπότητα ένα βήμα μπροστά στην ανάπτυξη και στην ευημερία.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η συμβολή της THz τεχνολογίας σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης διάδρασης κρίθηκε σκόπιμο να περιδιαβεί ο αναγνώστης της παρούσας επιστημονικής εργασίας από τις αλματώδεις καινοτομίες και αλλαγές που εισέφερε αυτή. Έτσι, ανατρέχοντας στον άξονα του χρόνου, οι πρώτοι ανιχνευτές ακτινοβολίας THz ήταν θερμικοί ανιχνευτές, που χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στον τομέα της THz αστρονομίας, ενώ ταυτόχρονα η επιστημονική κοινότητα εξοικειώνεται με την αύξηση της συχνότητας των ανιχνευτών ηλεκτρονικών συσκευών, ιδίως με τις διόδους Schottky. Η δεκαετία του 1980, αποτελεί ορόσημο για την εισαγωγή του THz-TDS, που επέβαλε την ανάγκη για ανάπτυξη γρήγορων και συνεκτικών ανιχνευτών. Στην αρχή, λοιπόν χρησιμοποιήθηκε η φωτοαγώγιμη κεραία, εν συνεχεία η οπτική ανίχνευση, ενώ, πλέον αξιοποιείται η βασισμένη στον αέρα συνεκτική ανίχνευση. Στην κορυφαία αυτή τεχνολογία εντάσσονται και τα κύτταρα Golay, οι πυροηλεκτρικοί αισθητήρες και τα θερμοστοιχεία, όπως και η θερμοπύλη, τα οποία είναι όλα διαθέσιμα στο εμπόριο. (Lewis, 2019)

Ταυτόχρονα, οι θερμικοί ανιχνευτές είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένοι, και εκτιμάται ότι θα υπάρξει πρόοδος στον τομέα τους μακροπρόθεσμα. Προς το παρόν, το βάρος της ανάπτυξης πέφτει στην κατασκευή μικρότερων συσκευών, όπως νανο-προβολείς, ενώ τα μικροβολόμετρα ενδέχεται να βελτιωθούν στο επίπεδο των pixel, επιτρέποντας συστοιχίες, κατασκευασμένες με διαρκώς μικρότερες διαστάσεις pixel και συνεχώς αυξανόμενο αριθμό pixel. (Lewis, 2019)

Στο παρόν, οι συλλογικοί ανιχνευτές ηλεκτρονίων αποτελούν μία από τις βασικές προτεραιότητες στον τομέα της έρευνας, αλλά είναι δύσκολο να εκτιμηθεί το πώς θα μπορέσουν να αποδώσουν με κάποια αξιόλογη πρόοδο μακροπρόθεσμα. Ταυτόχρονα, η κύρια μελλοντική ανάπτυξη στις συσκευές Schottky θεωρείται η προσπάθεια να επεκταθεί το εύρος των συχνοτήτων. Βέβαια, οι ανιχνευτές μετάβασης ηλεκτρονίων συνεχίζουν να αναπτύσσονται, ενώ και η ανίχνευση ετεροδύνωσης επιδιώκεται ενεργά από σημαντικό αριθμό επιστημονικών ομάδων παγκοσμίως. Οι πρόοδοι που καταγράφονται οφείλονται

στο γεγονός ότι συντελούνται νέες πηγές πρόσμιξης ακτινοβολιών, καθώς και η ανάπτυξη νέων μη γραμμικών υλικών και συσκευών. (Lewis, 2019)

Με βάση αυτήν την υπάρχουσα γνώση που αναλύθηκε ήδη, περαιτέρω έρευνες στο πεδίο αυτό στο μέλλον αναμένεται με βεβαιότητα να προωθήσει τόσο της τεχνολογία THz όσο και την εξέλιξη της θεμελιώδους φυσικής της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο φως και την ύλη. (Lewis, 2019)

Βιβλιογραφία

- [1] Afsah-Hejri, L., Akbari, E., Toudeshki, A., Homayouni, T., Alizadeh, A., & Ehsani, R. (2020). Terahertz spectroscopy and imaging: A review on agricultural applications. *Computers and Electronics in Agriculture*. 177, 105628.
- [2] Afsah-Hejri, L., Hajeb, P., Ara, P., & Ehsani, R. (2019). A comprehensive review on food applications of terahertz spectroscopy and imaging. *Comprehensive review in food science and food safety*. 18, 1535-1621.
- [3] Bowman, T., El-Shenawee, M., & Campbell, L. K. (2016). Terahertz transmission vs reflection imaging and model-based characterization for excised breast carcinomas. *Biomedical Optics Express*, 7(9), 3756-3783.
- [4] Chan, L. W., Deibel, J., & Mittleman, D. (2007). Imaging with terahertz radiation. *Reports on Progress in Physics*.
- [5] Chen, X., Fan, W. Ultrasensitive terahertz metamaterial sensor based on spoof surface plasmon. *Sci Rep* 7, 2092 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01781-6>
- [6] Chua, H., Upadhyay, C. P., Haigh, D. A., Obradovic, J., Gibson, A. A., & Linfield, H. E. (2004). Terahertz time-domain spectroscopy of wheat grain. In *Infrared and Millimeter Waves*.
- [7] Corsi, C., & Sizov, F. (2014). THz and security applications: detectors, sources and associated electronics for THz applications. *Springer*.
- [8] Damien , J. (2020). *Othjournal*. Ανάκτηση 02 07, 2021, από <https://othjournal.com/2020/02/28/terahertz-technologies-and-future-security-environments>
- [9] D'Arco, A., Di Fabrizio, M., Dolci, V., Petrarca, M., & Lupi, S. (2020). THz pulsed imaging in biomedical applications. *Condensed Matter*.
- [10] Davis, A. G., Linfield, E. H., & Jonston, M. B. (2002). A. G. Davis, E. H. Linfield, and M. B. Jonston, "The development of terahertz sources and their applications," in , vol 47, pp 3679. *Physics in Medicine and Biology*, 47(21), 3679-3689.
- [11] Day, G., Zeitler, J., Jones, W., Rades, T., & Taday, P. (2006). Understanding the influence of polymorphism on phonon spectra: lattice dynamics calculations and terahertz spectroscopy of carbamazepine. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110, 447-456.
- [12] Dexheimer, L. S. (2017). Terahertz spectroscopy: principles and applications. CRC press.
- [13] Terahertz security for e-commerce distribution centres & US border, European space agency, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Terahertz_security_for_e-commerce_distribution_centres_US_border
- [14] Fedorov, I. V., Serdyukov, S. D., Cherkasova, P. O., Popova, S. S., & Nemova, F. E. (2017). The influence of terahertz radiation on the cell's genetic apparatus. 84, 509-514.
- [15] Ferguson, B., & Zhang, X. (2002). Materials for terahertz science and technology. *Nature Materials*, 1, 26-33.

- [16] Fitzgerald, J. A., Berry, E., Zinovev, N. N., Walker, C. G., Smith, A. M., & Chamberlain, M. J. (2002). An introduction to medical imaging with coherent terahertz frequency radiation. *Physics in Medicine & Biology*, σ. 67.
- [17] Fratzscher, D., Beckmann, J., Chranowski, L., & Ewert, U. (2012). *Computing THz - Tomography* (1st εκδ.). Durban, South Africa: BAM Federal Institute for Materials Research and Testing.
- [18] Han, P., Tani, M., Usami, M., Kono, S., Kersting, R., & Zhang, X. (2001). A direct comparison between terahertz time-domain spectroscopy and far-infrared Fourier transform spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, 89, 2357-2359.
- [19] Hillger, P., van Delden, M., Thantrige, S. U., Ahmed, M. A., Wittemeier, J., Arzi, K., & Pfeiffer, R. U. (2020). Toward mobile integrated electronic systems at THz frequencies. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, σσ. 846-869.
- [20] Hua, Y., Zhang, H., & Zhou, H. (2010). Quantitative determination of cyfluthrin in n-hexane by terahertz time-domain spectroscopy with chemometrics methods. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, σσ. 1414–1423.
- [21] Humphreys, K., Loughran, J., Gradziel, M., Lanigan, W., Ward, T., Murphy, J., & O'Sullivan, C. (2004). Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering. *Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS '04. 26th Annual International Conference of the IEEE*, 1, 1302-1305.
- [22] Ikeda, Y., Ishihara, Y., Moriwaki, T., Kato, E., & Terada, K. (2010). A novel analytical method for pharmaceutical polymorphs by terahertz spectroscopy and the optimization of crystal form at the discovery stage. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 58, 76-81.
- [23] Jepsen, P. U., Cooke, D. G., & Koch, M. (2011). Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications. *Laser & Photonics Reviews*, 5(1), 124-166.
- [24] Jiang, Y., & Zhang, Y. (2014). Nondestructive evaluation of wheat quality using terahertz.
- [25] Karasik, B. S., Sergeev, A. V., & Prober, D. E. (2011). Nanobolometers for THz photon detectors. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*.
- [26] Lee, K. D., Kang, H. J., Lee, S. J., Kim, S. H., Kim, C., & Hun Kim, J. (2015). Highly sensitive and selective sugar detection by terahertz nano-antennas. *Scientific Reports*.
- [27] Lee, K. D., Kim, G., Kim, C., Jhon, M. Y., Kim, H. J., Lee, T., & Seo, M. (2016). Ultrasensitive detection of residual pesticides using THz near-field enhancement. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, σσ. 389–395.
- [28] Lewis, R. A. (2019, August 9). A review of terahertz detectors. *Journal of Physics D: Applied Physics*.
- [29] McGoverin, C., Rades, T., & Gordon, K. (2008). Recent pharmaceutical applications of Raman and terahertz spectroscopies. *Journal of pharmaceutical sciences*, 97(11), 4598-4621.
- [30] Mickan, S., Abbott, D., Munch, J., Zhang, X., & Van Doorn, T. (2000). Analysis of system trade-offs for terahertz imaging. *Microelectronics Journal*, 31, 503-514.

- [31] Nicolson, A. (1968). Broad-band microwave transmission characteristics from a single measurement of the transient response. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 17(4), 395-402.
- [32] Oppelt, D., Adametz, J., Groh, J., Goertz, O., & Vossiek, M. (2017). MIMO-SAR based millimeter-wave imaging for contactless assessment of burned skin. (σσ. 1383-1386). In 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) .
- [33] Peiponen, E. K., Zeitler, A., & Kuwata-Gonokami, M. (2012). Terahertz spectroscopy and imaging. *Springer*.
- [34] Pickwell, E., & Wallace, V. P. (2006). Biomedical applications of terahertz technology. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(17).
- [35] Qin, J., Ying, Y., & Xie, L. (2013). The detection of agricultural products and food using terahertz spectroscopy: a review. *Applied Spectroscopy Reviews*. σσ. 439-457.
- [36] Ren, A., Zahid, A., Fan, D., Yang, X., Imran, A. M., Alomainy, A., & Abbasi, H. Q. (2019). State-of-the-art in terahertz sensing for food and water security—A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, σσ. 241-251.
- [37] Rogalski, & Antoni. (2019). *Infrared and Terahertz Detectors-Chapman and Hall*. CRC.
- [38] Salih, E., & Selcur, S. (2015). Terahertz Technology for Military Applications. *Journal of Military and Information Science*.
- [39] Sanchez, A., Laman, N., Schulikin, B., & Tongue, T. (2013). *Review of Terahertz Technology. Readiness Assessment and Applications*.
- [40] Scalari, G., Walther, C., Fischer, M., Terazzi, R., Beere, H., Ritchie, D., & Faist, J. (2009). THz and sub-THz quantum cascade lasers. *Laser & Photonics Reviews*, 3, 45-66.
- [41] Schmuttenmaer, C. A. (2004). Exploring Dynamics in the Far-Infrared with Terahertz Spectroscopy. *Chemical Reviews*, 104(4), 1759-1780.
- [42] Shen, Y.-C. (2010). Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical. *International Journal of Pharmaceutics*, 417, 48-60.
- [43] Simoens, F., & Meilhan, J. (2014). Terahertz real-time imaging uncooled array based on antenna-and cavity-coupled bolometers.
- [44] Sizov, F. (2019). Brief history of THz and IR technologies. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, 22(1), 67-79.
- [45] Suzuki, T., Ogawa, Y., & Kondo, N. (2010, September). Application of THz spectroscopy.
- [46] Tekahara, D., Endo, M., Ishibashi, T., Shimizu, M., Kusanagi, S., & Nozokido, T. (2018). Dual-polarization imaging with real-time capability using a terahertz noise source for food inspection. 43rd international conference on infrared, millimet.
- [47] Titova, V. L., Ayesheshim, K. A., Golubov, A., Rodriguez-Juarez, R., Kovalchuk, A., Hegmann, A. F., & Kovalchuk, C. (2013, February). Intense picosecond THz pulses alter gene expression in human skin tissue in vivo. *In Terahertz and Ultrashort Electromagn*.
- [48] Torii, T., Chiba, H., Tanabe, T., & Oyama, Y. (2017). Measurements of glucose concentration in aqueous solutions using reflected THz radiation for applications to a novel sub-THz radiation non-invasive blood sugar measurement method.

- [49] Vaseashta, A. (2014). New THz technologies and applications in applications in support of safety and security. In THz and Security Applications. *Springer*, σσ. 277-292.
- [50] Wallace, V., Fitzgerald, A., Shankar, S., Flanagan, N., Pye, R., Cluff, J., & Arnone, D. (2004). Terahertz pulsed imaging of basal cell carcinoma ex vivo and in vivo. *British Journal of Dermatology*, 151, 424-432.
- [51] Wang, C., Qin, J., Xu, W., Chen, M., Xie, L., & Ying, Y. (2018). Terahertz imaging applications in agriculture and food engineering: A review. *Transactions of the ASABE*, σσ. 411-424.
- [52] Wilmsink, J. G., & Grundt, E. J. (2011). Invited review article: current state of research on biological effects of terahertz radiation. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, σσ. 1074-1122.
- [53] Woodward, M. R., Wallace, P. V., Rye, J. R., Cole, E. B., Arnone, D. D., Linceld, H. E., & Peppernw, M. (2003). Terahertz Pulse Imaging of ex vivo Basal Cell Carcinoma.
- [54] Xu, W., Xie, L., & Ying, Y. (2017). Mechanisms and applications of terahertz metamaterial sensing: a review. *Nanoscale*, σσ. 13864-13878.
- [55] Yao, Chun, & Shen. (2011). Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications. A review. *International Journal of Pharmaceutics*, σσ. 48-60.
- [56] Yun, Shik, & Lee. (2008). Principles of terahertz science and technology. *Lecture Notes in Physics*.
- [57] Zeitler, J. A., Taday, P. F., Newnham, D. A., Pepper, M., Gordon, K. C., & Rades, T. (2007). Terahertz-Pulsed Spectroscopy and Imaging in Pharmaceutical Setting. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 59(2), 209-223.
- [58] Zeitler, J., Newnham, D., Taday, P., Threlfall, T., Lancaster, R., Berg, R., . . . Rades, T. (2006). Characterization of temperature induced phase transitions in the five polymorphic forms of sulfathiazole by terahertz pulsed spectroscopy and differential scanning calorimetry. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 95(11), 2486-2498.
- [59] Zhang, X. C., Shkurinov, A., & Zhang , Y. (2017). Extreme terahertz science. *Nature Photonics*.
- [60] Μπολάκης, X. (2017). Βελτιστοποιημένες διατάξεις σύζευξης σε συχνότητες THz, Διδακτορική διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ. Αθήνα.
- [61] Τσίβρας, Σ. (2008). Παραγωγή, ανίχνευση και εφαρμογές ακτινοβολίας THz, Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ. Αθήνα.