

# Εισαγωγή στην THz Τεχνολογία

## I. Εισαγωγή

Η ακτινοβολία Terahertz (THz) είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στη φασματική περιοχή συχνοτήτων από 0.3 έως 10 THz (μήκους κύματος 1 mm – 30 μm) και είναι το επόμενο σύνορο για την επιστήμη και την τεχνολογία. Η φασματική αυτή περιοχή καταλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ανάμεσα στις υπέρυθρες και μικροκυματικές ζώνες. Βασικές έρευνες, πρωτοβουλίες και εξέλιξη στον τομέα των προηγμένων τεχνολογιών ανίχνευσης και απεικόνισης που αφορούν την THz ζώνη συχνοτήτων παραμένουν ελλειπίες και στάσιμες σε σύγκριση με την ανεπτυγμένη επιστήμη και τεχνολογία των μικροκυματικών και οπτικών συχνοτήτων.

Ανατρέχοντας στην ιστορία θα δούμε ότι οι τεχνολογίες THz χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην αστρονομία για την μελέτη της κοσμικής άνω-υπέρυθρης ακτινοβολίας (FAR Infrared) και από την επιστημονική κοινότητα της σύντηξης μέσω παλμών laser. Από την πρώτη επίδειξη THz κυμάτων στα τέλη της δεκαετίας του 1980 για φασματοσκοπία στο πεδίο του χρόνου, υπήρξε μια σειρά από σημαντικές προόδους (ιδιαίτερος τα τελευταία χρόνια) καθώς η εμφάνιση ισχυρότερων THz πηγών αλλά και ανιχνευτές μεγαλύτερης ευαισθησίας παρέχουν νέες δυνατότητες για την κατανόηση της THz επιστήμης.

Όσο η τεχνολογία προχωρά η THz επιστήμη θα έχει σημαντικό αντίκτυπο στο χαρακτηρισμό και την ταυτοποίηση της ύλης αλλά και πιθανές εφαρμογές στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, ιατρικών διαγνώσεων, καθώς και σε εφαρμογές ασφαλείας και ελέγχου ποιότητας. Οι έρευνες του 21<sup>ου</sup> αιώνα στην THz ζώνη συχνοτήτων είναι από τους πλέον υποσχόμενους τομείς μελέτης για την πραγματοποίηση μεγάλων προόδων στην απεικόνιση καθώς και σε άλλα διεπιστημονικά πεδία. Η πτυχιακή αυτή εργασία αποσκοπεί να εξηγήσει τις θεμελιώδεις αρχές παραγωγής και ανίχνευσης ευρυζωνικών THz κυμάτων ρίχνοντας φως και στις πρόσφατες προόδους των νέων οπτικών υλικών τα οποία επηρέασαν με

τη σειρά τους τις εφαρμογές ανίχνευσης και απεικόνισης THz κυμάτων. Έμφαση επίσης δίνεται στη χρήση μη γραμμικών οπτικών υλικών σε συνδυασμό με fs παλμούς laser.

Πολλές νέες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί στον τομέα αυτό από τότε που εφευρέθηκε το πρώτο παλμικό THz φασματοσκοπικό σύστημα πριν από είκοσι και πλέον χρόνια. Οι ερευνητές επωφελούμενοι από τις νέες αυτές τεχνολογίες έχουν σταδιακά αποκαλύψει τις μοναδικές ιδιότητες των THz κυμάτων και τις πολλά υποσχόμενες εφαρμογές τους. Σε αυτή λοιπόν την πτυχιακή εργασία θα σας παρουσιάσουμε τις ποικίλες επιστημονικές εφαρμογές και τεχνολογίες των THz κυμάτων με ιδιαίτερη έμφαση στις παλμικές THz τεχνολογίες.

Θα ξεκινήσουμε με μια ιστορική ανασκόπηση της THz τεχνολογίας, έπειτα θα κάνουμε μια σύνοψη των μεθόδων παραγωγής και ανίχνευσης THz κυμάτων, εν συνεχεία θα ερευνήσουμε την αλληλεπίδραση των THz κυμάτων με την ύλη ενώ στο τέλος θα παρουσιάσουμε μοναδικές εφαρμογές που δημιουργήθηκαν αποκλειστικά για αυτόν το τύπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Παρά το γεγονός ότι δίνουμε μεγάλη έμφαση στην παλμική THz τεχνολογία θα παράσχουμε επίσης μια σύντομη εισαγωγή για τις THz τεχνολογίες συνεχούς κύματος.

Σκοπός αυτής της πτυχιακής είναι να παράσχει μια ανασκόπηση της THz παραγωγής, ελέγχου και ανίχνευσης φωτονίων και όχι να εστιάσει σε συγκεκριμένες τεχνολογίες. Εισάγει λοιπόν τις βασικές αρχές της THz φωτονικής και περιλαμβάνει επίσης τις πιο πρόσφατες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα αλλά και αυτές που πρόκειται να συναντήσουμε στο άμεσο κοντινό μέλλον.

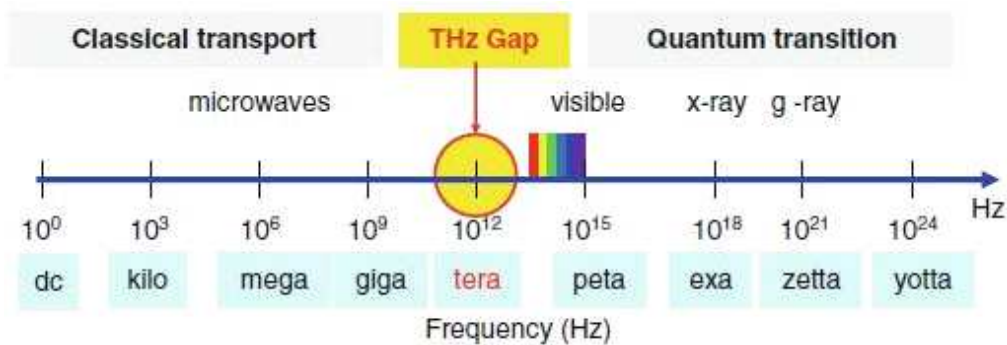
Ελπίζουμε να βοηθήσουμε τους αναγνώστες, κυρίως μεταπτυχιακούς φοιτητές και ερευνητές σε ακαδημαϊκούς και βιομηχανικούς τομείς οι οποίοι θα ενδιαφερθούν για τις βασικές αρχές των τεχνολογιών THz, παρέχοντας τους έναν οδηγό για τις αρχές που διέπουν αυτές τις νέες τεχνολογίες. Ελπίζουμε όμως ότι κι οι νεοεισερχόμενοι στον χώρο της THz φωτονικής θα βρουν την πτυχιακή αυτή ως ένα πολύτιμο εργαλείο αναφοράς για τις μελέτες τους.

# Κεφάλαιο 1

## TERAHERTZ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### Εισαγωγή στην THz ακτινοβολία.

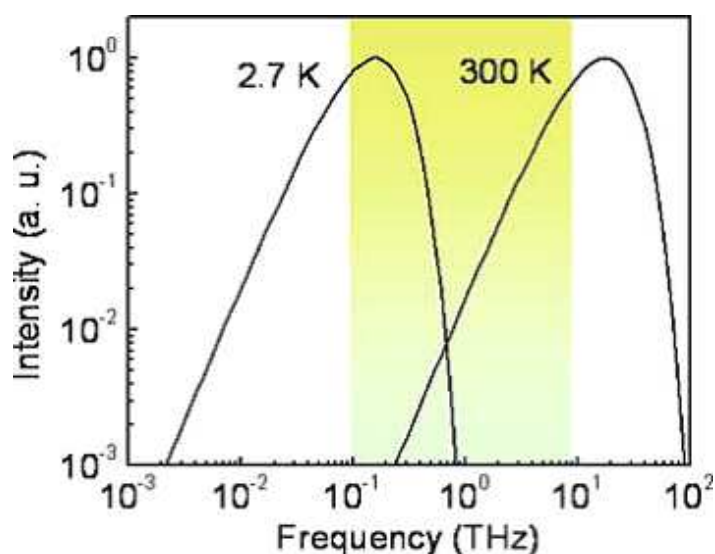
Διάφορες συχνότητες είναι κατανεμημένες στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, συμπεριλαμβανομένων των μικροκυμάτων, της υπέρυθρης ακτινοβολίας, του ορατού φωτός και των ακτίνων-X. Μεταξύ των μικροκυματικών και υπέρυθρων συχνοτήτων βρίσκεται η terahertz (THz) ακτινοβολία (Εικ. 1.1). Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ακτινοβολία 1 THz έχει περίοδο 1 ps, μήκος κύματος 300  $\mu\text{m}$ , αριθμό κύματος 33  $\text{cm}^{-1}$ , ενέργεια φωτονίου ίση με 4.1 meV ενώ έχει θερμοκρασία 47.6 K. Με τον ίδιο τρόπο λοιπόν που το ορατό φως δημιουργεί μια φωτογραφία, τα ραδιοκύματα μεταδίδουν τον ήχο και οι ακτίνες-X μπορούν να διακρίνουν σχήματα μέσα στο ανθρώπινο σώμα, τα THz κύματα (αποκαλούμενα και ως ακτίνες-T) μπορούν να δημιουργήσουν εικόνες και να μεταδώσουν πληροφορίες.



Εικόνα 1.1. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η ανάπτυξη αποδοτικών εκπομπών και ανιχνευτών μέσα σε κάθε φασματικό πεδίο αυτού οδήγησε στη γέννηση πολλών βιομηχανικών πεδίων. Η αναζήτηση για ενδεχόμενες εφαρμογές που χρησιμοποιούν THz ακτινοβολία εντείνεται σταθερά καθώς η έρευνα πάνω σε νέα υλικά κατασκευής παρέχει βελτιωμένες πηγές και ανιχνευτές κατάλληλους για THz ακτινοβολία.

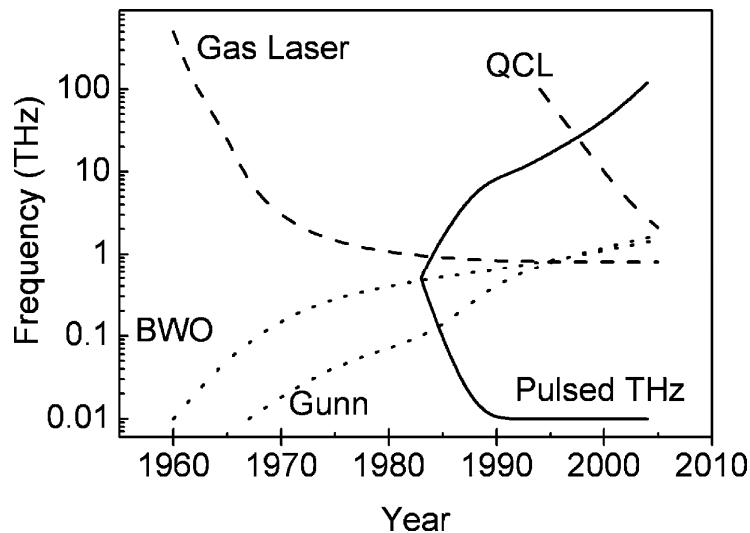
Πλήθος πηγών ακτινοβολίας THz μας περιβάλλει, από την κοσμική ακτινοβολία (cosmic background radiation) μέχρι την ακτινοβολία μέλανου σώματος (blackbody

radiation) η οποία προέρχεται από αντικείμενα σε θερμοκρασία δωματίου (Εικ. 1.2). Οι περισσότερες από αυτές τις πηγές είναι μη συνεκτικές και δύσκολα μπορούν να αξιοποιηθούν. Μέχρι πρόσφατα ωστόσο πολύ μεγάλο τμήμα της THz ακτινοβολίας του φάσματος δεν μπορούσε να αξιοποιηθεί μιας και δεν υπήρχαν οι κατάλληλοι εκπομποί για την αποστολή ελεγχόμενων THz σημάτων αλλά ούτε και αποτελεσματικοί αισθητήρες για την συλλογή των σημάτων και τη καταγραφή των πληροφοριών.



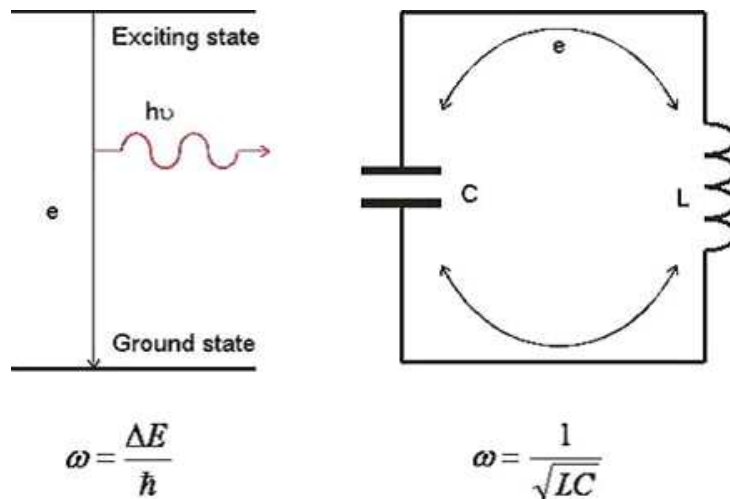
Εικ. 1.2. Κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου και ακτινοβολία μέλανου σώματος από αντικείμενα θερμοκρασίας δωματίου. Η σκιασμένη περιοχή δηλώνει την THz ζώνη.

Ως αποτέλεσμα αυτού το THz τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αποκαλούνταν ως THz χάσμα. Μεγάλες όμως προσπάθειες έγιναν προκειμένου να καλυφθεί αυτό το «χάσμα». Στην εικόνα 1.3 μπορούμε να δούμε τον χάρτη της ανάπτυξης των THz πηγών αξιοποιώντας διάφορες τεχνολογίες. Πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της THz φασματοσκοπίας στο πεδίο του χρόνου αλλά και συναφών THz τεχνολογιών μας οδήγησαν στο να δούμε διαφορετικά τον κόσμο, αφού ως αποτέλεσμα της ραγδαίας ανάπτυξης της έρευνας, η THz ακτινοβολία πλέον έχει διαδώσει ευρέως πολλά υποσχόμενες εφαρμογές στην ιατρική, την μικροηλεκτρονική, τη γεωργία, την εγκληματολογία και πολλούς άλλους τομείς.



Εικόνα 1.3. Χάρτης της συναφούς εξέλιξης των πηγών THz

Δεδομένου ότι τα THz κύματα είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα, οι ιδιότητες και η συμπεριφορά τους διέπονται από τις εξισώσεις του Maxwell. Ωστόσο λόγω της συγκεκριμένης θέσης τους στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα τα THz κύματα είναι πολύ πιο δύσκολο να τα χειριστούμε συγκριτικά με τα «γειτονικά» τους κύματα. Η έρευνα σχετικά με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ήταν χωρισμένη σε δυο διαφορετικούς τομείς, την οπτική και την ηλεκτρομαγνητική. Στην εικόνα 1.4 βλέπουμε τη σύγκριση μεταξύ των μηχανισμών παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών και οπτικών κυμάτων. Οι βασικές αρχές, οι μέθοδοι και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την ενασχόληση με τα οπτικά και τα ηλεκτρικά κύματα είναι πολύ διαφορετικά όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε και από τον πίνακα 1.1. Ωστόσο τα THz κύματα δεν μπορούν να ταιριάξουν επακριβώς σε κάποια από αυτές τις δύο κατηγορίες, μιας και πολλές από τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για τα οπτικά ή ηλεκτρικά κύματα μπορεί να μην βρίσκουν ακριβή ισχύ και στην περιοχή των THz κυμάτων.



Εικόνα 1.4 Μετάβαση ηλεκτρονίου (α) κλασσική κίνηση (β) εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

	Electromagnetics	Optics
Name of waves	Electromagnetic waves	Optical waves
Principle	Maxwell equations	Schrodinger equations
Emission	Classical movement	Quantum transition
Measurement	Electric field	Intensity
Tools	Circuit, antenna, waveguide	Lens, mirror, fiber
Approximation	Uniform field	Uniform medium

Πίνακας 1.1 Σύγκριση οπτικών και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Γι 'αυτό το λόγο λοιπόν νέες αρχές, νέες τεχνολογίες και εργαλεία πρέπει να αναπτυχθούν ώστε να κατανοήσουμε και χρησιμοποιήσουμε σωστά τα THz κύματα. Για παράδειγμα ηλεκτρικά κύματα παράγονται συνήθως από την μετατόπιση των φερόντων κυμάτων, ωστόσο πιο παραδοσιακές πηγές ραδιοσυχνοτήτων δεν μπορούν να παράγουν υψηλής συχνότητας ακτινοβολία (πάνω από αρκετές εκατοντάδες GHz) επειδή η κίνηση του φέροντος δεν μπορεί να ακολουθήσει την ταχύτητα της THz ταλάντωσης. Εκτός από ορισμένους μηχανισμούς όπως η ακτινοβολία μελανού σώματος το περισσότερο φως εκπέμπεται από την μετάβαση μεταξύ των διάφορων ενεργειακών επιπέδων. Δεδομένου ότι τα THz κύματα έχουν πολύ χαμηλή ενέργεια φωτονίων η θερμική χαλάρωση μπορεί πολύ εύκολα να συγκαλύψει τη διάκριση μεταξύ των δύο καταστάσεων των οποίων η ενεργειακή διαφορά ισούται με ένα THz φωτόνιο. Άλλο παράδειγμα όπου οπτικές και ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές μπορούν να φανούν ασύμβατες είναι οι κυματοδηγοί. Με αυτή τη διαδικασία μεταλλικοί

κυματοδηγοί χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μικροκυμάτων όμως εμφανίζουν υψηλή απώλεια όταν πρόκειται για THz κύματα, ενώ αντίστοιχα οι διηλεκτρικοί κυματοαγωγοί και οι οπτικές ίνες εμφανίζουν μεγάλες απώλειες και διασπορά.

Παρά τις δυσκολίες αυτές, η ξεχωριστή αυτή φύση των THz κυμάτων διεγείρει τους ερευνητές στο να αναπτύξουν τη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων προς όφελος πολλών εφαρμογών:

- Τα THz κύματα έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος από τα ορατά και υπέρυθρα κύματα και αυτό σημαίνει ότι επηρεάζονται λιγότερο από την σκέδαση Mie. Τα THz κύματα είναι διαφανή για τα περισσότερα ξηρά διηλεκτρικά υλικά όπως το ύφασμα, το χαρτί, το ξύλο και το πλαστικό. Θεωρούνται λοιπόν πολύ ελπιδοφόρα για τον τομέα εφαρμογών της μη καταστροφικής αξιολόγησης. Για παράδειγμα στην εικόνα 1.5 βλέπουμε την απεικόνιση THz κύματος μιας ρακέτας που βρίσκεται μέσα σε μια μαύρη πλαστική σακούλα.



Εικόνα 1.5. (α) η ρακέτα (β) μέσα στην μαύρη πλαστική τσάντα και (γ) απεικόνιση της ρακέτας μέσα στην τσάντα με την εφαρμογή THz κύματος (0.6 THz).

- Συνεκτικά THz σήματα μπορούν να ανιχνευθούν στο χρονικό πεδίο με τη χαρτογράφηση του περιοδικού ηλεκτρικού πεδίου ως προς το πλάτος και τη φάση. Το γεγονός αυτό μας δίνει τη δυνατότητα φασματοσκόπησης της διασποράς και απορρόφησης που αυτά παρουσιάζουν.

Η συνεκτική THz φασματοσκοπία χρονικού πεδίου με ένα πολύ μεγάλο εύρος ζώνης παρέχει μια νέα μέθοδος για τον χαρακτηρισμό και σύνθεση ιδιοτήτων των στερεών, υγρών, αερίων καθώς επίσης της εκάστοτε φλόγας και ροής. Θεωρητικά, όπως προαναφέραμε, πολλές βιολογικές και χημικές ενώσεις παρουσιάζουν ξεχωριστές αποκρίσεις στα THz κύματα λόγω των μοναδικών μοριακών δονήσεων τους και των περιστροφικών ενεργειακών επιπέδων τους, αφήνοντας έτσι να εννοηθεί ότι θα μπορούσαμε να εξετάσουμε την χημική τους σύσταση απλά χρησιμοποιώντας μια δέσμη THz ακτινοβολίας. Μια τέτοια δυνατότητα θα μπορούσε να εφαρμοσθεί για την διάγνωση μιας ασθένειας, την ανίχνευση ρύπων αλλά και τον ποιοτικό έλεγχο προϊόντων διατροφής. Είναι επίσης πολύ πιθανό ότι πλαστικά εκρηκτικά θα μπορούσαν να ανιχνευθούν μέσα σε βαλίτσες, ρούχα και κοινά υλικά οικιακής χρήσης και εξοπλισμού και τα οποία βασίζονται στη μοριακή δομή. Ανιχνεύοντας τη κατάσταση του γενετικού υλικού (DNA και RNA) με απευθείας χρήση THz κυμάτων και χωρίς να απαιτούνται γενετικοί σημειωτές ανοίγουμε το μέλλον για τις μελλοντικές βιο-τσιπ τεχνολογίες.

Μια τέτοιου είδους THz απεικόνιση σε βιολογικά δείγματα θα παρήγαγε εικόνες που θα επέτρεπε την ανάλυση περιεκτικότητας τους σε νερό και τη σύνθεση των ιστών. Αυτό το χαρακτηριστικό παρουσιάζει τεράστιες δυνατότητες αφού με την έγκαιρο εντοπισμό των αλλαγών στη σύνθεση και λειτουργία των βιολογικών δειγμάτων θα μπορούσε να λειτουργήσει ως πρόδρομος σε συγκεκριμένες ιατρικές έρευνες και θεραπείες. Επίσης αξίζει να αναφέρουμε ότι οι συμβατικές τεχνικές απεικόνισης οπτικών κυμάτων παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά σε αντίθεση με τη THz ακτινοβολία όπου λόγω του μεγαλύτερου μήκος κύματος παρουσιάζει χαμηλή διασπορά, άρα πολύ καλύτερη απεικόνιση του αντικειμένου που εξετάζουμε.

Πολλές δεκαετίες έχουν περάσει από τότε που για πρώτη φορά μελετήθηκε επιστημονικά η THz ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αρχικά αυτό το είδος ακτινοβολίας ονομάστηκε υπέρυθρη ακτινοβολία χιλιοστομετρικών / υποχιλιοστομετρικών κυμάτων. Ήταν όμως στα μέσα της δεκαετίας του 1980 όταν η περεταίρω ανάπτυξη της οπτοηλεκτρονικής οδήγησε στην επιτυχή δημιουργία και ανίχνευση THz παλμών και άνοιξε ευρέως το ενδιαφέρον για τη συγκεκριμένη ηλεκτρομαγνητική περιοχή. Οι πρώτοι ερευνητές επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη



τεχνολογιών για την παραγωγή, ανίχνευση και χειρισμό των THz κυμάτων. Έπειτα ακολούθησε η χρήση THz κυμάτων για βασικές επιστημονικές έρευνες ενώ πλέον το ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί στην εφαρμογή αυτών των κυμάτων και σε μη επιστημονικές εφαρμογές της που θα βρουν απήχηση στον «πραγματικό» κόσμο.

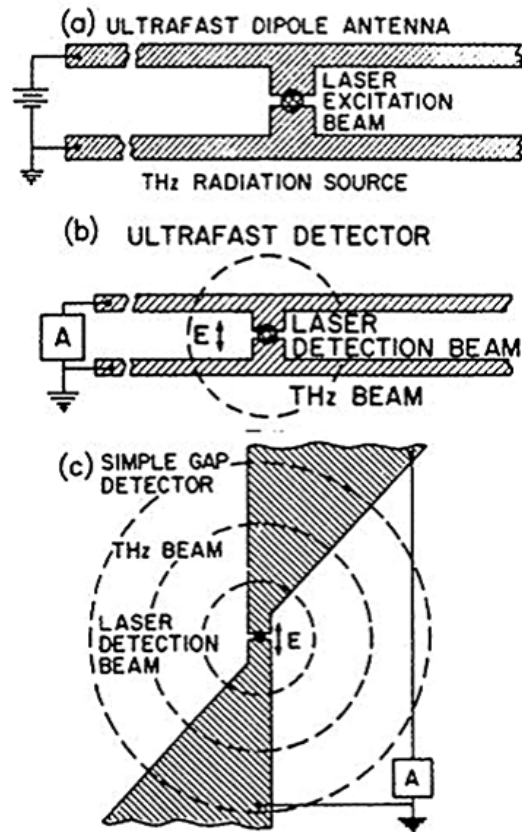
Στις δεκαετίες που ακολούθησαν την εφεύρεση του πρώτου παλμικού συστήματος THz αναπτύχθηκε μια πληθώρα νέων τεχνολογιών από τις οποίες επωφελήθηκαν οι ερευνητές αποκαλύπτοντας έτσι σιγά σιγά τις μοναδικές ιδιότητες αυτών των κυμάτων και τις πολλά υποσχόμενες εφαρμογές που θα μπορούσαν να βρουν. Πολλά βιβλία με θέμα την εκ βάθους έρευνα των THz σε διάφορα θέματα έχουν εκδοθεί και τα οποία μπορούν να φανούν χρήσιμα στους επίδοξους ερευνητές ωστόσο λιγότερο κατάλληλα προς τους νεοεισερχόμενους μελετητές αυτού του πεδίου, όπως οι μεταπτυχιακοί φοιτητές αλλά και ερευνητές εκτός του συγκεκριμένου πεδίου που πιθανών θα ήθελαν να γνωρίσουν τις βασικές αρχές αλλά και μια συνοπτική εικόνα των THz τεχνολογιών. Σε αυτή λοιπόν την πρακτική παρουσιάζουμε τις διάφορες επιστήμες, τεχνολογίες και εφαρμογές των THz κυμάτων με έμφαση στις παλμικές THz τεχνολογίες και με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι κατάλληλο προς φοιτητές και ερευνητές. Ελπίζουμε ότι η προσπάθεια μας θα βοηθήσει τους αναγνώστες να αποκτήσουν μια πανοραμική θέα στον τομέα της THz έρευνας.

Σκοπός αυτής της πρακτικής είναι να εισάγει τις βασικές γνώσεις των THz τεχνολογιών και όχι να αναθεωρήσει η συνοψίσει την ιστορία της THz έρευνας. Όλα τα στοιχεία, οι εικόνες, οι πίνακες και οι εξισώσεις που αναφέρονται στη παρούσα πρακτική παρουσιάζονται αποκλειστικά για να τονίσουν τη συζήτηση μας ενώ ελλείψεις σε αναφορές παλαιότερων έργων της THz έρευνας δε σημαίνει ότι αγνοήθηκαν ή ότι θεωρήθηκαν λιγότερο σημαντικές.

## THz έρευνα – Παρελθόν και Παρών

Τα παλμικά THz συστήματα αναφέρονται συνήθως σε εκείνα που παράγουν, διαδίδουν και ανιχνεύουν παροδικούς ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Η πληροφορία του παλμού λαμβάνεται στο πεδίο του χρόνου και μπορεί τελικώς να μετασχηματιστεί στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω μετασχηματισμού Fourier. Προκειμένου να διατηρήσουμε την ισχύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στην περιοχή των THz συχνοτήτων, η διάρκεια της ηλεκτρομαγνητικής ταλάντωσης πρέπει να είναι εντός του εύρους των picosecond. Οι πρώτες εργασίες ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και αρχές του 1980 με την μελέτη της απόκρισης των φωτοαγωγών (PC) σε παλμούς laser [1-4]. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 η χρήση PC κεραιών παρήγαγε τον πρώτο πρωτότυπο παλμικό THz εκπομπό και ανιχνευτή [5, 6] οι οποίοι εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως μέχρι σήμερα για την εκπομπή και ανίχνευση της THz ακτινοβολίας. Στη εικόνα 1.7 μπορούμε να δούμε την ιδέα αυτών των PC κεραιών [22]. Διάφοροι μηχανισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή THz ακτινοβολίας, οι πιο κοινές όμως προσεγγίσεις είναι η φωτοαγωγή (photoconduction) και η οπτική ανόρθωση (optical rectification). Η πραγματική απόδοση μετατροπής όμως για αυτές τις τεχνικές είναι πολύ χαμηλές κι ενώ η μέση THz ισχύς τείνει να είναι στο εύρος των nW έως μW η μέση ισχύς των οπτικών πηγών βρίσκεται μεταξύ δεκάδων nW και δεκάδων μW.

Η οπτική ανόρθωση βασίζεται στην αντίστροφη διαδικασία του ηλεκτρο οπτικού φαινομένου (EO effect). Αυτή η τεχνική αρχικά παρουσιάστηκε για την δημιουργία άπω-υπέρυθρης ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας LiNbO<sub>3</sub> και ZnTe [8] και πραγματοποιήθηκαν σημαντικές έρευνες για την βελτιστοποίηση της THz παραγωγής μέσω της διερεύνησης των ηλεκτρο-οπτικών ιδιοτήτων διαφορετικών υλικών όπως παραδοσιακούς ημιαγωγούς σαν το GaAs, οργανικούς κρυστάλλους σαν το DAST και πολλά άλλα [9–14]. Γενικά αποδείχτηκε ότι τα υλικά με μεγάλο μη γραμμικό συντελεστή δεύτερης τάξης και χαμηλή απορροφητικότητα τόσο στα οπτικά όσο και στα THz κύματα είναι πολύ καλοί υποψήφιοι για μια THz πηγή [15].



Εικόνα 1.7 Κεραία που χρησιμοποιείται ως πομπός THz κυμάτων (α) και ανιχνευτής (β) και (γ). (α) ultrafast διπολική κεραία, ultrafast ανιχνευτής (β) και (γ) ένας απλός ανιχνευτής χάσματος.

Επί του παρόντος το ZnTe (Zinc telluride) είναι το υλικό της επιλογής μας λόγω και του υψηλού μη γραμμικού συντελεστή του. Τα fiber laser παρουσιάζουν μεγαλύτερη ισχύ και υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά solid state laser παρουσιάζοντας μήκη κύματος μεταξύ  $1.04 \mu\text{m}$  -  $1.56 \mu\text{m}$ , για να βελτιστοποιήσουμε όμως τη συμφωνία φάσης αυτών των κυμάτων θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε νέα υλικά κατασκευής, όπως το αρσενίδιο γαλλίου (GaAs), έναν σημαντικό ημιαγωγό που παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά από το πυρίτιο όπως για παράδειγμα η υψηλότερη ταχύτητα και κινητικότητα ηλεκτρονίων ώστε να λειτουργεί και σε συχνότητες άνω των 250 GHz . Το GaAs λοιπόν αποδείχθηκε το πλέον κατάλληλο για τα fiber laser Ερβίου [18].

Οι φωτοαγωγίμες κεραίες είναι εκπομποί THz κυμάτων με δυνατότητα μεγάλης ισχύος άνω των  $40 \mu\text{W}$  [23] και υψηλό εύρος ζώνης που φτάνει τα 10 THz [24] και παρασκευάζονται συνήθως από ημιμονωτικό GaAs [(SI) GaAs]. Το αρσενίδιο γαλλίου ίνδιου από την άλλη (InGaAs) χρησιμοποιείται για να

αντικαταστήσει το GaAs σε περιπτώσεις όπου δουλεύουμε με πηγές μεγαλύτερου μήκους κύματος, όπως για παράδειγμα τα fiber laser λόγω του χαμηλότερου ενεργειακού διάκενου που το χαρακτηρίζει. [28, 29]. Συγκρίνοντας τις PC κεραίες με άλλες THz πηγές όπως αυτή των ZnTe κρυστάλλων θα βλέπαμε ότι δεν παρουσιάζουν απορρόφηση φωτονίου γύρω στα 5 THz, πράγμα που τις καθιστά κατάλληλες για gap-free (χωρίς διάκενα) ευρυζωνική φασματοσκοπία άνω των 7 THz. Ωστόσο η μέθοδος της οπτικής ανόρθωσης είναι προτιμότερη για ευρυζωνική THz ακτινοβολία μιας και το εύρος ζώνης του THz φάσματος καθορίζεται μόνο από τη χρονική διάρκεια του laser παλμού και όχι από την χρονική απόκριση του υλικού [30, 31]. Με αυτό τον τρόπο το εύρος ζώνης της παραγόμενης THz ακτινοβολίας θα μπορούσε να φτάσει τα 100 THz χρησιμοποιώντας απλά έναν υπερβραχύ παλμό laser [32].

Η μελέτη της THz ακτινοβολίας που προέρχεται από πρώτες ύλες ώθησε τη γέννηση μιας νέας επιστήμης, αποκαλούμενη ως φασματοσκοπία THz ακτινοβολίας. Η ανάλυση αυτών των THz παλμών που προέρχονται από τέτοια υλικά μπορεί να μας βοηθήσει στο να κατανοήσουμε καλύτερα τα υλικά αυτά όπως για παράδειγμα μελετώντας τη μέγιστη ταχύτητα ολίσθησης ηλεκτρονίων, μια πολύ σημαντική παράμετρος των υλικών. Το δυναμικό διάσπασης (dielectric breakdown field) του εκάστοτε υλικού είναι άλλη μια σημαντική παράμετρος μιας και αυτό καθορίζει τη μέγιστη τάση πόλωσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτό [40].

Πρόσφατα αποδείχθηκε ότι THz ακτινοβολία μπορεί να παραχθεί και με τη βοήθεια του αέρα [55] ο οποίος παρουσιάζει έναν μη γραμμικό συντελεστή τρίτης τάξης, οπότε χρησιμοποιώντας ένα παλμικό laser γίνεται δυνατό να αναμιχθούν το θεμελιώδες κύμα με τη δεύτερη αρμονική του, οδηγώντας έτσι σε αποδοτική παραγωγή THz ακτινοβολίας. Αυτή η διαδικασία μας δίνει τη δυνατότητα χρήσης THz τεχνικών για τηλεανίχνευση.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανίχνευσης THz παλμών είναι η ΕΟ δειγματοληψία και η χρήση των PC κεραίων οι οποίες επίσης χρησιμοποιούνται και για την παραγωγή THz παλμών αλλά μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν και για την ανίχνευση τους. Έτσι λοιπόν αντί να εφαρμόσουμε μια ανάστροφη τάση πόλωσης στα ηλεκτρόδια της κεραίας, χρησιμοποιούμε έναν ενισχυτή ρεύματος και ένα αμπερόμετρο για τη μέτρηση του περιοδικού ρεύματος που παράγεται από έναν

οπτικό παλμό και πολώνεται από ένα στιγμιαίο THz πεδίο. Το πολωμένο αυτό ρεύμα είναι ανάλογο με το εφαρμοσμένο THz πεδίο. Μπορούμε χρησιμοποιώντας μια PC κεραία να ανιχνεύσουμε τα ευρυζωνικά THz κύματα, με προϋπόθεση βέβαια να έχουμε χρησιμοποιήσει τα κατάλληλα υλικά κατασκευής της, αφού για παράδειγμα η ανίχνευση μεγάλου εύρους ζώνης γίνεται με τη χρήση τέτοιων φωτοαγωγίμων κεραιών κατασκευασμένες από LTG-GaAs με ανιχνεύσιμες συχνότητες άνω των 60 THz [58]. Τα ανοίγματα αυτών των κεραιών είναι δυνατά σε πολύ μικρή κλίμακα καθιστώντας έτσι δύσκολη την οπτική ευθυγράμμιση συγκριτικά με την μέθοδο της ΕΟ δειγματοληψίας.

Η μέθοδος της ΕΟ δειγματοληψίας από την άλλη, χρησιμοποιεί μη γραμμικούς κρυστάλλους δεύτερης τάξης για την ανίχνευση της μεταβολής πόλωσης του παλμού που αλληλεπιδρά με τον THz παλμό. Βασικά η ΕΟ επίδραση είναι το αποτέλεσμα της σύζευξης ενός χαμηλής συχνότητας ηλεκτρικού πεδίου (THz παλμός) και μιας δέσμης laser (οπτικός παλμός) στον αισθητήρα του κρυστάλλου [59–61]. Η απόκριση συχνότητας για την ανίχνευση των κυμάτων είναι η ίδια με αυτήν για την παραγωγή ενώ η συμφωνία φάσης και η απορρόφηση του κρυστάλλου παίζουν ουσιαστικό ρόλο στην απόδοση του ανιχνευτή. Έτσι λοιπόν οι λεπτότεροι κρύσταλλοι παρέχουν μεγαλύτερη απόκριση συχνότητας αλλά η απόσταση αλληλεπίδρασης είναι μικρότερη με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μειωμένη ευαισθησία. Μεταξύ των πολλών ηλεκτρο-οπτικών (ΕΟ) κρυστάλλων όπως ο GaP, ο GaAs, οι οργανικοί κρύσταλλοι, ο ZnTe κρύσταλλος κρίνεται ως ο καταλληλότερος για την ανίχνευση κυμάτων THz χρησιμοποιώντας παλμούς laser με μήκη κύματος γύρω στα 800 nm. Οι συνθήκες για την συμφωνία φάσης του αισθητήρα είναι ίδιες με αυτές του πομπού, έτσι η χρήση ενός πολύ στενού χρονικού laser παλμού (< 15 fs) και ενός πολύ λεπτού κρυστάλλου (<30 μm) επιτρέπει την ηλεκτρο-οπτική ανίχνευση των σημάτων μέσα στη μέση-υπέρυθρη περιοχή.

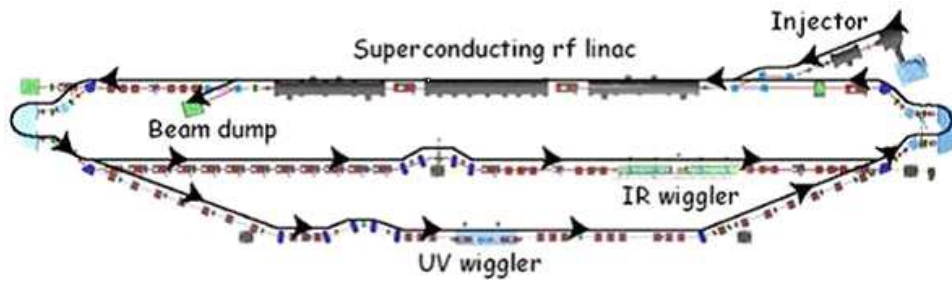
Η παραγωγή συνεχών κυμάτων (CW) THz ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο ακραία περίπτωση παλμικής εκπομπής, αφού σε αυτή τη περίπτωση ο παλμός διαρκεί άπειρα. Γενικώς σε ένα σύστημα συνεχών κυμάτων μπορεί να παραχθεί μόνο μια συχνότητα τη φορά αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ευρυζωνικές πηγές, ενώ όσον αφορά τους ανιχνευτές είναι διαθέσιμοι τόσο οι ευρείας ζώνης όσο και οι στενής ζώνης. Το φάσμα συχνοτήτων σε αυτά τα συστήματα συνεχών κυμάτων είναι πολύ μικρότερο εκείνων που λειτουργούν

σε παλμική εκπομπή από την άλλη πλευρά όμως οι πηγές αυτές στενής ζώνης είναι πολύ σημαντικές για εφαρμογές φασματοσκοπίας υψηλής ανάλυσης ενώ μπορεί να καταστούν πολύ σημαντικές και για εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες. Αυτές οι πηγές προσφέρουν επίσης υψηλότερη μέση ισχύ από τις αντίστοιχες παλμικές και είναι ικανές να αξιοποιηθούν σε μικρές και φορητές συσκευές.

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική για την παραγωγή χαμηλής ισχύος (από 100  $\mu$ W-20 mW έως 0.6 THz) CW THz ακτινοβολίας είναι μέσω της τεχνικής up-conversion που εφαρμόζεται σε μικροκυματικούς ταλαντωτές χαμηλότερης ισχύος όπως οι ελεγχόμενοι από τη τάση ταλαντωτές (VCO) και οι ταλαντωτές διηλεκτρικών συντονιστών (DRO). Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι ταλαντωτές είναι ο ταλαντωτής Gunn και οι δίοδοι IMPATT ενώ γίνονται πολλές έρευνες προσανατολισμένες στο να αυξήσουν τη συχνότητα αυτών των δύο χρησιμοποιώντας διαφορετικές δομές ημιαγωγών και τεχνικές κατασκευής, μιας και ένα σύνηθες όριο συχνοτήτων για τις εμπορικά διαθέσιμες συσκευές τους φτάνει περίπου μόλις το 0.6 THz. [68].

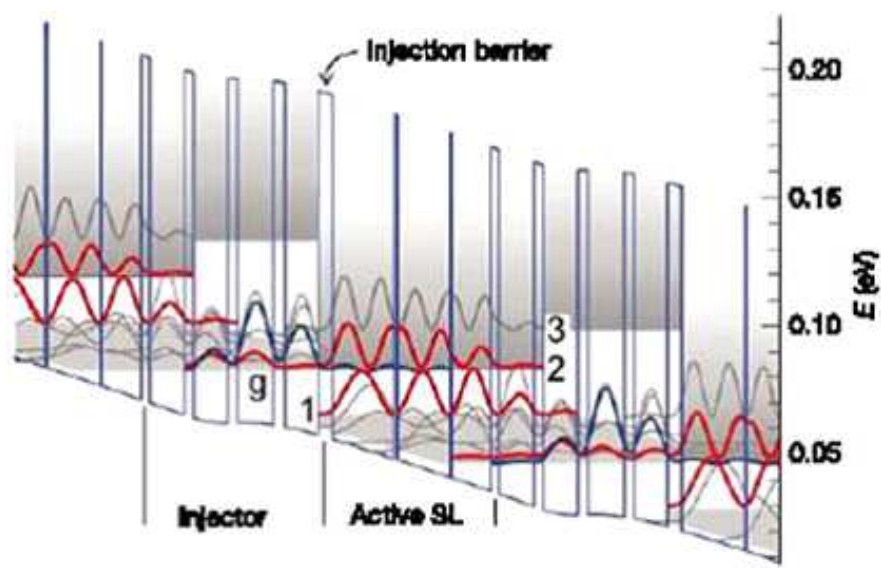
Ο ταλαντωτής BWO (Backward Wave Oscillator) είναι άλλη μια ευρέως μεταχειριζόμενη THz πηγή χαμηλών συχνοτήτων όπου βασίζεται σε μια μαγνητικώς εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων που φέρει ένα RF σήμα. Και είναι ικανοί για ισχύς εξόδου πάνω του 1 THz [69].

Ακόμη μία πηγή είναι τα laser ελεύθερων ηλεκτρονίων (Free-electron lasers) που παράγονται από επιταχυντές οι οποίοι αναγκάζουν ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας να διέλθουν σε περιοχές με μεγάλες μεταβολές μαγνητικού πεδίου (Εικ. 1.8) Αυτά τα laser μπορούν να παράγουν ακτινοβολία THz εξαιρετικά υψηλής ισχύος [52, 72], και μπορούν να λειτουργήσουν τόσο για την παραγωγή παλμικών κυμάτων όσο και συνεχών. Έχουν σημαντικές δυνατότητες στις εφαρμογές όπου η χρήση πηγών υψηλής ισχύος είναι ουσιαστικής σημασίας ή κατά την εξέταση της μη γραμμικής THz φασματοσκοπίας.



Εικόνα 1.8. Laser ελεύθερων ηλεκτρονίων

Προσφάτως έχουν αναπτυχθεί τα lasers κβαντικής ακολουθίας (Quantum cascade lasers – QCL), μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την παραγωγή THz ακτινοβολίας. Οι πρόσφατες ανακαλύψεις στις τεχνικές εναπόθεσης ημιαγωγών επιτρέπουν την κατασκευή πολλαπλών κβαντικών ημιαγωγών δομών κάνοντας έτσι το όραμα για παραγωγή THz μέσω QCL (Εικ. 1.9) πιο εφικτό.



Εικόνα 1.9. Η ιδέα παραγωγής THz ακτινοβολίας μέσω QCL.

Το φως παράγεται σε ένα laser QCL μέσω των μεταβάσεων intersubband στη σειριακή διάταξη των κβαντικών πηγαδιών, δηλαδή τις δίπολο-οπτικές διεγέρσεις μεταξύ των κβαντοποιημένων ηλεκτρονικών επιπέδων μέσα στη ζώνη διεξαγωγής των ετερόδομων ημιαγωγών [76]. Τα QCL laser μπορούν να παράγουν επιθυμητή ακτινοβολία και με τους δύο τρόπους, παλμικό και συνεχούς παλμού με το δεύτερο να μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες παράγοντας υψηλότερα

μήκη κύματος και υψηλότερο βαθμό μέγιστης ισχύος. Πρόσφατα αποτελέσματα ανέφεραν ισχύ που φτάνει πάνω από δεκάδες mW [77]. Κατά βάση όμως η εργασία με τα QCL βρίσκει εφαρμογή σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, για παράδειγμα στη θερμοκρασία του υγρού αζώτου [78] έως και περίπου 70 K κάτω από τη θερμοκρασία δωματίου, θερμοκρασία δηλαδή που είναι ικανή να επιτευχθεί μέσω της θερμοηλεκτρικής ψύξης.

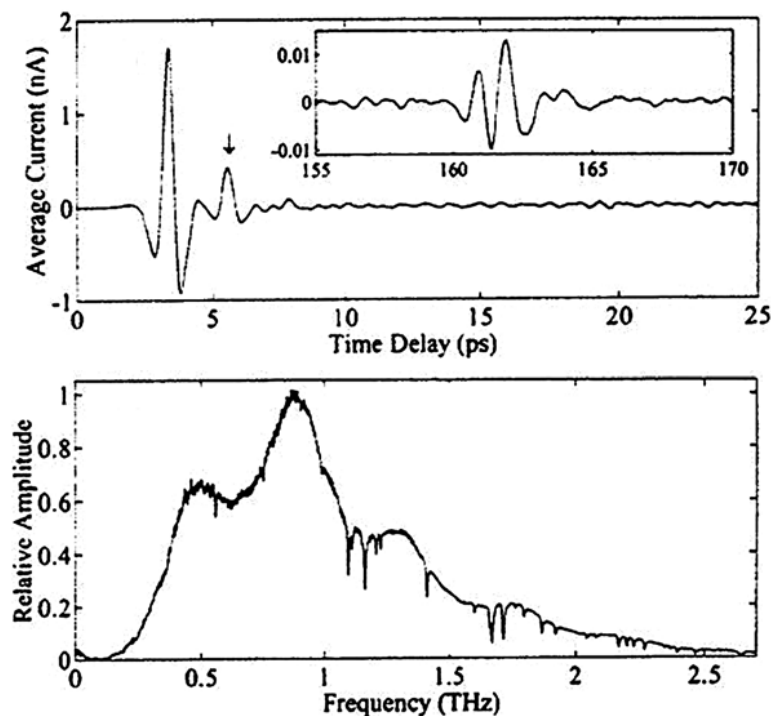
Οπτικές τεχνικές έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή στενής ζώνης THz ακτινοβολίας με τις πρώτες προσπάθειες να γίνονται από τη δεκαετία κιάλας του 1960, με τη μη γραμμική φωτο-μίξη δύο διαφορετικών laser πηγών, μέθοδος όμως που παρουσίασε χαμηλής αποδοτικότητας μετατροπή [79]. Παραμένει όμως ένα πεδίο για περεταίρω έρευνα μιας και η προώθηση και η εξέλιξη νέων υλικών θα μπορούσε να βελτιώσει τις φωτομικτικές τους ιδιότητες [85].

Επίσης έχουμε τις τεχνικές συμβολομετρίας υπερύθρων (Far-infrared interferometry) που χρησιμοποιούν ετερόδυνους ανιχνευτές όπως για παράδειγμα τα βολόμετρα [86]. Δεν μπορούν να συναγωνιστούν όμως τη μέθοδο των φωτοαγωγίων κεραιών και της ηλεκτρο-οπτικής δειγματοληψίας. Έρευνες όμως πάνω σε υπεραγώγιμα υλικά επέφεραν εξαιρετικά ευαίσθητα βολόμετρα που βασίζονται στην αλλαγή κατάστασης ενός υπεραγωγού όπως το νίβιο, ενώ έχουν αποκαλύψει και έναν μονοφωτονικό ανιχνευτή THz ακτινοβολίας και έχει παρουσιαστεί ένας μονοφωτονικός ανιχνευτής για THz φωτονία. Ο ανιχνευτής αυτός προσφέρει απaráμιλλη ευαισθησία χρησιμοποιώντας μια μοναδική κρυσταλλολυχνία αποτελούμενη από μια κβαντική κουκίδα σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, αν και ακόμη παρουσιάζει πολύ μικρές ταχύτητες ανίχνευσης (1 ms), επερχόμενα νέα σχέδια που θα προσφέρουν υψηλές ταχύτητες αναμένεται να φέρουν επανάσταση στο χώρο της THz ανίχνευσης. Το βολόμετρο απαιτεί περιβάλλον ψύξης υγρού ηλίου, ένας ανιχνευτής κυψελίδας Golay όμως (Golay cell) δεν απαιτεί τόσο χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος παρέχοντας έτσι μια νέα προσέγγιση στην συμβολομετρική ανίχνευση [88]. Η κυψελίδα Golay (αέριο θερμόμετρο) απο την άλλη εμφανίζει μικρή απόκριση χρόνου και παρουσιάζει μια μέγιστη ισχύς εξόδου της τάξης των δεκάδων  $\mu\text{W}$  και πιθανή εφαρμογή μεγαλύτερης ισχύος θα διογκώσει το αέριο στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Σε περιπτώσεις θερμοκρασίας δωματίου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και δομές ημιαγωγών όπως τις Schottky διόδους που είναι και οι πιο σύνηθεις. Η μέγιστη συχνότητα που μπορεί



να επιτευχθεί με αυτές τις διόδους μπορεί να φτάσει τα 0.8 THz αλλά μπορεί να φτάσει και ψηλότερα, στα 2.5 THz αν συνδυαστεί με ετερόδυννη τεχνική ανίχνευσης και οι διόδοι Schottky λειτουργούν ως μίκτες [91], προϋπόθεση όμως είναι να έχουμε άλλη μια πηγή διαφορετικής συχνότητας και η διαφορά των δύο συχνοτήτων να είναι εντός του εύρους ανίχνευσης του μίκτη.

Η φασματοσκοπία στο πεδίο του χρόνου (TDS) είναι η κινητήριος δύναμη των φασματοσκοπικών μετρήσεων που διενεργούνται στην THz περιοχή και συνδυάζει την παραγωγή παλμών ενός femtosecond laser πάνω σε ένα γραμμικό κρύσταλλο ή μια φωτοαγώγιμη κεραία, (εικ. 1.10) και παρόλο που η THz ισχύς ενός τέτοιου συστήματος είναι αρκετά ασθενής, έχουμε μεγάλο εύρος λόγω της μεγάλης καταστολής του θορύβου. Η TDS μέθοδος μας δίνει άμεσα πληροφορίες τόσο για την απορροφητικές ιδιότητες του στόχου όσο και τις ιδιότητες διασκορπισμού και διασποράς του στόχου, κάτι που είναι δύσκολο να επιτευχθεί με την παραδοσιακή οπτική φασματοσκοπία.



Εικόνα 1.10. Κυματομορφή THz μετά τη μετάδοση μέσω υδρατμών (α) και φασματοσκόπηση του ατμού στο πεδίο του χρόνου.

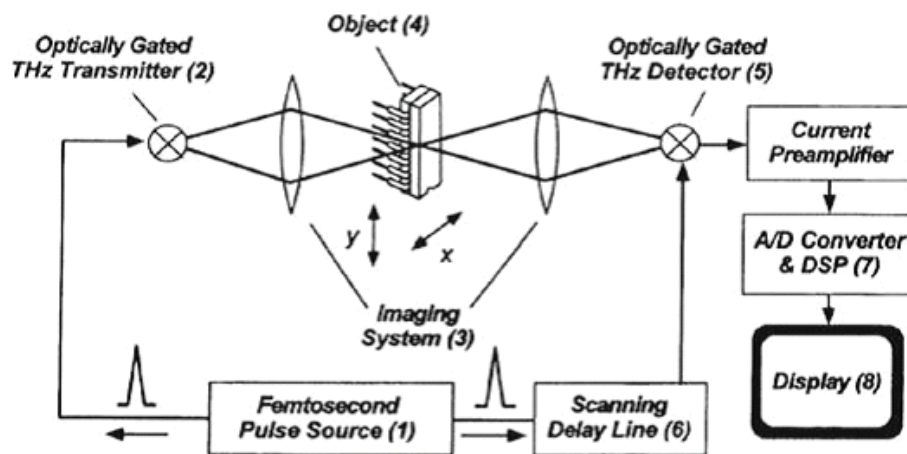
Η ανίχνευση και αναγνώριση εκρηκτικών υλών έχει καταστεί ένα θέμα υψίστης σημασίας για τις μέρες μας και μια γρήγορη τεχνική απαιτείται ώστε να βρει άμεσα

εφαρμογή στον κλάδο αυτό. Η φασματοσκοπία TDS προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα πέραν του προσδιορισμού των αποτυπωμάτων των εκρηκτικών αφού τα THz κύματα μπορούν να διεισδύσουν στο χαρτί, το ύφασμα, το πλαστικό και πολλά άλλα μη μεταλλικά αγαθά δίνοντας έτσι τη δυνατότητα της αναγνώρισης εκρηκτικών μέσα από αδιαφανή υλικά. Η ταυτοποίηση τους μπορεί να γίνει είτε κατά το στάδιο της μετάδοσης ή την αντανάκλαση, με την γεωμετρία της αντανάκλασης όμως να αποτελεί την πιο ρεαλιστική προσέγγιση. Στοιχεία για την διηλεκτρική σταθερά, τον δείκτη διάθλασης και συντελεστή απορρόφησης μπορεί να ληφθούν μέσω της THz-TDS φασματοσκοπίας δίνοντας έτσι τη δυνατότητα προσδιορισμού των διάφορων παραγώγων της βενζίνης και του diesel αλλά και αρωματικές ενώσεις όπως οι o-xylene, m-xylene, και p-xylene.

Οι εφαρμογές απεικόνισης είναι ένα άλλο πεδίο των THz κυμάτων και μπορούν να διαχωριστούν σε παθητικές όπου δεν συμπεριλαμβάνεται THz πηγή και ενεργητικές όπου είναι απαραίτητη η THz πηγή. Η παθητική απεικόνιση βασίζεται στην ανίχνευση της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπουν όλα τα σώματα και μια από τις πιο παλιές μορφές παθητικής τηλεπισκόπησης είναι η χρήση ενός ετερόδυνου ανιχνευτή (επίγειο ή δορυφορικό) για την μελέτη της THz ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μακρινούς γαλαξίες. Το φάσμα αυτό μας δίνει πολύ σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την παρουσία ορισμένων μορίων σε αυτούς τους γαλαξίες όπως για παράδειγμα τα μόρια του νερού, κάνοντας το έτσι ένα σημαντικό εργαλείο για την αναζήτηση πιθανής εξωγήινης ζωής. Άλλα μόρια μπορούν να εντοπιστούν με αυτήν τη τεχνική είναι αυτά του αζώτου και του μονοξειδίου του άνθρακα [106]. Τέτοιες όμως τεχνικές παθητικής THz απεικόνισης έχουν πρόσφατα βρει έδαφος και σε επίγειες εφαρμογές μιας και μεγάλη ποικιλία των κοινών υλικών όπως ξύλο, πλαστικό, χαρτί, ύφασμα που είναι εντελώς αδιαφανή στο οπτικό σύστημα, παρουσιάζουν όμως πολύ χαμηλό βαθμό απορρόφησης όταν εκτίθεται σε THz ακτινοβολία, κάνοντας τα έτσι διαφανή προς τα THz συστήματα απεικόνισης. Η THz εκπομπή όμως που προέρχεται από τα αντικείμενα λόγω όπως είπαμε της θερμότητας τους είναι συνάμα και μια σοβαρή πηγή θορύβου και για αυτό το λόγο οι μέθοδοι παθητικής απεικόνισης έχουν καλύτερα αποτελέσματα στο διάστημα όπου δηλαδή ο ανιχνευτής μπορεί να τοποθετηθεί πάνω σε κάποιον δορυφόρο μακριά δηλαδή από τα ισχυρά θερμικά ερεθίσματα που προέρχονται από τη γη, και με δυνατότητα κατεύθυνσης απευθείας προς το στόχο.

Περνώντας στον ενεργητικό τρόπο απεικόνισης τώρα, ο στόχος εκτίθεται στο επιθυμητό επίπεδο ακτινοβολίας και εν συνεχεία μετρούμαι την ανακλώμενη από αυτόν ακτινοβολία. Τα πρόωρα συστήματα τέτοιου τύπου, χρησιμοποιούσαν Laser αερίων (Laser που χρησιμοποιούν ως ενεργό μέσο ένα αέριο ή μείγμα αερίων μέσα σε σωλήνα) αλλά ο θερμικός θόρυβος αποτελούσε από τότε ένα πρόβλημα, κι ένας τρόπος αντιμετώπισης του είναι η χρήση μιας πηγής πολύ πιο ισχυρής από τον θόρυβο περιβάλλοντος.

Εξετάζοντας την παλμική απεικόνιση THz η οποία παρουσιάστηκε από τους Hu και Nuss των εργαστηρίων Bell Laboratories το 1995 [111] (εικ.1.11), βλέπουμε ότι αξιοποιήθηκε σε πολλές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένης της εξέτασης κοιλότητας των δοντιών [115] και του καρκίνου του δέρματος [116]. Λόγω της χαμηλής ενέργειας φωτονίων (4 meV σε συχνότητα 1 THz) προσφέρει το πλεονέκτημα ότι δε προξενεί βλάβη στους βιολογικούς ιστούς σε σύγκριση με τις τυπικές ακτίνες X που προκαλούν ιονισμό και άλλες επιβλαβείς συνέπειες στους βιολογικούς ιστούς [117, 118]. Το μήκος κύματος είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό της μικροκυματικής ακτινοβολίας και μπορούν να προσφέρουν πολύ υψηλότερη διακριτική ικανότητα. Χρησιμοποιούμενη δε σε τομογραφικές εφαρμογές η THz ακτινοβολία παρουσιάζει μικρότερη σκέδαση από την υπέρυθρη ακτινοβολία επιτρέποντας έτσι καλύτερη πιστότητα στο αποτέλεσμα μας. Τα THz συστήματα απεικόνισης είναι μια πρόσφατη προσθήκη στις τεχνικές απεικόνισης όμως οι μοναδικές ιδιότητες της THz ακτινοβολίας τους επιτρέπει να καλύψουν κενά και έρευνες που άλλες τεχνικές δεν μπορούν να προσεγγίσουν.



Εικόνα 1.11. Set up της απεικόνισης THz κύματος

Η κλασική μέθοδος THz απεικόνισης λειτουργεί με σάρωση του δείγματος από την THz δέσμη η οποία εστιάζεται πάνω στον στόχο, με αυτό το τρόπο καταγράφονται οι πληροφορίες κάθε σημείου του στόχου.

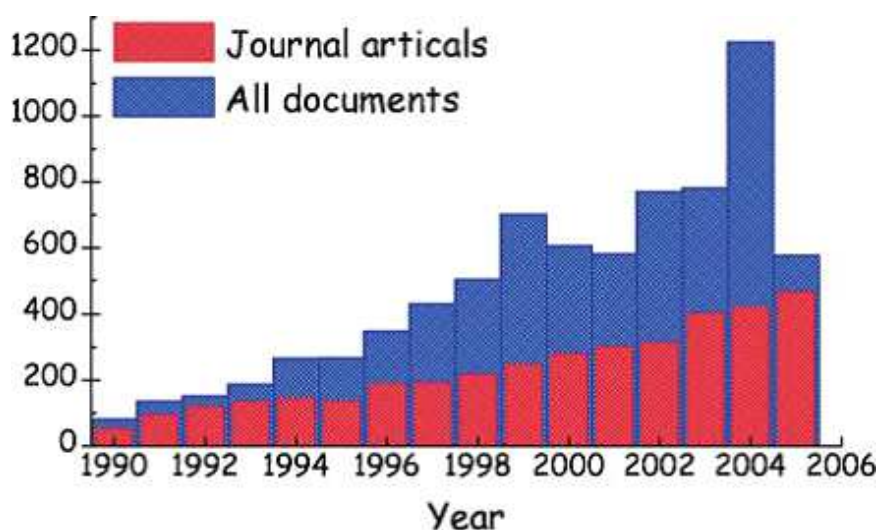
Όσον αφορά τις εφαρμογές, η οπτική παρακολούθηση για λόγους ασφαλείας που κατέστη δυνατή πρώτη φορά το 1970 [125] αρχικά χρησιμοποιούσε υπέρυθρη ακτινοβολία ενώ πλέον έχει επεκταθεί στην THz ακτινοβολία ειδικότερα για συχνότητες κάτω του 1 THz. Το ενδιαφέρον για χρήση THz σε αυτό το τομέα είναι πολύ υψηλό μιας και αυτή η ακτινοβολία μπορεί να έχει παρόμοια λειτουργία με τις ακτίνες-X, με πολύ μικρότερο όμως κόστος αλλά και κίνδυνο για την υγεία. Η τραγωδία του διαστημικού λεωφορείου Columbia που συνέβη λόγω της αποκόλλησης ενός panel κατά την απογείωση οδήγησε τη NASA στο να ψάξει τρόπους ελέγχου και επιθεώρησης των panel ώστε κάτι τέτοιο να αποφευχθεί στο μέλλον. Τέτοιες αποκολλήσεις οφείλονται σε ελατώματα κατά την κατασκευή τους και ανάμεσα στις τεχνικές που ελέγχθηκαν για αυτό το σκοπό, ξεχώρισαν η μέθοδος των ακτινών-X και η THz απεικόνιση. Ως εκ τούτου ο έλεγχος της μόνωσης του αφρού που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια κατασκευής έχει καταστεί μια πολύ σημαντική εφαρμογή για την THz επιστήμη λόγω του χαμηλού συντελεστή διάθλασης και απορρόφησης.

Η χρήση της THz ακτινοβολίας για την εκτέλεση τομογραφιών ήταν πάντα στο μυαλό των ερευνητών μιας και μπορεί να παρέχει πολύ καλύτερη εικόνα από τα μικροκύματα αλλά και από τις ακτίνες-X, χωρίς μάλιστα να απαιτείται η περιστροφή ή μετακίνηση του αντικειμένου που στοχεύουμε.

## **Προσδοκώμενα**

Τα παλμικά συστήματα που βασίζονται στην οπτική ανόρθωση και τις φωτοαγώγιμες κεραίες έχουν εξελιχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια αποκαλύπτοντας ένα μεγάλο μέρος

επιστημονικών πληροφοριών για την THz περιοχή. Στην εικόνα 1.12 μπορούμε να δούμε μια σύνοψη του αριθμού των επιστημονικών δημοσιεύσεων που αφορούν τον THz τομέα, γεγονός που πυροδότησε πολλές ακαδημαϊκές και βιομηχανικές εφαρμογές όπως ο έλεγχος ασφαλείας, ανάλυση γονιδίων και πρωτεϊνών, πραγματοποίηση μετρήσεων σε υγρά και αέρια καθώς και η μελέτη των ημιαγωγών. Ειδικότερα η THz φασματοσκοπία στο πεδίο του χρόνου (THz-TDS) υπήρξε πολύ επιτυχής για την ταυτοποίηση και εντοπισμό μικρών μορίων όπως εκρηκτικά, φάρμακα, ωστόσο έχουν παρουσιαστεί κάποια ζητήματα σε αυτές τις εφαρμογές τα οποία καταστούν δύσκολη την περαιτέρω εξέλιξη τους:



Εικόνα 1.12 Ο αριθμός εκδόσεων σχετικά με τη THz έρευνα στο πέρασμα των ετών.

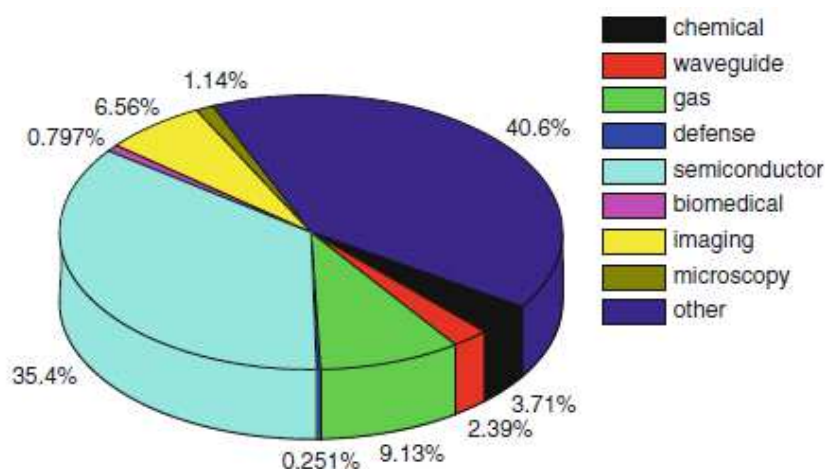
- Οι παλμικοί THz εκπομποί παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση μετατροπής της laser ισχύος εξόδου σε THz ισχύ για αυτό και απαιτείται η χρήση ενός lock-in ενισχυτή ώστε να αυξήσουμε και το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).
- Η υψηλή απορροφητικότητα που παρουσιάζουν οι υδρατμοί είναι άλλο ένα σημαντικό ζήτημα αφού αποδυναμώνει αρκετά το σήμα THz κύματος όταν αυτό διαδίδεται μέσω του αέρα κάνοντας έτσι δύσκολη την τηλεπισκόπηση στον αέρα πέρα κάποιας απόστασης.
- Δείγματα με μεγάλο συντελεστή απορρόφησης εξασθενούν σε μεγάλο βαθμό το THz κύμα κάνοντας έτσι δύσκολη τη συλλογή και ανάλυση του.

Δεδομένου ότι τα μέταλλα δεν είναι διαφανή προς την THz ακτινοβολία προκύπτουν κάποια προβλήματα στις εφαρμογές απεικόνισης για λόγους ασφαλείας και επιθεώρησης μιας και η THz ακτινοβολία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση μεταλλικών συσκευασιών αλλά μπορεί να κάνει σάρωση σε φακέλους και ταχυδρομικά πακέτα ψάχνοντας για εκρηκτικά ή βιολογικούς ιστούς, πράγμα που είναι αδύνατο με τις ακτίνες-X, παρέχοντας έτσι μια ακόμη ελκυστική τεχνολογία λόγω της ασφάλειας και της αξιοπιστίας της έναντι στην τεχνολογία ακτίνων-X.

Το θέμα της ταχύτητας είναι άλλο ένα ζήτημα για αυτές τις εφαρμογές το οποίο βέβαια θα μπορέσει να λυθεί όταν γίνουν διαθέσιμες οι συστοιχίες 2D ανιχνευτών, οι οποίες ακόμη χρησιμοποιούνται μόνο σε εργαστηριακό περιβάλλον. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε επιτέλους να οδηγήσει στην κατασκευή της πρώτης THz κάμερας.

Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα είναι το πολύ μεγάλο κόστος παραγωγής THz φωτονίων σε σύγκριση μάλιστα με τις τεχνικές των μικροκυμάτων, υπερύθρων και οπτικών τεχνολογιών ωστόσο ολοένα και αυτό θα κατεβαίνει όσο η έρευνα και το βιομηχανικό ενδιαφέρον προχωρά αγγίζοντας έτσι μέχρι και το κόστος των οπτικών τεχνολογιών.

Μια σύνοψη των εφαρμογών που υπάρχουν σήμερα μπορούμε να παρατηρήσουμε παρακάτω στην εικόνα 1.14 ενώ τις μελλοντικές εφαρμογές θα μπορούσαμε να τις κατατάξουμε σε τρεις κατηγορίες: τις βραχυπρόθεσμες, τις μεσοπρόθεσμες και τις μακροπρόθεσμες.



Εικόνα 1.14. Οι τομείς της THz έρευνας

Οι βραχυπρόθεσμες περιλαμβάνουν εφαρμογές που ήδη χρησιμοποιούν την THz τεχνολογία και βρίσκονται πλέον στην διαδικασία της βελτιστοποίησης τους, μεσοπρόθεσμες αποκαλούμε τις εφαρμογές των οποίων η ορθή λειτουργία έχει ήδη αποδειχθεί και βρίσκονται στο στάδιο μετακίνησης και δοκιμής τους και εκτός του εργαστηριακού περιβάλλοντος μέσα στα επόμενα 3-5 χρόνια. Μακροπρόθεσμες τώρα, αποκαλούμαι αυτές που έχουν χαρακτηριστεί ως εφικτές αλλά εξακολουθούν να παρουσιάζουν περιορισμούς και προβλήματα λειτουργίας. Παράδειγμα βραχυπρόθεσμης εφαρμογής είναι αυτές που αφορούν τη φασματοσκόπηση, ενώ ένα παράδειγμα μεσοπρόθεσμων αυτές που αφορούν την ανίχνευση και ταυτοποίηση μέσω απεικόνισης από μεγάλη απόσταση. Οι εφαρμογές που αφορούν τη βιολογία και τον ιατρικό τομέα ανήκουν στην Τρίτη κατηγορία, στις μακροπρόθεσμες. Η εκτίμηση μας για τα πιο ελπιδοφόρα σχέδια κι εφαρμογές περιλαμβάνει:

- Όργανα THz ανίχνευσης και απεικόνισης
- THz κάμερα και φασματόμετρο
- Απεικόνιση και ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο
- Βιοϊατρικές εφαρμογές

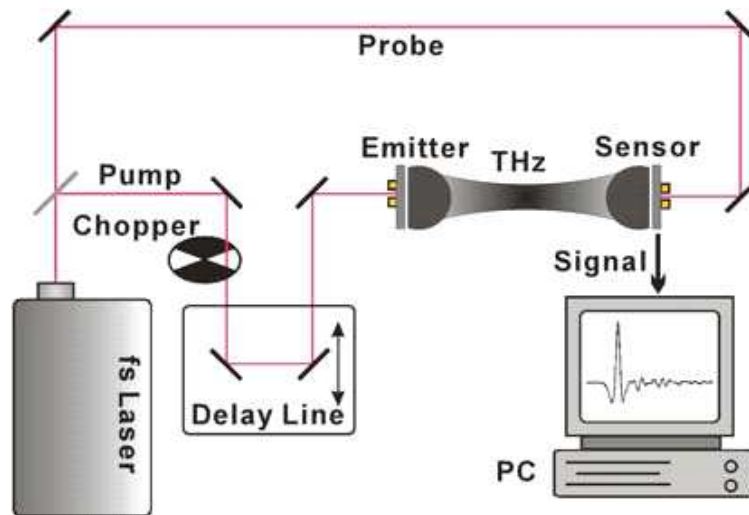
Το κύριο πρόβλημα που έχουν να αντιμετωπίσουν οι εφαρμογές στην βιοιατρική είναι η υψηλή περιεκτικότητα των δειγμάτων σε νερό πράγμα που κάνει αρκετά δύσκολη την εφαρμογή THz ακτινοβολίας για τον έλεγχο λειτουργίας των εξεταζόμενων οργάνων και ιστών.

## Κεφάλαιο 2

### Παραγωγή και ανίχνευση των κυμάτων THz

Προτού συζητήσουμε τη φύση και τις εφαρμογές των THz κυμάτων, θα ήταν χρήσιμο να κάνουμε μια εισαγωγή στον τρόπο παραγωγής και ανίχνευσης τους. Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, το βιβλίο αυτό είναι εστιασμένο στις παλμικές THz τεχνολογίες. Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής και ανίχνευσης μιας κυματομορφής THz παλμών είναι η διάταξη ενός ανιχνευτή (probe) και μιας “αντλίας” (pump), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Ο συνηθέστερος τρόπος με τον οποίο υλοποιούνται αυτού του είδους παλμικά συστήματα είναι μέσω του διαχωρισμού μιας δέσμης από ένα femtosecond (fs) laser σε δύο νέες δέσμες: την δέσμη “άντλησης” (pump beam) και τη δέσμη “ανίχνευσης” (probe beam). Η δέσμη “άντλησης” χρησιμοποιείται για την παραγωγή του THz παλμού, ενώ η δέσμη ανίχνευσης χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία και την ανάκτηση του προφίλ του παλμού. Η ανίχνευση του THz πεδίου επιτυγχάνεται είτε μέσω της διαμόρφωσης του παλμού ανίχνευσης από το εκπεμπόμενο THz πεδίο είτε μέσω της επιτάχυνσης ελεύθερων φορέων, που εμφανίζονται εξαιτίας του παλμού ανίχνευσης, λόγω της ύπαρξης του THz πεδίου. Μια μηχανική γραμμή χρονικής καθυστέρησης χρησιμοποιείται για να μεταβάλλει τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ παραγόμενου παλμού THz και του παλμού ανίχνευσης. Με αυτό τον τρόπο η THz κυματομορφή εξάγεται μέσω της σάρωσης αυτής της χρονοκαθυστέρησης. Για να αυξηθεί η ευαισθησία της ανίχνευσης, η δέσμη “άντλησης” διαμορφώνεται από έναν οπτικό chopper και η επαγόμενη THz διαμόρφωση στη δέσμη ανίχνευσης εξάγεται από ένα lock-in ενισχυτή. Αυτή η πληροφορία παλμού που αποκτάται στο πεδίο του χρόνου μετασχηματίζεται μέσω μετασχηματισμού Fourier στο πεδίο της συχνότητας, από όπου μπορούμε να αντλήσουμε φασματική πληροφορία.





Σχήμα. 2.1. Διάταξη παραγωγής και ανίχνευσης παλμικού THz κύματος

## Φωτοαγώγιμη κεραία(Photoconductive Antenna)

Η φωτοαγώγιμη (PC) κεραία είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα εξαρτήματα τόσο για την παραγωγή THz ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όσο και για την ανίχνευσή του. Παράγει και ανιχνεύει παλμούς THz μέσω παροδικών φωτομεταφορέων που επάγονται από υπέρταχες (ultrafast) παλμούς laser. Το Σχήμα 2.2 δίνει μια αναπαράσταση της PC κεραίας και του τρόπου χρήσης της για την παραγωγή THz παλμών. Μια PC κεραία αποτελείται από δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια τοποθετημένα πάνω σε ένα ημιμονωτικό υπόστρωμα ημιαγωγού με ένα διάκενο ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια. Για την παραγωγή THz παλμών εφαρμόζεται τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Εφόσον το υπόστρωμα είναι ημιμονωτικό, ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στην περιοχή του διακένου μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Προσπίπτοντες υπέρβραχες παλμοί από laser ενεργούν σαν παροδικοί διακόπτες, οι οποίοι “ανοίγουν” αυτή τη “δεξαμενή” ηλεκτρικής ενέργειας και απελευθερώνουν μέρος της με τη μορφή THz παλμών. Το ακτινοβολούμενο THz κύμα είναι πολωμένο παράλληλα με το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται στη περιοχή του διακένου, το οποίο είναι κάθετο στις δύο ταινίες-ηλεκτρόδια. Η πόλωση του THz κύματος μπορεί να αλλάξει αν μεταβληθεί και η πόλωση του ηλεκτρικού πεδίου από το οποίο αντλεί την ενέργεια του. Για να είναι δυνατή αυτή η διαδικασία, οι προσπίπτοντες παλμοί από το laser πρέπει να έχουν επαρκή ενέργεια φωτονίων ώστε να παράγουν φωτοεπαγόμενους ελεύθερους φορείς στο υπόστρωμα. Ορισμένες φορές μπορεί να

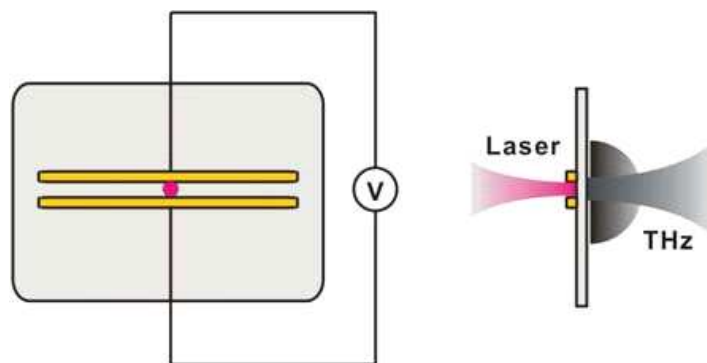
χρησιμοποιηθεί πολυφωτονική απορρόφηση και τότε και ένα laser διέγερσης με χαμηλότερη ενέργεια φωτονίου μπορεί να παράξει ελεύθερους μεταφορείς. Οι ελεύθεροι φορείς ωθούνται λόγω του ηλεκτρικού πεδίου πόλωσης προς το πέρας του διακένου, παράγοντας με αυτό το τρόπο ένα φωτόρευμα. Η πυκνότητα ρεύματος περιγράφεται ως:

$$J(t) = N(t)e\mu E_b, \quad (1)$$

όπου  $N$  είναι η πυκνότητα των φωτομεταφορέων,  $e$  το στοιχειώδες φορτίο,  $\mu$  η κινητικότητα του ηλεκτρονίου και  $E_b$  είναι το ηλεκτρικό πεδίο πόλωσης. Η πυκνότητα του φωτομεταφορέα  $N$  είναι συνάρτηση του χρόνου, και η μορφή της καθορίζεται από το σχήμα του παλμού laser και τη μέση διάρκεια ζωής του φορέα. Εφόσον το φωτόρευμα μεταβάλλεται χρονικά, παράγει ηλεκτρομαγνητικό παλμό, το ηλεκτρικό πεδίο του οποίου είναι κατά προσέγγιση

$$E_{THz} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{A}{c^2 z} \frac{\partial J(t)}{\partial t} = \frac{Ae}{4\pi\epsilon_0 c^2 z} \frac{\partial N(t)}{\partial t} \mu E_b, \quad (2)$$

όπου  $A$  είναι η περιοχή του διάκενου που φωτίζεται από τη δέσμη του laser,  $\epsilon_0$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού,  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και  $z$  η απόσταση ανάμεσα στο παρατηρούμενο σημείο και την πηγή THz ακτινοβολίας. Για να καταλήξουμε στην εξίσωση (2), θεωρήσαμε ότι το παρατηρούμενο σημείο βρίσκεται τοποθετημένο σε επίπεδο κάθετο σε σχέση με την PC κεραία και ότι η απόσταση ανάμεσα στο παρατηρούμενο σημείο και την πηγή είναι πολύ μεγαλύτερη από τις διαστάσεις της PC κεραίας.



Σχήμα. 2.2. PC κεραία και εκπομπή THz ακτινοβολίας από PC κεραία

Η ενέργεια του THz παλμού προέρχεται από την ηλεκτρική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στο διάκενο και όχι από την ενέργεια του οπτικού παλμού. Κατ' αρχήν, η ενέργεια του παλμού της THz ακτινοβολίας δεν περιορίζεται από την ενέργεια του παλμού διέγερσης του laser και είναι πιθανή κβαντική απόδοση για τη μετατροπή από οπτική ενέργεια σε ενέργεια THz μεγαλύτερη από τη μονάδα. Ωστόσο, ενέργεια του παλμού της THz ακτινοβολίας σχετίζεται άμεσα με την ενέργεια του παλμού διέγερσης του laser. Για την ακρίβεια, η διέγερση λειτουργεί σαν “σκανδάλη” για την απελευθέρωση της αποθηκευμένης ενέργειας σε THz ακτινοβολία. Όσο περισσότεροι φωτοφορείς παράγονται, τόσο μεγαλύτερο ποσό αποθηκευμένης ενέργειας μετατρέπεται σε THz ακτινοβολία. Κάτω από συνθήκες ασθενούς διέγερσης, η ενέργεια του παλμού του THz κύματος είναι ανάλογη της ενέργειας του παλμού διέγερσης του laser. Στην πραγματικότητα, γραμμικές σχέσεις μεταξύ του πεδίου πόλωσης και του THz πεδίου, όπως και μεταξύ της ενέργειας του παλμού διέγερσης και του THz πεδίου, είναι αληθείς μόνο στην περίπτωση ασθενούς διέγερσης και ασθενούς πεδίου πόλωσης. Όταν το υπόστρωμα της PC κεραίας διεγείρεται, δεν λειτουργεί πια σαν ημι-μονωτικό υλικό, αλλά είναι πλέον ένα αγωγίμο μέσο. Ως αποτέλεσμα, το επαγόμενο πεδίο υπερκαλύπτει το πεδίο πόλωσης και ο υπολογισμός του φωτορεύματος μεταβάλλεται από την εξίσωση (1):

$$J(t) = \frac{\sigma(t)E_b}{\frac{\sigma(t)\eta_0}{1+n} + 1}, \quad (3)$$

όπου  $\sigma$  είναι η αγωγιμότητα του υποστρώματος,  $\eta_0$  η χαρακτηριστική αντίσταση του αέρα, η οποία είναι  $\eta_0 = 377 \Omega$ , και  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του υποστρώματος. Η αγωγιμότητα του υποστρώματος  $\sigma$  εξαρτάται από τη διέγερση του laser και μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της έντασης της διέγερσης του laser  $\sigma \propto I_0$ , όπου  $I_0$  είναι η ισχύς του laser. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2) και (3) το THz πεδίο είναι:

$$E_{THz} \propto \frac{d\sigma(t)}{dt} \frac{1}{\left[1 + \frac{\sigma(t)\eta_0}{1+n}\right]^2} \propto \frac{I_0}{(1 + kI_0)^2} \quad (4)$$

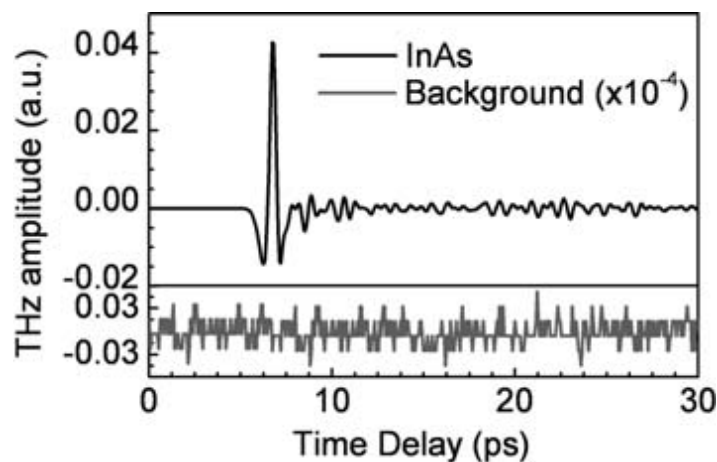
Εδώ  $k = \kappa(t)\eta\theta / (1 + n)$ , όπου  $\kappa(t)$  ορίζεται ως ο λόγος του  $\sigma(t)$  προς το  $I_0$ . Η εξίσωση (4) δείχνει ότι όταν η διέγερση από το laser είναι αρκετά ισχυρή, η σύνθετη αντίσταση του υποστρώματος γίνεται συγκρίσιμη με τη χαρακτηριστική αντίσταση του αέρα και η περαιτέρω αύξηση της έντασης της διέγερσης δεν σημαίνει αύξηση του THz πεδίου-το THz πεδίο υπόκειται κορεσμό ως προς την ισχύ διέγερσης από το laser.

Περιορισμοί υπάρχουν επίσης και για την αύξηση της έντασης του πεδίου πόλωσης, αφού ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει διάσπαση διηλεκτρικού στο υπόστρωμα. Οι πιθανές βλάβες μιας PC κεραίας όταν αυτή χρησιμοποιείται για παραγωγή THz κυμάτων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: βλάβες που οφείλονται στο πεδίο πόλωσης και θερμικές βλάβες. Οι βλάβες που οφείλονται στο πεδίο συμβαίνουν όταν το εφαρμοζόμενο πεδίο πόλωσης έχει ένταση μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στη διηλεκτρική αντοχή του ημιαγωγικού υλικού, π.χ.  $4 \times 10^5$  V/cm για GaAs. Αυτό συνήθως συμβαίνει στιγμιαία σαν φαινόμενο χιονοστιβάδας. Οι θερμικές βλάβες οφείλονται στην θέρμανση του υποστρώματος εξαιτίας της ροής φωτορεύματος διαμέσου του αλλά και εξαιτίας της απορρόφησης φωτονίων από την διέγερση του laser. Η αύξηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος μειώνει την αντίσταση του, πράγμα που οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη ροή ρεύματος. Η θερμική βλάβη είναι σχετικά αργή διαδικασία και η εκδήλωση της συνήθως διαρκεί από δευτερόλεπτα μέχρι ακόμα και λεπτά. Οι περισσότερες βλάβες σε PC κεραίες όταν αυτές χρησιμοποιούνται για παραγωγή THz κυμάτων είναι θερμικές βλάβες, εκτός από τις περιπτώσεις όπου το διάκενο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι πολύ μικρό ή το πεδίο πόλωσης πολύ ισχυρό. Οι θερμικές βλάβες των PC κεραίων ορίζουν ένα κατώφλι απόφασης-tradeoff μεταξύ της έντασης της διέγερσης από το laser και της μέγιστης εφαρμοζόμενης τάσης στα δύο ηλεκτρόδια, δηλαδή του μέγιστου πεδίου πόλωσης. Μια κατάλληλη μεταχείριση ή επικάλυψη της επιφάνειας του υποστρώματος θα μπορούσε να αυξήσει τη διηλεκτρική αντοχή του, ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα παραγωγής THz κυμάτων από την PC κεραία. Η χρήση της PC κεραίας ως ανιχνευτή THz ακτινοβολίας είναι αρκετά όμοια με τη χρήση της ως πομπού της ακτινοβολίας αυτής. Η μόνη ουσιώδης διαφορά τους είναι ότι όταν χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής, τα δύο ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα σε έναν αισθητήρα ρεύματος ενώ όταν χρησιμοποιείται ως εκπομπός είναι συνδεδεμένα σε ένα τροφοδοτικό. Στο σύστημα παραγωγής και ανίχνευσης THz ακτινοβολίας που

παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1, ελέγχοντας τη χρονοκαθυστέρηση ανάμεσα στον THz παλμό και τον οπτικό παλμό ανίχνευσης, το ηλεκτρικό πεδίο στον αγωγό της PC κεραίας, σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο, μπορεί να δειγματοληφθεί από τον οπτικό παλμό ανίχνευσης ο οποίος παράγει παροδικούς φωτομεταφορείς στο υπόστρωμα τη συγκεκριμένη εκείνη χρονική στιγμή. Εφόσον οι THz παλμοί και οι παλμοί Laser παραμένουν για μια ορισμένη χρονική καθυστέρηση, οι φωτομεταφορείς βρίσκονται σε ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο από το οποίο οδηγούνται στη δημιουργία ρεύματος ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια. Το ρεύμα αυτό που δημιουργήθηκε στο THz πεδίο είναι:

$$\bar{J} = \bar{N}e\mu E(\tau). \quad (5)$$

Εδώ το ορίζει την μέση πυκνότητα ηλεκτρονίων, και το  $\tau$  είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ του παλμού ανίχνευσης και το THz παλμού. Εάν σαρώσουμε τη χρονική καθυστέρηση, καταγράφουμε την κυματομορφή του THz παλμού σαν μια συνάρτηση του  $\tau$ . Στο Σχήμα 2.3. φαίνεται μια τυπική κυματομορφή ενός THz παλμού. Η περίοδος της THz ταλάντωσης είναι περίπου 1 ps, και οι τυπικοί THz παλμοί είναι ένας υπο-κύκλος σε ορισμένους κύκλους ταλάντωσης. Όπως φαίνεται στην εξίσωση (5), η ανίχνευση THz παλμών καταγράφει άμεσα το πεδίο και όχι την ισχύ του. Η μέτρηση καταγράφει τόσο το εύρος όσο και πληροφορίες φάσης του THz παλμού, ενώ το τελευταίο είναι αρκετά δύσκολο να μετρηθεί άμεσα στην οπτική.



Σχήμα 2.3. Χρονική κυματομορφή THz παλμού

Η αποδοτικότητα μιας PC κεραίας εξαρτάται κυρίως από τους εξής παράγοντες: το υλικό του υποστρώματος, τη γεωμετρία της ενεργούς περιοχής, τη γεωμετρία της κεραίας και τον παλμό του laser διέγερσης. Υλικά που έχουν μικρή διάρκειας ζωής ως φορείς, όπως τα LT-GaAs ή το εμπλουτισμένο πυρίτιο, επιλέγονται συνήθως ως υποστρώματα προκειμένου να αυξήσουν την ταχύτητα απόκρισης της PC κεραίας. Η ταχύτητα απόκρισης είναι απαραίτητη για την παραγωγή και ανίχνευση THz παλμών που περιέχουν συνιστώσες υψηλής συχνότητας. Η μεγαλύτερη κινητικότητα του φορέα είναι επίσης ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό καθώς έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή απόδοση της παραγωγής THz κύματος. Απαιτείται επίσης υψηλή αντίσταση σκότους του υποστρώματος προκειμένου να έχει επαρκή τάση διάσπασης στην κεραία. Η ενεργή περιοχή της PC κεραίας, δηλαδή το διάκενο με διέγερση laser, είναι επίσης μια κρίσιμη παράμετρος της PC κεραίας καθώς είναι αυτή η ενεργή περιοχή που θα παράξει τα THz κύματα. Η προσεκτική σχεδίαση της κατανομής του πεδίου στο διάκενο μπορεί να αυξήσει το πεδίο διάσπασης και να επιτρέψει στην PC κεραία να παράξει πιο ισχυρούς THz παλμούς. Η κατανομή του φωτός διέγερσης μέσα στο διάκενο είναι επίσης σημαντική. Θα μπορούσαμε να υποστηρίξουμε ότι η συγκέντρωση της ακτίνας διέγερσης κοντά στην άνοδο, όπου το ηλεκτρικό δυναμικό παρουσιάζει τη μεγαλύτερη κλίση, οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή THz κυμάτων. Θα μπορούσαμε να πούμε ακόμη ότι η συγκέντρωση της ακτίνας διέγερσης στην υψηλότερη περιοχή του πεδίου μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερη τάση διάσπασης. PC κεραίες με μικρότερα διάκενα είναι πιο ευαίσθητες, ειδικά όταν χρησιμοποιείται χαμηλή ισχύς διέγερσης. Ωστόσο, μεγαλύτερα διάκενα επιτρέπουν τη χρήση μεγαλύτερης ισχύος διέγερσης και τάσης πόλωσης στην PC κεραία και άρα την παραγωγή πιο ισχυρών THz κυμάτων. Μεγαλύτερη ενεργή περιοχή επίσης μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του φαινομένου υπερκάλυψης του πεδίου. Το σχήμα της κεραίας είναι σημαντικό για τη βελτιστοποίηση της σύζευξης των THz κυμάτων ανάμεσα στη συσκευή και τον ελεύθερο χώρο. Όσον αφορά την απόκριση συχνότητας, οι διάφορες κεραίες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: κεραίες συντονισμού και μη συντονιστικές (κεραίες ευρείας ζώνης) κεραίες. Οι κεραίες της πρώτης κατηγορίας έχουν συχνότητα συντονισμού και ακτινοβολούν THz κύματα γύρω από μια ορισμένη κεντρική συχνότητα. Η διπολική κεραία είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη κεραία συντονισμού που εκπέμπει THz κύμα με κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda_n = 2L/m$ . Εδώ  $\lambda_n$  είναι το μήκος κύματος στο υπόστρωμα. Το μήκος κύματος απόκρισης στον ελεύθερο χώρο είναι  $\lambda = \lambda_n \times n$ , όπου  $n$  είναι ο δείκτης

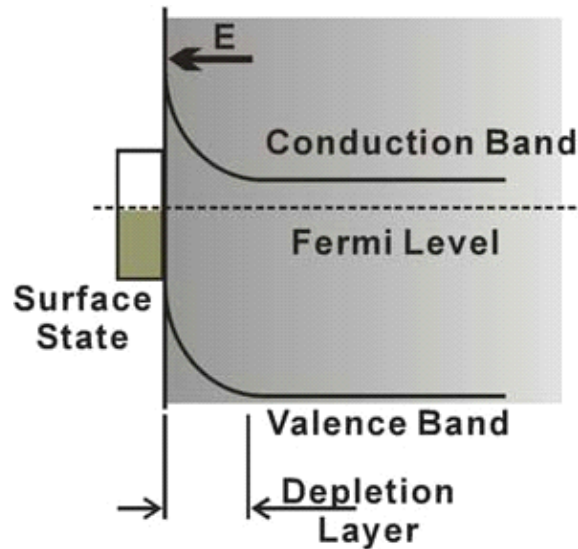
διάθλασης του υποστρώματος.  $L$  είναι το πλάτος της κεραίας από τη μια πλευρά της ανόδου στην άλλη πλευρά της καθόδου.  $m$  μπορεί να είναι οποιοσδήποτε θετικός ακέραιος αριθμός. Μια μη συντονιστική κεραία έχει μεταβλητό πλάτος και οδηγεί σε μεγαλύτερου εύρους απόκριση συχνότητας. Οι γεωμετρίες των μη συντονιστικών κεραίων περιλαμβάνουν σπιράλ, "παπιγιόν" (bowtie) και λογαριθμικές περιοδικές κεραίες. Οπτικές διατάξεις, όπως υπερημισφαιρικοί φακοί πυριτίου, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση του συντελεστή σύζευξης.

Οι PC κεραίες δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την παραγωγή και ανίχνευση THz παλμών. Παρόμοια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή και ανίχνευση CW (Continuous wave) THz κυμάτων. Σε ένα τέτοιο σύστημα δυο CW laser ακτίνες με διαφορετικές συχνότητες φωτίζουν στο ίδιο σημείο στην PC κεραία. Η σύγκρουση μεταξύ των δυο αυτών ακτίνων laser έχει σαν αποτέλεσμα την ταλάντωση της ισχύος του laser στο επικαλυπτόμενο σημείο. Περαιτέρω αυτό δημιουργεί ταλάντωση του φωτορεύματος που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η PC κεραία λειτουργεί εδώ ως μίκτης συχνότητας, και δημιουργείται στενής ζώνης CW THz κύμα όταν η συχνότητα σύγκρουσης βρίσκεται στην THz φασματική περιοχή.

## **Ενσωματωμένο πεδίο στον ημιαγωγό**

Οι καταστάσεις της επιφάνειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένους ημιαγωγούς, όπως τους GaAs, για την παραγωγή THz ακτινοβολίας. Το επίπεδο Fermi μιας κατάστασης επιφάνειας μπορεί να είναι διαφορετικό από ότι του χύδην (bulk) υλικού. Η διαφορά αυτή των επιπέδων Fermi προκαλεί κάμψη των ενεργειακών ζωνών ακριβώς κάτω από την επιφάνεια. Το ενσωματωμένο πεδίο επιφάνειας σχηματίζεται από αυτή την περιοχή κάμψης. Το Σχήμα 2.4. παρουσιάζει τη κάμψη των ενεργειακών ζωνών και το πεδίο επιφάνειας σε ένα πλακίδιο (wafer) ημιαγωγού τύπου-n GaAs. Το επίπεδο Fermi του τύπου-n GaAs είναι κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας και επομένως είναι υψηλότερο από το επίπεδο Fermi της κατάστασης επιφάνειας που βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο του ενεργειακού διακένου. Το επίπεδο επιφάνειας ωθεί ελεύθερα ηλεκτρόνια που παρασύρονται προς το εσωτερικό του χύδην υλικού. Σαν αποτέλεσμα, η πυκνότητα ελευθέρων ηλεκτρονίων σε αυτό το

στρώμα με πεδίο επιφάνειας είναι πολύ χαμηλότερη από το χύδην υλικό, και για το λόγο αυτό αποκαλείται στρώμα απογύμνωσης (depletion area).



Σχήμα . 2.4. Σχηματική παράσταση της κάμψης των ενεργειακών ζωνών και του πεδίου επιφάνειας ενός πλακιδίου ημιαγωγού τύπου-n GaAs

Χωρίς διέγερση, φτάνουμε σε μια ισορροπία ανάμεσα στη μετατόπιση και τη διάχυση των ελεύθερων φορέων στον ημιαγωγό, συμπεριλαμβανομένης της περιοχής απογύμνωσης. Για το λόγο αυτό παρατηρείται κίνηση καθαρού φορτίου σε μακροκλίμακα. Όταν απορροφάται ένας παλμός laser στο στρώμα κατάλυσης, τα φωτοεπαγόμενα ζεύγη οπών ηλεκτρονίων επιταχύνονται από το υπάρχον ηλεκτρικό πεδίο, όπως ακριβώς συμβαίνει σε μια PC κεραία. Σε έναν ημιαγωγό τύπου- n GaAs, λόγου χάρη, ηλεκτρόνια οδηγούνται προς το εσωτερικό του πλακιδίου του ημιαγωγού ενώ οι οπές οδηγούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ταλαντώσεις διπόλου λαμβάνουν χώρα μέχρι να επιτευχθεί μια νέα ισορροπία. THz ακτινοβολία μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας ακτινοβολία διπόλου

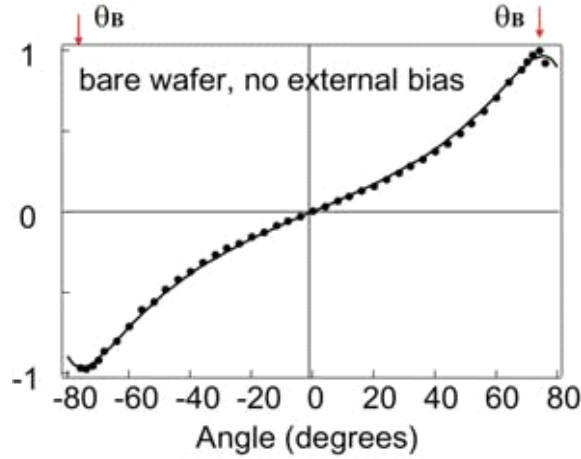
$$E_{THz} \propto \frac{\partial N(t)}{\partial t} e\mu E_s \sin \theta, \quad (6)$$

όπου  $E_s$  είναι το ενσωματωμένο πεδίο επιφάνειας και  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της ακτινοβολίας και της κάθετης της ταλάντωσης διπόλου, που είναι κάθετο στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Το πεδίο επιφάνειας ενός πλακιδίου ημιαγωγού τύπου-p GaAs δείχνει στην αντίθετη κατεύθυνση απ' ότι ένα πλακίδιο ημιαγωγού τύπου-n, οπότε οι THz παλμοί που παράγονται από ένα πλακίδιο



ημιαγωγού τύπου-p GaAs έχουν αντίστροφη πόλωση σε σύγκριση με αυτούς που παράγονται από ένα πλακίδιο ημιαγωγού τύπου-n. Η εξίσωση (6) μας δείχνει ότι η ακτινοβολία έχει μια ανομοιόμορφη γωνιακή κατανομή με τη μέγιστη γωνία ακτινοβολίας να είναι παράλληλη με την επιφάνεια του πλακιδίου ημιαγωγού. Η γωνιακή αυτή κατανομή δεν ευνοεί την παραγωγή THz κύματος, ιδιαίτερα λόγω του υψηλού δείκτη διάθλασης της επιφάνειας του ημιαγωγού. Για παράδειγμα, ο δείκτης διάθλασης του GaAs είναι 3.6 για THz κύματα, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλα τμήματα της παραγόμενης THz ακτινοβολίας να μην μπορούν να συζευχθούν στον ελεύθερο χώρο χωρίς κάποιον επιπλέον συζεύκτη όπως φακό δείκτη διάθλασης ή πρίσμα, λόγω της συνολικής εσωτερικής ανάκλασης.

Εάν το πλακίδιο ημιαγωγού φωτίζεται από μια ακτίνα laser και η περιοχή που φωτίζεται είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος THz κύματος, η παρεμβολή οδηγεί τα THz κύματα προς την ίδια κατεύθυνση όπου η οπτική ακτίνα διαδίδεται και ανακλάται από την επιφάνεια του ημιαγωγού. Σύμφωνα με την εξίσωση (6) ο μηχανισμός THz ακτινοβολία είναι περισσότερο αποδοτικός όταν η γωνία πρόσπτωσης της οπτικής δέσμης είναι μεγαλύτερη. Το Σχήμα 2.5 παρουσιάζει το πλάτος της THz ακτινοβολίας σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης της οπτικής δέσμης. Η ακτινοβολία μέγιστου πλάτους επιτυγχάνεται όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι κοντά στη γωνία Brewster. Μεγαλύτερη γωνία δεν έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγική αποδοτικότητα λόγω των απωλειών Fresnel. Παρόλο που μια μεγάλη γωνία πρόσπτωσης βελτιώνει το συντελεστή σύζευξης της THz ακτινοβολίας από την επιφάνεια του ημιαγωγού, δεδομένου ότι οι ημιαγωγοί έχουν συνήθως υψηλό δείκτη ανάκλασης, η πραγματική γωνία σε σχέση με την κάθετη της ταλάντωσης διπόλου είναι πολύ μικρή. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται GaAs η μέγιστη  $\theta$  είναι μόνο  $16^\circ$  ακόμα και στην πρόσπτωση, πράγμα που μας δίνει αποδοτικότητα σύζευξης λιγότερη από 30%. Όταν τοποθετείται ένα μαγνητικό πεδίο παράλληλα με την επιφάνεια του ημιαγωγού, η κίνηση των φορέων κάμπτεται από το μαγνητικό πεδίο και ο συντελεστής σύζευξης μειώνεται δραματικά.



Σχήμα 2.5 Πλάτος THz ακτινοβολίας που παράγεται από πεδίο επιφάνειας ημιαγωγού σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης της ακτίνας διέγερσης. Η ακτίνα διέγερσης είναι  $p$  πολωμένη.

Σύμφωνα με την εξίσωση (6), το THz πεδίο είναι γραμμικά ανάλογο με το ενσωματωμένο πεδίο. Η αύξηση του ενσωματωμένου πεδίου οδηγεί σε ισχυρότερη παραγωγή THz κύματος. Η αύξηση του πεδίου επιφάνειας γίνεται είτε με την αύξηση της διαφοράς του επιπέδου Fermi μεταξύ της κατάστασης επιφάνειας και της χύδην κατάστασης, είτε με τη μείωση του πάχους του στρώματος απογύμνωσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ανάπτυξη ενός πολύ λεπτού στρώματος μεμβράνης χαμηλής θερμοκρασίας GaAs (LT- GaAs) σε πλακίδιο ημιαγωγού τύπου-n GaAs. Καθώς η μεμβράνη LT- GaAs έχει πολύ μεγάλη πυκνότητα ελαττωματικής (defect state) κατάστασης, το επίπεδο Fermi του χύδην GaAs “καρφισώνεται” (is pinned) στην ελαττωματική κατάσταση, η οποία βρίσκεται κοντά στο κέντρο του ενεργειακού διακένου. Εάν το LT- GaAs είναι εμπλουτισμένο με βόριο, τα ιόντα βορίου χαμηλώνουν το επίπεδο Fermi στην ατελή κατάσταση και άρα αυξάνουν το πεδίο επιφάνειας. Η αλλαγή του επιπέδου Fermi στην ατελή κατάσταση είναι

$$E_F - E_d = kT \ln \left\{ \frac{\exp(w/kT) - \exp(fw/kT)}{g [\exp(fw/kT) - 1]} \right\}, \quad (7)$$

όπου  $E_F$  και  $E_d$  είναι το επίπεδο Fermi και ο πυθμένας της ατελούς κατάστασης αντίστοιχα,  $k$  είναι η σταθερά Boltzmann,  $w$  είναι το πλάτος της ατελούς φασματικής περιοχής, η  $f$  δείχνει την πιθανότητα ιονισμού του δότη βάθους και  $g$  είναι ένας παράγοντας εκφυλισμού. Ο εμπλουτισμός βορίου του LT- GaAs μπορεί να αυξήσει

τη διαφορά του επιπέδου επιφάνειας από 0.65 σε 0.75 eV και να ενισχύσει την ακτινοβολία THz κυμάτων.

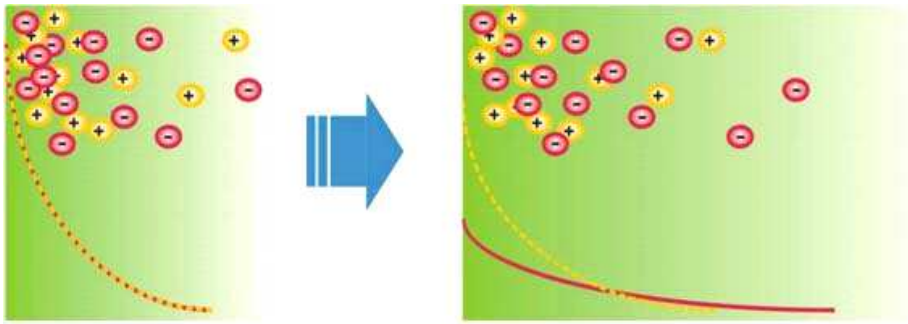
Ενσωματωμένα πεδία δεν βρίσκονται μόνο στην επιφάνεια πλακιδίων ημιαγωγού αλλά και στα σύνορα μεταξύ διαφορετικών στρωμάτων υλικών, ιδιαίτερα εάν υπάρχουν ισχυρά ενσωματωμένα πεδία στις συνδέσεις. Ερευνώντας την ακτινοβολία THz κύματος από ενσωματωμένα πεδία σε ένα ημιαγωγικό υλικό μπορούμε να μελετήσουμε τις ιδιότητες του υλικού.

## **Το φαινόμενο photo- Dember**

Ακόμη και αν δεν υπάρχει ενσωματωμένο πεδίο ή αυτό είναι πολύ αδύναμο, ημιαγωγικά υλικά διέγερσης με ultrafast laser παλμούς μπορούν να παράξουν THz παλμούς μέσω του φαινομένου photo- Dember (φωτο-Dember). Το σχήμα 2.6 παρουσιάζει τη γενική ιδέα του φαινομένου photo- Dember. Όταν ένας παλμός laser με ενέργεια φωτονίου μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο φωτίζει ένα πλακίδιο ημιαγωγού, παράγονται ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων οπών λόγω της απορρόφησης φωτονίων laser. Η ακτίνα laser απορροφάται έντονα από ημιαγωγικό υλικό, και έτσι τα φωτοεπαγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων οπών έχουν πολύ ανομοιογενή κατανομή κοντά στην επιφάνεια. Η ασύμμετρη κατανομή προκαλεί τη διάχυση των ηλεκτρονίων και οπών προς το εσωτερικό όπου η ταχύτητα διάχυσης είναι

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} \quad , (8)$$

όπου  $z$  είναι το σύστημα συντεταγμένων προς το εσωτερικό του ημιαγωγού,  $D$  είναι η σταθερά διάχυσης, η οποία βρίσκεται από τη σχέση του Αϊνστάιν  $D = k_B T \mu$ . Δεδομένου ότι τα ηλεκτρόνια έχουν υψηλότερη κινητικότητα από τις οπές, διαχέονται πιο εύκολα από αυτές. Η διαφορά στην ταχύτητα διάχυσης ανάμεσα στα ηλεκτρόνια και τις οπές οδηγεί σε έναν διαχωρισμό φορτίου στον ημιαγωγό και παράγει ένα περιοδικό photo- Dember πεδίο. Η εκπομπή του πεδίου αυτού παράγει THz ακτινοβολία.



Σχήμα. 2.6 Το φαινόμενο Photo- Dember σε επιφάνεια InAs

Λόγω της υψηλής κινητικότητας ηλεκτρονίων, το InAs θεωρείται ένας υποσχόμενος πομπός THz ακτινοβολίας ανάμεσα σε άλλους ημιαγωγούς στενού ενεργειακού διακένου. Σύμφωνα με τη συζήτηση στο προηγούμενο τμήμα, το THz κύμα που παράγεται από τύπου-n και τύπου-p GaAs πλακίδια ημιαγωγού θα πρέπει να έχει αντίθετη πολικότητα. Η πρόβλεψη αυτή έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται InAs για την παραγωγή THz παλμών, οι InAs τόσο τύπου-n όσο και τύπου-p παράγουν THz παλμούς με την ίδια πολικότητα. Η πολικότητα και για τα δυο υλικά είναι ίδια με αυτή που παράγεται από ένα πλακίδιο ημιαγωγού τύπου-n GaAs. Το φαινόμενο αυτό είναι δύσκολο να εξηγηθεί από την παραγωγή THz κυμάτων μέσω πεδίου επιφάνειας ενώ είναι σύμφωνο με την πρόβλεψη που δίνεται από το φαινόμενο photo- Dember. Στην πραγματικότητα, συναντάμε τόσο την επιτάχυνση πεδίου επιφάνειας όσο και το φαινόμενο photo-Dember όταν ultrafast laser παλμοί διεγείρουν την επιφάνεια του ημιαγωγού. Το ποιος μηχανισμός θα κυριαρχήσει στην παραγωγή THz κυμάτων θα εξαρτηθεί από τις ιδιότητες του παλμού διέγερσης laser και του υλικού του ημιαγωγού. Στον πίνακα 2.1 συγκρίνονται οι ιδιότητες των InAs και GaAs. Οι ακόλουθοι παράγοντες κάνουν την παραγωγή THz κυμάτων από InAs και GaAs μέσω διαφορετικών μηχανισμών. Κατά πρώτον, ο GaAs έχει μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο από τον InAs και έτσι έχει μεγαλύτερο πεδίο επιφάνειας. Το μεγαλύτερο πεδίο επιφάνειας ευνοεί περισσότερο την παραγωγή THz κυμάτων μέσω του φωτορεύματος παραγόμενου από πεδίο επιφάνειας. Κατά δεύτερον, ο InAs έχει μεγαλύτερη απορρόφηση του φωτός διέγερσης από τον GaAs, με αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερη κλίση στην κατανομή φωτομεταφορέων. Και τέλος, εφόσον ο InAs έχει χαμηλότερο ενεργειακό διάκενο, τα

ελεύθερα ηλεκτρόνια έχουν ενεργειακό υπόλλειμα αφού έχουν διεγερθεί, πράγμα που οδηγεί σε υψηλότερη θερμοκρασία των φορέων. Οι τελευταίοι δυο παράγοντες προσδίδουν στον InAs ισχυρότερες ιδιότητες του φαινομένου photo- Dember απ' ότι στον GaAs.

**Πίνακας 2.1** Σύγκριση ιδιοτήτων των GaAs και InAs

	Διάκενο φασματικής περιοχής (eV)	Κινητικότητα ηλεκτρονίων (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	Βάθος απορρόφησης ζ (nm)	Ενεργειακό κατάλοιπο (eV)
GaAs	1.43	8,500	1,000	0.05
InAs	0.35	40,000	150	0.5

Όταν λαμβάνονται υπόψη οι δυναμικές της οπτικής διέγερσης και του εμπλουτισμού (doping) η εξίσωση (8) μπορεί να διαμορφωθεί περαιτέρω στην (5)

$$\frac{\partial N_i(z,t)}{\partial t} = G(z,t) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_i(z,t) \frac{\partial N_i(z,t)}{\partial z} \right) \pm \frac{\partial}{\partial z} [\mu_i(z,t) E(z,t) N_i(z,t)], \quad (9)$$

όπου  $N_i$  είναι η πυκνότητα φορέων  $i=e,h$  (ηλεκτρόνια ή οπές). Το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  μπορούμε να το βρούμε από την εξίσωση Maxwell

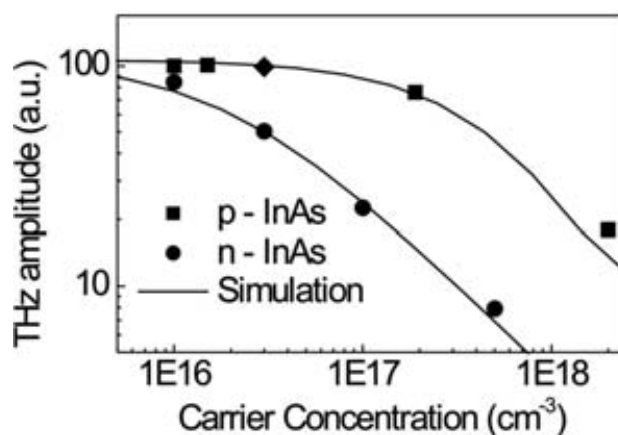
$$\frac{\partial E(z,t)}{\partial z} = \frac{e}{\epsilon_s \epsilon_0} [N_h(z,t) - N_e(z,t)]. \quad (9\alpha)$$

Ο πρώτος όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης μας δίνει το κέρδος στην πυκνότητα των φωτομεταφορέων λόγω της διέγερσης laser και μπορεί να περιγραφεί ως

$$G(Z,t) = I(t)\alpha(1-R)e^{-az}, \quad (9\beta)$$

όπου  $a$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης και  $R$  η ανακλαστικότητα της ακτίνας laser πάνω στην επιφάνεια του InAs. Ο δεύτερος όρος δείχνει τη διάχυση, όπως αυτή παρουσιάζεται στην εξίσωση (8), και ο τρίτος όρος είναι η μετατόπιση που προκαλείται από το ηλεκτρικό πεδίο, το πρόσημο της οποίας καθορίζεται από το πρόσημο του επιλεγμένου φορέα. Η εξίσωση (9) περιγράφει τη μετατόπιση και διάχυση των ελεύθερων φορέων στον ημιαγωγό, που περιλαμβάνει φωτομεταφορείς

και ελεύθερους φορείς μέσω της διαδικασίας εμπλουτισμού (doping). Η λύση της εξίσωσης (9) καταλήγει στην παραγωγή THz παλμών μέσω του φαινομένου photo-Dember. Η εικ. 2.7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό και το πείραμα αναφορικά με το πλάτος (amplitude) των παραγόμενων THz παλμών σαν συνάρτηση της πυκνότητας εμπλουτισμού (doping) σε πλακίδια InAs ημιαγωγού τύπου-n και τύπου-p. Ελεύθεροι φορείς μέσω διαδικασίας εμπλουτισμού (doping) προφυλάσσουν την παραγωγή THz ακτινοβολίας από το InAs υλικό και σαν αποτέλεσμα, μεγαλύτερη πυκνότητα εμπλουτισμού οδηγεί σε χαμηλότερη THz ισχύ. Δεδομένου ότι τα ηλεκτρόνια έχουν υψηλότερη κινητικότητα από τις οπές, ημιαγωγός InAs τύπου-n δίνει μεγαλύτερο φαινόμενο πετάσματος (screening effect) από ημιαγωγό InAs τύπου-p με το ίδιο επίπεδο εμπλουτισμού και άρα παράγει λιγότερο ισχυρή THz ακτινοβολία.



Σχήμα 2.7 Πλάτος THz πεδίου που έχει παραχθεί μέσω του φαινομένου photo-Dember σαν συνάρτηση του εμπλουτισμού (doping). Οι συνεχείς καμπύλες υπολογίζονται μέσα από την εξίσωση (9). Οι κουκίδες είναι πειραματικά αποτελέσματα όπου οι κύκλοι αναπαριστούν κρύσταλλο τύπου-n (100), τα τετράγωνα κρύσταλλο τύπου-p (100) και τα καρό κρύσταλλο τύπου-p (111)

## Οπτική ανόρθωση

Η παραγωγή THz κυμάτων με τους προαναφερόμενους μηχανισμούς χρησιμοποιεί πραγματικούς φωτοεπαγόμενους φορείς. Εδώ θα συζητήσουμε ορισμένες μεθόδους παραγωγής THz κυμάτων που χρησιμοποιούν μη γραμμικές οπτικές διαδικασίες, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως εικονικοί μεταφορείς που επάγονται από οπτική διέγερση. Παρόλο που αρκετές διαφορετικές αρχές της φυσικής, όπως το ρεύμα

αιχμής, η ταλάντωση Bloch, και η ταλάντωση σύμφωνων φωνονίων και πλάσματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράξουν ελεύθερα διαδιδόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην THz περιοχή, η παραγωγή THz ακτινοβολίας μέσω οπτικής ανόρθωσης έχει το μοναδικό πλεονέκτημα του εξαιρετικά ευρέους πλάτους της φασματικής περιοχής.

Η οπτική ανόρθωση είναι ένα δεύτερης τάξης μη γραμμικό οπτικό φαινόμενο. Είναι βασικά μια παραγωγή διαφοράς-συχνότητας με την τελευταία να φτάνει κοντά στο μηδέν. Τυπικά, οι fs laser παλμοί χρησιμοποιούνται για την παραγωγή THz ακτινοβολίας από EO κρυστάλλους μέσω του φαινομένου της οπτικής ανόρθωσης. Επειδή ένας fs παλμός περιέχει πολλές φασματικές συνιστώσες, δυο οποιεσδήποτε φασματικές συνιστώσες συμβάλλουν στην παραγωγή διαφοράς-συχνότητας και το συνολικό αποτέλεσμα είναι το μέσο άθροισμα όλων των συνεισφορών. Ένας fs laser παλμός είναι αρκετός για τη διέγερση ακτινοβολίας οπτικής ανόρθωσης, πράγμα που κάνει το πείραμα αρκετά εύκολο.

Μαθηματικά, η πόλωση  $P$  μπορεί να επεκταθεί σε μια σειρά ισχύος του ηλεκτρικού πεδίου  $E$

$$P(r, t) = \chi^{(1)}(r, t)E(r, t) + \chi^{(2)}(r, t) : E(r, t)E(r, t) + \chi^{(3)}(r, t) : E(r, t)E(r, t)E(r, t) + \dots \quad (10)$$

όπου είναι ο νιοστής τάξης τανυστής επιδεκτικότητας. Η οπτική ανόρθωση προέρχεται από το δεύτερο όρο της εξίσωσης (10). Εάν το προσπίπτον φως είναι επίπεδο κύμα το  $E$  μπορεί να εκφραστεί ως

$$E(t) = \int_0^{+\infty} E(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega + c.c. \quad (11)$$

Υποκαθιστώντας την εξίσωση (10) στην εξίσωση (11) η πόλωση της οπτικής ανόρθωσης δίνεται από

$$\begin{aligned} P_{OR}^{(2)}(t) &= 2\chi^{(2)} : \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} E(\omega_1)E^*(\omega_2) \exp[-i(\omega_1 - \omega_2)t] d\omega_1 d\omega_2 \\ &= 2\chi^{(2)} : \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} E(\omega + \Omega)E^* \exp[-i\Omega t] d\Omega d\omega, \end{aligned} \quad (12)$$

όπου  $\Omega$  είναι η διαφορά συχνότητας των δυο συνιστωσών οπτικής συχνότητας. Στο μακρινό πεδίο, το ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό πεδίο  $E_r(t)$  είναι ανάλογο με τη δεύτερη παράγωγο  $POR(t)$  σε σχέση με το χρόνο  $t$

$$E_r(t) \propto \frac{\partial^2}{\partial^2 t} P_{OR}^{(2)}(t). \quad (13)$$

Ο τανυστής επιδεκτικότητας  $\chi^2$  εξαρτάται από τη δομή του κρυστάλλου. Δοσμένης της δομής κρυστάλλου και του προσπίπτοντος φωτός, η εξίσωση (13) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της κυματομορφής μακρινού πεδίου της ακτινοβολίας. Πολλοί παράγοντες, όπως τα υλικά, ο προσανατολισμός του κρυστάλλου, το πάχος, η απορρόφηση και η διασπορά, η περίθλαση, η αντιστοίχιση φάσης και ο κορεσμός επιδρούν στην αποδοτικότητα της ακτινοβολίας, την κυματομορφή και την κατανομή συχνότητας.

Η αντιστοίχιση φάσης είναι πιο σημαντικός παράγοντας για μια μη γραμμική διαδικασία όπως η παραγωγή THz ακτινοβολίας μέσω οπτικής ανόρθωσης. Η αντιστοίχιση φάσης απαιτεί διατήρησης της ενέργειας και της ορμής στη μη γραμμική διαδικασία, η οποία περιγράφεται ως εξής:

$$\begin{cases} \omega_{O1} - \omega_{O2} = \Omega_{THz} \\ k_{O1} - k_{O2} = k_{THz} \end{cases}, \quad (14)$$

όπου  $\omega_{O1}$ ,  $\omega_{O2}$  και  $k_{O1}$ ,  $k_{O2}$  είναι συχνότητες και διανύσματα κύματος αντίστοιχα των οπτικών κυμάτων που εμπλέκονται στην παραγωγή THz κυμάτων. Μόνο όταν η αντιστοίχιση φάσης είναι ικανοποιητική, και τα τρία κύματα που συμμετέχουν στη διαδικασία οπτικής ανόρθωσης μπορούν να μείνουν στη φάση και να οδηγήσουν στο μέγιστο συντελεστή μετατροπής της ενέργειας κατά μήκος της διάδοσης του φωτός. Μη αντιστοίχιση της φάσης οδηγεί σε μια φάση απομάκρυνσης κατά τη διάδοση. Το μήκος συμφωνίας ορίζεται από το μήκος αλληλεπίδρασης όταν η αλλαγή φάσης φτάνει το  $\pi$

$$\delta k L_C = \pi, \quad (15)$$

όπου  $\delta k = k_{O1} - k_{O2} - k_{THz}$ . Για να παράξουμε αποδοτικά THz ακτινοβολία από χύδην (bulk) κρύσταλλο, το πάχος του κρυστάλλου δεν μπορεί να είναι μακρύτερος από το μήκος συμφωνίας προκειμένου να αποφευχθεί ακύρωση της μετατροπής λόγω μη αντιστοίχισης φάσης. Δεδομένου ότι η THz συχνότητας είναι πολύ χαμηλότερη από την οπτική συχνότητα, οι εξισώσεις (14) μπορούν να απλοποιηθούν μέσω της διαίρεσης της πρώτης εξίσωσης από τη δεύτερη



$$\frac{\partial \omega_o}{\partial k_o} = \frac{\Omega_{THz}}{k_{THz}}. \quad (16)$$

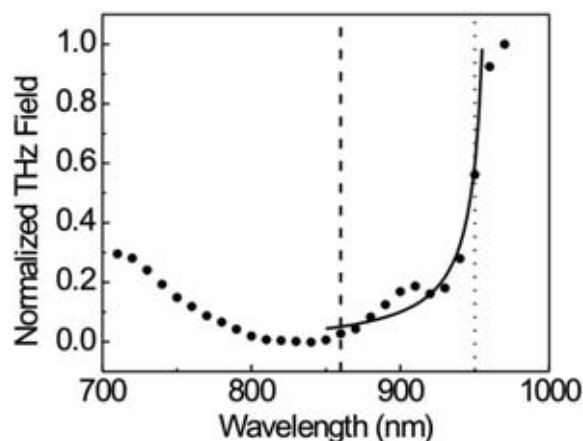
Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική αρχή, η εξίσωση (16) μας δίνει

$$v_{G,o} = v_{Ph,Thz}. \quad (17)$$

Αυτό σημαίνει ότι η αντιστοίχιση φάσης είναι ικανοποιημένη στην παραγωγή THz κύματος όταν η ταχύτητα ομάδας της οπτικής ακτίνας ισούται με την ταχύτητα φάσης της THz ακτίνας. Πλέον μπορούμε να κατανοήσουμε τη συνθήκη της αντιστοίχισης φάσης με πιο απλό τρόπο. Εφόσον ο οπτικός παλμός έχει πολύ υψηλότερη συχνότητα από τον THz παλμό, ο THz παλμός βλέπει μόνο το προφίλ του οπτικού παλμού και όχι τις ταλαντώσεις. Για να έχουμε μέγιστη μετατροπή ενέργειας ο οπτικός παλμός πρέπει να έχει μια συνεχή χρονική καθυστέρηση σύμφωνα με τον THz παλμό σε όλο το μήκος αλληλεπίδρασης. Η εξίσωση (17) δίνει τη συγγραμική συνθήκη αντιστοίχισης φάσης, στην οποία η τελευταία συμβαίνει όταν η διέγερση και οι THz ακτίνες διαδίδονται συγγραμικά μέσα στον μη γραμμικό κρύσταλλο. Αυτός ο τύπος αντιστοίχισης φάσης δίνει έναν υψηλό συντελεστή παραγωγής λόγω του μεγάλου μήκους αλληλεπίδρασης και παράγει THz ακτινοβολία με πολύ καλή ποιότητα ακτίνας.

Σύμφωνα με το μήκος κύματος της διέγερσης και τις ιδιότητες του μη γραμμικού υλικού, η οπτική ανόρθωση μπορεί να λάβει χώρα υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες. Εάν η φωτοενέργεια της δέσμης διέγερσης είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του μη γραμμικού υλικού, η οπτική ακτίνα θα απορροφηθεί μέσα σε πολύ μικρό διάστημα. Σε αυτή την περίπτωση η αντιστοίχιση φάσης δεν είναι συνήθως πολύ σημαντική, αφού το εύρος αλληλεπίδρασης είναι πολύ μικρότερο από το μήκος συμφωνίας. Ακόμα και με μικρό διάστημα απορρόφησης, κανονικά υπάρχει ισχυρή παραγωγή THz ακτινοβολίας λόγω μιας ηχητικής ενισχυμένης μη γραμμικής διαδικασίας. Όταν η ενέργεια φωτονίου είναι μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του μη γραμμικού υλικού, το laser διέγερσης μπορεί να διαδίδεται μέσα από το μη γραμμικό κρύσταλλο για μεγάλο διάστημα. Η παραγωγή THz ακτινοβολίας διαφέρει επίσης ανάλογα με τις διαφορετικές συνθήκες αντιστοίχισης φάσης. Εάν η αντιστοίχιση φάσης είναι ικανοποιημένη με την οπτική ανόρθωση, τότε η παραγόμενο THz πεδίο θα αυξάνεται συνεχώς σε όλο το βάθος του μη γραμμικού

κρυστάλλου. Για το λόγο αυτό αναμένεται ισχυρή παραγωγή THz κυμάτων. Εάν η αντιστοίχιση φάσης δεν είναι ικανοποιημένη, τα παραγόμενα THz κύματα θα ακυρώνονται έπειτα από κάθε μήκος συμφωνίας και αποδοτικότητα THz ακτινοβολίας που θα χαμηλώνει.



Σχήμα. 2.8 Παραγωγή THz ακτινοβολίας από έναν κρύσταλλο προσανατολισμού (110) CdTe μέσα από οπτική ανόρθωση. Οι κουκίδες είναι τα πειραματικά αποτελέσματα: η συνεχής καμπύλη υπολογίζεται σύμφωνα με τη συνθήκη αντιστοίχιας φάσης. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το πλάτος φασματικής περιοχής του κρυστάλλου. Η γραμμή-κουκίδες δείχνει τα σημεία όπου το μήκος συμφωνίας ισούται με το πάχος του κρυστάλλου.

Μόνο τα THz κύματα που παράγονται μέσα σε ένα πολύ στενό εύρος κοντά και στις δυο επιφάνειες του μη γραμμικού κρυστάλλου μπορεί να μην ακυρωθούν πλήρως λόγω της ταχύτητας μη αντιστοίχισης μεταξύ του οπτικού και THz παλμού. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να παρατηρήσουμε δυο THz παλμούς με αντίστροφη πολικότητα. Η εικ. 2.8 παρουσιάζει το πλάτος των THz παλμών που έχουν παραχθεί από έναν CdTe κρύσταλλο μέσω οπτικής ανόρθωσης. Λόγω αλλαγών στο μήκος κύματος της ακτίνας διέγερσης, παράγονται THz κύματα και στις τρεις συνθήκες.

Όταν επιλέγουμε μη γραμμικούς κρυστάλλους για την παραγωγή THz κυμάτων, πρέπει να λάβουμε υπόψη τρεις σημαντικούς παράγοντες: τη μη γραμμικότητα του υλικού, την απορρόφηση τόσο των οπτικών όσο και των THz παλμών από το υλικό, και το μήκος συμφωνίας της διαδικασίας οπτικής ανόρθωσης. Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες ο κρύσταλλος ZnTe βρέθηκε ότι ευνοεί περισσότερο την παραγωγή THz κυμάτων που έχουν διεγερθεί από fs laser παλμούς με κεντρικό μήκος κύματος περίπου 800 nm. Για την απόκτηση μέγιστης αποδοτικότητας μετατροπής

φωτός άντλησης σε THz ακτινοβολία είναι σημαντική η επιλογή της κοπής και του προσανατολισμού του κρυστάλλου. Ο ZnTe είναι ένας zincblende κρύσταλλος και τα μόνα μη μηδενικά στοιχεία τανυστή είναι  $\chi_{14} = \chi_{25} = \chi_{36}$ . Η λύση της εξίσωσης (12) δίνει τα παραγόμενα THz πεδία από διάφορες κοπές στον κρύσταλλο ZnTe. Όταν θεωρούμε μόνο την κάθετη πρόσπτωση, το παραγόμενο THz πεδίο από έναν (100) προσανατολισμένο κρύσταλλο είναι

$$|E_{THz}| = 0. \quad (18\alpha)$$

Από έναν (110) προσανατολισμένο κρύσταλλο είναι

$$|E_{THz}| \propto d_{14} E^2 \left[ \sin^2 \theta (1 + 3 \cos^2 \theta) \right]^{1/2},$$

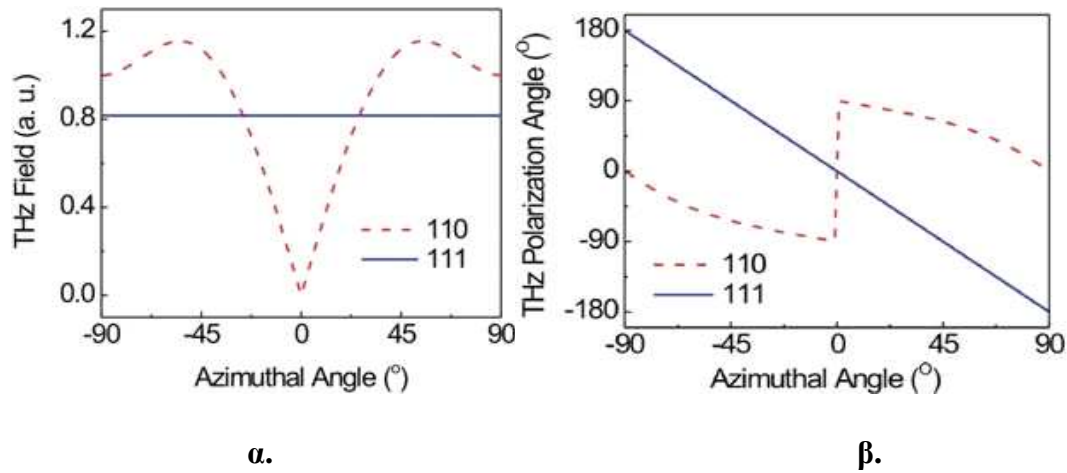
$$\varphi = \arctan(2 \cot \theta) \quad (18\beta)$$

και από τον κρύσταλλο (111) προσανατολισμού είναι

$$|E_{THz}| \propto d_{14} E^2,$$

$$\varphi = -2\theta. \quad (18\gamma)$$

Εδώ το  $\theta$  είναι η γωνία ανάμεσα στην πόλωση laser και τον άξονα αναφοράς στον κρύσταλλο, και  $\varphi$  είναι η γωνία ανάμεσα στην πόλωση του THz κύματος και τον άξονα αναφοράς. Στους (110) κρυστάλλους ο άξονας αναφοράς ορίζεται ως [001] και είναι [-1-12] σε έναν (111) κρύσταλλο. Η εικ. 2.9α παρουσιάζει το υπολογισμένο THz πλάτος σαν συνάρτηση της γωνίας αζιμουθικής πόλωσης της οπτικής ακτίνας διέγερσης και η εικ. 2.9β δίνει την πόλωση του THz κύματος.



Σχήμα 2.9 Παραγωγή THz κύματος μέσω οπτικής ανόρθωσης. (α) Πλάτος THz κύματος και (β) πόλωση THz κύματος

## Ηλεκτροοπτική δειγματοληψία

Η ηλεκτροοπτική (EO) δειγματοληψία μπορεί να θεωρηθεί σαν μια αμοιβαία διαδικασία της οπτικής ανόρθωσης. Στην EO δειγματοληψία το THz πεδίο μετρίεται με τη διαμόρφωση μιας laser δέσμης ανίχνευσης μέσα σε έναν EO κρύσταλλο, στον οποίο μεταβάλλει την πόλωση του ελλεισοειδούς του δείκτη διάθλασης του EO κρυστάλλου. Η γραμμικά πολωμένη δέσμη ανίχνευσης συνδιαδίδεται μέσα στον κρύσταλλο μαζί με την THz ακτίνα και η φάση της διαμορφώνεται από τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης που προκαλείται από το ηλεκτρικό πεδίο του THz παλμού. Η ύπαρξη του THz πεδίου μεταβάλλει τη διπλοδιαθλαστικότητα του EO κρυστάλλου, δηλαδή προκαλεί τη διαφορά δείκτη διάθλασης για πολώσεις κατά μήκος διαφορετικών αξόνων του κρυστάλλου. Η διπλοδιαθλαστικότητα που προκλήθηκε από το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλει την πόλωση της δέσμης ανίχνευσης. Αυτή η μεταβολή πόλωσης μετατρέπεται σε μεταβολή ισχύος μέσω ενός αναλυτή, λόγω χάρη ενός πρίσματος Wollaston. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα ζεύγος ισορροπημένων φωτοδιοδών για να καταπνίξει τον κοινό θόρυβο του laser όταν το σήμα διπλασιάζεται.

Για έναν κρύσταλλο zincblende, όπως ο ZnTe, όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο το ελλεισοειδές του δείκτη διάθλασης είναι

$$\frac{x^2 + y^2 + z^2}{n_0^2} + 2\gamma_{41}E_x yz + 2\gamma_{41}E_y zx + 2\gamma_{41}E_z xy = 1, \quad (19)$$

όπου  $n_0$  είναι ο δείκτης διάθλασης του κρυστάλλου χωρίς ηλεκτρικό πεδίο.  $x, y, z$  είναι συστήματα συντεταγμένων του ελλειψοειδούς και  $E_x, E_y, E_z$  είναι εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος των αντίστοιχων αξόνων.  $\Gamma_{41}$  είναι EO συντελεστής του κρυστάλλου. Μια καθυστέρηση φάσης  $\Gamma$  μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με αλλαγή του δείκτη διάθλασης

$$\Gamma = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n, \quad (20)$$

όπου  $d$  είναι το πάχος του EO κρυστάλλου και  $\Delta n$  είναι η διαφορά μεταξύ μικρών και μεγάλων αξόνων του ελλειψοειδούς. Εδώ η διαδικασία θεωρείται ότι είναι αντιστοιχισμένη φάση. Εάν θεωρήσουμε μόνο την κάθετη πρόσπτωση, τότε η καθυστέρηση φάσης σε (100), (110) και (111) προσανατολισμένο κρύσταλλο ZnTe είναι

$$\Gamma = 0(\text{for}(100) \text{ crystal})] \quad (21\alpha)$$

$$\Gamma = \frac{\pi d n_0^3 \gamma_{41} E}{\lambda} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi} (\text{for}(110) \text{ crystal})], \quad (21\beta)$$

$$\Gamma = \frac{\pi d n_0^3 \gamma_{41} E}{\lambda} \sqrt{\frac{8}{3}} (\text{for}(111) \text{ crystal})]. \quad (21\gamma)$$

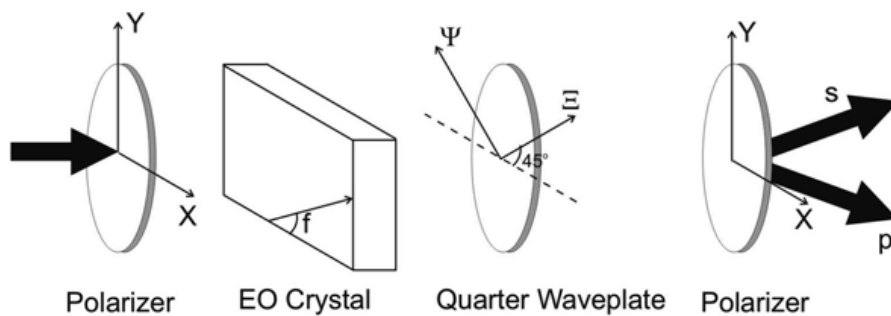
Σε γραμμικές EO διαδικασίες, η καθυστέρηση φάσης από πεδίο είναι ανάλογη στο εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι, ο EO συντελεστής ορισμένων EO κρυστάλλων μπορεί να αναπαρασταθεί με πεδίο μισού κύματος  $E\pi$  του κρυστάλλου, που ορίζεται ως το ελάχιστο ηλεκτρικό πεδίο που δίνει καθυστέρηση φάσης  $\pi$  σε ορισμένο EO κρύσταλλο με μονάδα πάχους. Σαν αποτέλεσμα, η μέγιστη καθυστέρηση φάσης που μπορεί να παράξει ένα THz πεδίο στον EO κρύσταλλο είναι

$$\Gamma = d\pi \frac{E_{THz}}{E_\pi}. \quad (22)$$

Πίνακας 2.2 Σύνοψη ιδιοτήτων των πέντε περισσότερο χρησιμοποιούμενων zincblende ΕΟ κρυστάλλων

	ZnTe	GaAs	InP	GaP	ZnS
Επ ( $l = 1 \text{ mm}$ ) (kV/cm)	89.0	161	153	252	388
Field sensitivity (mV/cm Hz)	3.20	5.80	5.51	9.07	12.2
NEP (10–16 W/Hz)	0.27	0.89	0.80	2.2	5.2
VTO (THz)	5.3	8.0	10.4	11	10.8
$\sqrt{3}$	3.18	3.63	3.54	3.34	2.88
N	2.85	3.63	3.54	3.18	2.32
Phase-matching wavelength (nm)	822	1,405	1,230	1,030	470
Frequency of TO photon (THz)	5.3	7.6	10.0	10.8	9.8

Δυο είναι οι πιο κοινές μέθοδοι για τη μέτρηση της καθυστέρησης φάσης της laser ακτίνας ανίχνευσης. Είναι η εγκάρσια και η ισοροπημένη μέτρηση. Η τελευταία δίνει μεγαλύτερο σήμα και μετρά άμεσα το πεδίο του THz πεδίου ενώ η πρώτη μέθοδος είναι πιο απλή στην εγκατάσταση πειράματος. Η εικ. 2.10 δείχνει την έννοια της ισοροπημένης μέτρησης. Μια γραμμικά πολωμένη ακτίνα ανίχνευσης διαμορφώνεται σε ελλειπτική πόλωση μέσω της ΕΟ διαδικασίας. Ένα πλακίδιο πόλωσης  $\lambda/4$  χρησιμοποιείται για να πολώσει το διάνυσμα της πόλωσης της δέσμης ανίχνευσης, που μπορεί να τοποθετηθεί είτε μπροστά είτε πίσω από τον ΕΟ κρύσταλλο. Ένας αναλυτής χρησιμοποιείται για να χωρίσει την πολωμένη δέσμη ανίχνευσης σε συνιστώσες πόλωσης s (έξω από το επίπεδο) και p (στο επίπεδο).



Εικ. 2.10 Μέθοδος ισοροπημένης ανίχνευσης

Ένα ζεύγος ισορροπημένων φωτοανιχνευτών χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της διαφοράς στην πόλωση των συνιστωσών s και p. Όταν δεν εφαρμόζεται THz πεδίο οι συνιστώσες πόλωσης s και p μετά τον αναλυτή θα έχουν την ίδια ισχύ και γι' αυτό ο ισορροπημένος ανιχνευτής δεν δίνει κάποιο σήμα. Η παρουσία ενός THz πεδίου μεταβάλλει την πόλωση της δέσμης ανίχνευσης παράγοντας ένα μετρήσιμο σήμα στον ισορροπημένο ανιχνευτή. Εάν η ακτίνα εισόδου είναι πολωμή x, τότε το φως εξόδου βρίσκεται από την εξής εξίσωση

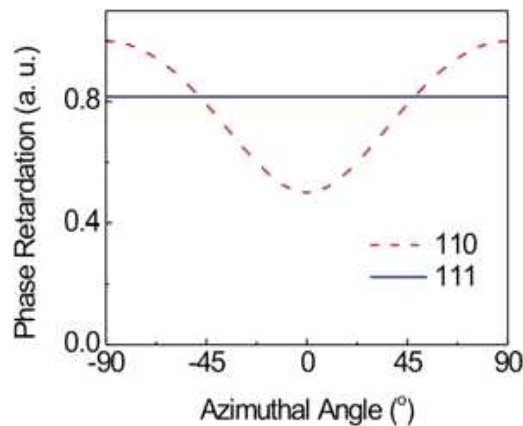
$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{4} & -\sin \frac{\pi}{4} \\ \sin \frac{\pi}{4} & \cos \frac{\pi}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(iT) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi}{4} & \sin \frac{\pi}{4} \\ -\sin \frac{\pi}{4} & \cos \frac{\pi}{4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Το σήμα του ισορροπημένου ανιχνευτή είναι

$$S = I_0 \sin 2\varphi \sin \Gamma \approx I_0 \Gamma \sin 2\varphi, \quad (24)$$

όπου  $I_0$  είναι η ισχύς του laser ανίχνευσης και  $\varphi$  είναι η γωνία ανάμεσα στην πόλωση της δέσμης ανίχνευσης και το μεγάλο άξονα του ελλειψοειδούς που προκαλείται από το THz πεδίο. Η εξίσωση (24) δείχνει ότι σε μια ισορροπημένη μέτρηση το σήμα είναι γραμμικά ανάλογο με το ηλεκτρικό πεδίο της THz ακτινοβολίας. Η εικ. 2.11 παρουσιάζει την καθυστέρηση φάσης σαν συνάρτηση της αζιμουθιακής γωνίας σε (110) και (111) προσανατολισμένο ZnTe κρύσταλλο.

Μια εγκάρσια μέτρηση είναι παρόμοια με την ισορροπημένη, εκτός από το ότι δεν υπάρχει ένα τέταρτο της πλάκας (waveplate). Ο αναλυτής τοποθετείται εγκάρσια πολωμένος στον πολωτή που βρίσκεται μπροστά στον ΕΟ κρύσταλλο.



Εικ. 2.11 Καθυστέρηση φάσης σε ΕΟ δειγματοληψία με ισορροπημένο ανιχνευτή

Δέσμη ανίχνευσης που διαρρέει από τον αναλυτή ανιχνεύεται χρησιμοποιώντας μόνο έναν οπτικό ανιχνευτή. Χωρίς το THz πεδίο, κατ' αρχήν, η δέσμη ανίχνευσης δεν διαρρέει από τον αναλυτή και το καταγεγραμμένο σήμα είναι 0. Εάν εφαρμοστεί ένα THz πεδίο για την τροποποίηση της πόλωσης της δέσμης ανίχνευσης, το διαρρέον σήμα θα γίνει ισχυρότερο. Σε μια ιδανική περίπτωση, το σήμα είναι

$$S = I_0 \left( \sin 2\varphi \sin \frac{\Gamma}{2} \right)^2 \approx \frac{1}{4} I_0 \Gamma^2 \sin^2 2\varphi. \quad (25)$$

Η εξίσωση (25) δείχνει ότι το μετρούμενο σήμα είναι ανάλογο με την ισχύ της THz ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, ο ΕΟ κρύσταλλος δεν είναι τέλεια ομογενής. Υπολλειπόμενη πίεση στον κρύσταλλο προκαλεί ένα ελλειψοειδές του δείκτη διάθλασης στον ΕΟ κρύσταλλο, που επίσης παράγει μια καθυστέρηση φάσης  $\Gamma_0$ . Με την ύπαρξη της  $\Gamma_0$  η εξίσωση (25) γίνεται

$$S = \frac{1}{4} I_0 (\Gamma + \Gamma_0)^2 \sin^2 2\varphi. \quad (26a)$$

Εάν  $\Gamma_0 \gg \Gamma$ , τότε η εξίσωση (26a) είναι

$$\Delta S = \frac{1}{2} I_0 \Gamma \Gamma_0 \sin^2 2\varphi. \quad (26b)$$

όπου το  $\Delta S$  αναπαριστά τη διαφορά σήματος με και χωρίς την παρουσία THz πεδίου. Το καταγεγραμμένο σήμα είναι τότε ανάλογο με το ηλεκτρικό πεδίο του THz κύματος και όχι με την ισχύ του.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι η ως άνω συζήτηση σε ΕΟ δειγματοληψία βασίζεται στην υπόθεση του σταθερού ηλεκτρικού πεδίου. Για ένα περιοδικό ηλεκτρικό πεδίο, όπως ένας THz παλμός, θα έπρεπε να λάβουμε υπόψη την αντιστοίχιση φάσης. Όντας η αμοιβαία διαδικασία της οπτικής ανόρθωσης, η ΕΟ δειγματοληψία έχει την ίδια συνθήκη αντιστοίχισης φάσης.

## **Παραγωγή και ανίχνευση ευρυζωνικών συχνοτήτων**

Δυο κύριοι παράγοντες περιορίζουν το εύρος της φασματικής περιοχής της THz ακτινοβολίας στην οπτική ανόρθωση και την ΕΟ δειγματοληψία: η παλμική διάρκεια



του laser διέγερσης παλμού και οι συνθήκες αντιστοίχισης φάσης. Άλλος ένας παράγοντας, λιγότερο σημαντικός από τους δυο πρώτους αλλά ο οποίος επίσης περιορίζει τη χρήσιμη φασματική περιοχή, είναι η LO απορρόφηση φωνονίων, η οποία καίει οπές στην ευρύτερη φασματική περιοχή. Χονδρικά μιλώντας, ένας παλμός laser μπορεί να παράγει έναν THz παλμό με πλάτος φασματικής περιοχής διπλάσιο από το αυτό πλάτος του παλμού laser. Για το λόγο αυτό, παλμοί laser με μικρότερο πλάτος φασματικής περιοχής αναμένονται να εκτείνουν το πλάτος φασματικής περιοχής της THz ακτινοβολίας. Με την ανάπτυξη των ultrafast lasers, διάρκειες των παλμών laser μικρότερες των fs ήδη υπάρχουν. Το πλάτος φασματικής περιοχής είναι πάνω από 100 THz. Ο περιοριστικός παράγοντας εξακολουθεί να είναι κατάλληλος αντιστοίχισης φάσης. Επειδή η έκταση συχνότητας των THz παλμών είναι τόσο ευρεία, είναι πρακτικά αδύνατο να επιλέξουμε ένα EO υλικό που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της αντιστοίχισης φάσης για όλες τις συνιστώσες συχνότητας. Ένας αποτελεσματικός τρόπος φαίνεται να είναι η μείωση τους πάχους του υλικού. Δεδομένου ότι η αντιστοίχιση φάσης στην οπτική ανόρθωση και στην EO δειγματοληψία μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας οπτικός παλμός που διατηρεί την ίδια χρονική καθυστέρηση όπως και η THz ταλάντωση, όπως προαναφέρθηκε, η μη αντιστοίχιση φάσης μπορεί να θεωρηθεί ως η μεταβολή της χρονικής καθυστέρησης μεταξύ οπτικών και THz παλμών καθώς διαδίδονται μέσα από τον EO κρύσταλλο. Μια χρονική μετατόπιση ανάμεσα στον οπτικό παλμό και τον THz παλμό μπορεί να οριστεί ως

$$\tau(\Omega) = \frac{n_g(\lambda_0) - n(\Omega)}{c} d. \quad (27)$$

Εδώ  $\lambda_0$  είναι το κεντρικό μήκος κύματος και  $n_g$  είναι ο δείκτης ομάδας του της ακτίνας ανίχνευσης.  $n(\Omega)$  είναι ο δείκτης φάσης της THz ακτινοβολίας. Στην EO δειγματοληψία λόγω χάρη, η χρονική μετατόπιση δείχνει ότι ο οπτικός παλμός ανίχνευσης δεν μένει στο ίδιο THz πεδίο καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας EO δειγματοληψίας. Η διαμόρφωση του παλμού ανίχνευσης από ένα THz πεδίο είναι ένα μέσο φαινόμενο στη χρονική μετατόπιση

$$G(\Omega) = \frac{t(\Omega)}{\tau(\Omega)} \int_0^\tau e^{i2\pi\Omega t} dt = t(\Omega) \frac{e^{i2\pi\Omega\tau(\Omega)} - 1}{i2\pi\Omega\tau(\Omega)}. \quad (28)$$

Εδώ  $2\pi \Omega \tau$  ( $\Omega$ ) είναι ο παράγοντας μη αντιστοίχισης φάσης στην ΕΟ διαδικασία. Η αξία είναι μικρότερη αν ο παράγοντας μη αντιστοίχισης φάσης δώσει καλύτερη αντιστοίχιση φάσης. Ο παράγοντας μη αντιστοίχισης φάσης είναι γραμμικά ανάλογος με το πάχος  $d$  του κρυστάλλου. Ο παράγοντας μη αντιστοίχισης φάσης εξαρτάται επίσης από τη διαφορά ανάμεσα στα  $n_0$  ( $\lambda_0$ ) και  $n(\Omega)$ . Ο δείκτης ομάδας του παλμού laser είναι σταθεροποιημένος όταν επιλέγεται διέγερση laser, ενώ ο δείκτης φάσης του THz κύματος είναι αυτός που καθορίζει ποια συχνότητα του THz κύματος έχει μεγάλη αποδοτικότητα στην ΕΟ διαδικασία. Ο δείκτης φάσης ενός THz κύματος σαν συνάρτηση της συχνότητας μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας οπτικά φωνόνια του ΕΟ κρυστάλλου

$$n(\Omega) = \sqrt{\left[ 1 + \frac{(\hbar\Omega_{LO})^2 - (\hbar\Omega_{TO})^2}{(\hbar\Omega_{TO})^2 - (\hbar\Omega)^2 - i\hbar\gamma\Omega} \right] \times \epsilon_{\infty}}, \quad (29)$$

όπου  $\hbar$  είναι η μειωμένη σταθερά του Planck,  $\Omega_{TO}$  και  $\Omega_{LO}$  είναι εγκάρσια και διαμήκης, αντίστοιχα, συχνότητα οπτικού φωνονίου,  $\gamma$  δείχνει καθυστέρηση της ταλάντωσης και  $\epsilon_{\infty}$  είναι η υψηλή διαπερατότητα συχνότητας του ΕΟ κρυστάλλου. Ο πίνακας 2.3 συγκρίνει τις ιδιότητες δυο συχνά χρησιμοποιούμενων κρυστάλλων: των ZnTe και GaP.

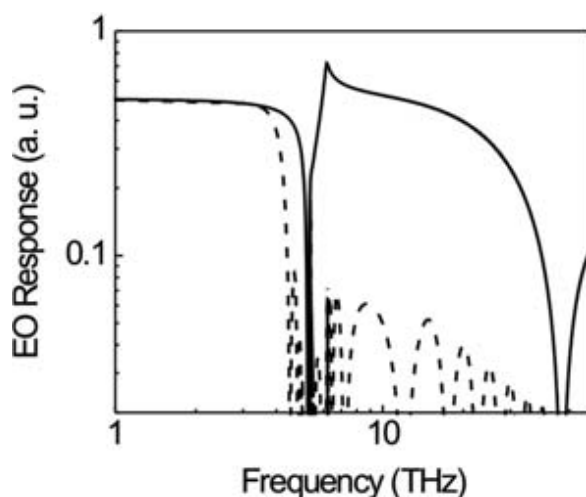
**Πίνακας 2.3** Ιδιότητες των κρυστάλλων ZnTe και GaP

	$\hbar\Omega_{TO}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\hbar\Omega_{LO}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\gamma(\text{cm}^{-1})$	$\epsilon_{\infty}$	C	Ng @ 835 nm
ZnTe	177	206	3.01	6.7	-0.07	3.224
GaP	367.3	403.0	4.3	9.075	-0.47	3.556

Η αποδοτικότητα της ΕΟ δειγματοληψίας επηρεάζεται όχι μόνο από την αντιστοίχιση φάσης μεταξύ των οπτικών και THz παλμών αλλά και από την ισχύ του ΕΟ συντελεστή, η οποία είναι επίσης συνάρτηση της συχνότητας,

$$r_{41}(\Omega) = r_e \times \left[ 1 + C \left( 1 - \frac{(\hbar\Omega)^2 - i\hbar\Omega\gamma}{(\hbar\Omega_{LO})^2} \right)^{-1} \right], \quad (30)$$

όπου  $re$  είναι μια σταθερά που είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα και δείχνει τον καθαρό EO συντελεστή του κρυστάλλου σε μεσαίου μήκους IR εύρος και  $C$  είναι ο παράγοντας Faust-Henry του EO κρυστάλλου, που δίνει το λόγο ανάμεσα στην επίδραση ιόντος και ηλεκτρονίου στο DC EO φαινόμενο. Το πραγματικό EO φαινόμενο υπολογίζεται συνδυάζοντας τις εξισώσεις (28) και (30). Η εικ. 2.12 δείχνει την απόκριση συχνότητας του ZnTe κρυστάλλου με διαφορετικά πάχη, όταν αυτό διεγείρεται με laser 800 nm.

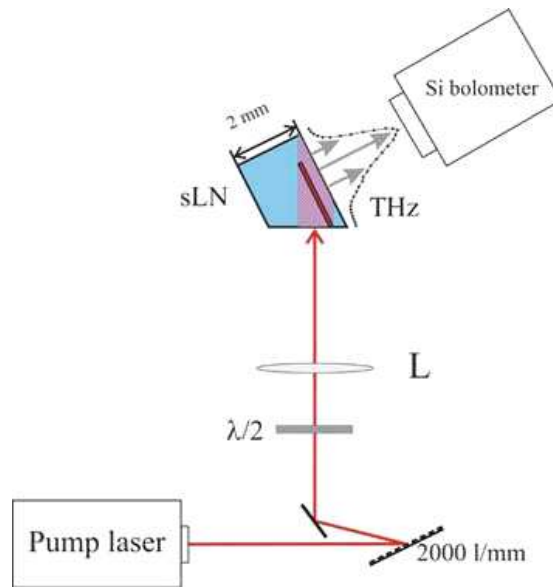


Εικ. 2.12 Η απόκριση συχνότητας ενός ZnTe κρυστάλλου σε EO δειγματοληψία. Το πάχος του ZnTe κρυστάλλου είναι 10  $\mu\text{m}$  (συνεχής) and 100  $\mu\text{m}$  (διακεκομμένη)

## Κεκλιμένο μέτωπο παλμού

Η παραγωγή THz κυμάτων από έναν ZnTe κρύσταλλο έχει μια καλή συγγραμική αντιστοίχιση φάσης για όλες τις πολώσεις. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη άλλοι κρύσταλλοι, όπως οι GaSe και LiNbO<sub>3</sub>, που έχουν υψηλούς μη γραμμικούς συντελεστές αλλά παρόλ' αυτά δεν έχουν αυτόματα συγγραμική αντιστοίχιση φάσης στην οπτική ανόρθωση. Χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι προκειμένου να παράξουμε υψηλής αποδοτικότητας THz κύματα από τέτοιους μη γραμμικούς κρυστάλλους. Ορισμένοι κρύσταλλοι, όπως ο GaSe, έχουν υψηλή διπλοδιαθλαστικότητα. Επιλέγοντας την πόλωση των οπτικών και THz ακτινών κατά τις διάφορες κατευθύνσεις του ελλεισοειδούς του δείκτη διάθλασης, η συγγραμική στοίχιση φάσης μπορεί να ικανοποιηθεί. Υπάρχουν ακόμα άλλοι μη γραμμικοί κρύσταλλοι, όπως ο LiNbO<sub>3</sub>, οι οποίοι δεν έχουν επαρκή διπλοδιαθλαστικότητα για να αντιστοιχίσουν το δείκτη του οπτικού κύματος με τις χαμηλής συχνότητας

συνιστώσες του THz κύματος. Η αντιστοίχιση φάσης μπορεί να ικανοποιηθεί επίσης με την επιλεκτική τοποθέτηση των οπτικών και THz ακτινών να διαδοθούν σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Ωστόσο, σε αυτό το σχηματισμό το THz κύμα και η ακτίνα NIR απομακρύνονται το ένα από το άλλο σε σύντομο διάστημα. Ο συντελεστής μετατροπής ενέργειας είναι περιορισμένος. Η μεγάλη γωνία ανάμεσα στις THz ακτίνες και στις οπτικές επίσης δυσκολεύει τη σύζευξη του THz κύματος έξω από τον μη γραμμικό κρύσταλλο καθώς πρέπει να αποφύγει την απόλυτα εσωτερική ανάκλαση στην επιφάνεια του κρυστάλλου.



Σχήμα. 2.13 Εγκατάσταση παραγωγής THz κυμάτων από έναν LiNbO3 κρύσταλλο χρησιμοποιώντας ένα κεκλιμένο μέτωπο παλμού ακτίνας διέγερσης

Η παραγωγή THz κύματος από έναν LiNbO3 κρύσταλλο μπορεί να ικανοποιήσει τη συνθήκη αντιστοίχισης φάσης με κλίση του μετώπου παλμού της ακτίνας διέγερσης. Η εικ. 2.13 δείχνει τη σχηματική αναπαράσταση της παραγωγής THz κυμάτων από έναν LiNbO3 κρύσταλλο από οπτικούς παλμούς με κεκλιμένο μέτωπο παλμού. Το laser άντλησης προσπίπτει σε ένα περιοδικό πέτασμα (grating), που χρησιμοποιείται για την κλίση του μετώπου ισχύος των παλμών άντλησης. Ελέγχουμε τη γωνία κλίσης  $\gamma$  ώστε η ταχύτητα ομάδας της οπτικής ακτίνας να έχει την εξής σχέση με την ταχύτητα THz φάσης

$$v_{G,O} \cos \gamma = v_{Ph,THz} \cdot \quad (31)$$

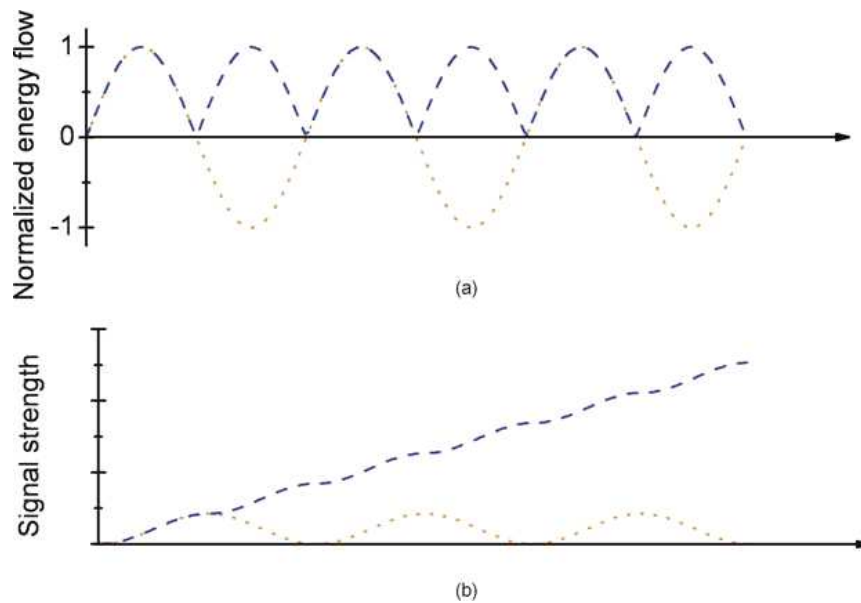
Η κλίση του μετώπου παλμού προκαλεί αντιστοίχιση φάσης κατά την κατεύθυνση της διάδοσης του THz κύματος. Όπως φαίνονται στο Σχήμα. 2.13, παρόλο που η κατεύθυνση διάδοσης του THz κύματος και του οπτικού κύματος είναι διαφορετική, το κεκλιμένο μέτωπο ισχύος των παλμών άντλησης ταξιδεύει συγγραμικά με το THz κύμα με την ίδια ταχύτητα. Σαν αποτέλεσμα, είναι ικανοποιημένες και η αντιστοίχιση φάσης και η αντιστοίχιση ταχύτητας.

Ο LiNbO<sub>3</sub> είναι ένας ελκυστικός μη γραμμικός κρύσταλλος που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως λόγω της υψηλής μη γραμμικότητάς του. Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα του LiNbO<sub>3</sub> ως παραγωγού THz ακτινοβολίας είναι ότι έχει μεγαλύτερο διάκενο φασματικής περιοχής από τα υπόλοιπα συνήθη ΕΟ υλικά. Αυτό καθιστά το LiNbO<sub>3</sub> λιγότερο επιρρεπή στην πολυφωτονική απορρόφηση των παλμών διέγερσης laser. Η πολυφωτονική απορρόφηση δίνει μεγαλύτερη πιθανότητα οπτικής ζημίας του κρυστάλλου και παράγει ελεύθερους φορείς στο μη γραμμικό υλικό που υπερκαλύπτουν την παραγωγή THz ακτινοβολίας. Αυτή θεωρείται η κυριότερη αιτία κορεσμού στην παραγωγή THz ακτινοβολίας μέσω οπτικής ανόρθωσης όταν χρησιμοποιείται υψηλή ισχύς laser διέγερσης. Το μεγαλύτερο διάκενο φασματικής περιοχής επιτρέπει στους κρυστάλλους LiNbO<sub>3</sub> να κρατούν υψηλότερη ισχύ laser και άρα να αποδίδει ισχυρότερη THz ακτινοβολία. Ένα μειονέκτημα του κρυστάλλου LiNbO<sub>3</sub> είναι ότι έχει υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης, πράγμα που περιορίζει το πάχος του κρυστάλλου LiNbO<sub>3</sub> που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

## **Ψευδο-αντιστοίχιση φάσης**

Τα χύδην μη γραμμικά υλικά έχουν πάντα περιορισμένο μήκος συμφωνίας. Η διατήρηση της ορμής μπορεί να βελτιωθεί εισάγοντας έναν επιπρόσθετο διάνυσμα κύματος από ένα περιοδικό μη γραμμικό μέσο με επιλεγμένη περίοδο. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ψευδο-αντιστοίχιση φάσης. Η περίοδος του μη γραμμικού μέσου μπορεί να τεθεί ίση προς ένα μήκος συμφωνίας. Η πολικότητα του μη γραμμικού μέσου αντιστρέφεται εναλλάξ από περιοχή σε περιοχή, πράγμα που προκαλεί την αναστροφή του προσήμου της φάσης μετά από ένα μήκος συμφωνίας. Η Εικ. 2.14 συγκρίνει μη γραμμικές διαδικασίες σε χύδην υλικά όπως και σε υλικά ψευδο-αντιστοίχιση φάσης. Σε χύδην υλικά, η ροή ενέργειας από τη συχνότητα άντλησης

στη συχνότητα σήματος συμβαίνει εντός μιας περιόδου κάθε μήκους συμφωνίας λόγω του εναλλασσόμενου προσήμου της φάσης κάθε περιόδου. Η περιοδική πόλωση του μη γραμμικού κρυστάλλου στο μέσο ψευδο-αντιστοίχιση φάσης δίνει μια  $\pi$  αλλαγή φάσης μετά από κάθε μήκος συμφωνίας. Αυτό έχει σαν συνέπεια μια συνεχώς συσσωρευμένη ροή ενέργειας από τη συχνότητα άντλησης προς τη συχνότητα σήματος.



Εικ. 2.14 Μη γραμμική διαδικασία σε χύδην υλικό (κουκίδες) και QPM υλικό (διακεκομμένο) με αύξηση του μήκους αλληλεπίδρασης (α) ροή ενέργειας, (β) ισχύς σήματος

Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε ένα μέσο ψευδο-αντιστοίχιση φάσης για την παραγωγή THz ακτινοβολίας, μπορούμε να κολλήσουμε πολλαπλά στρώματα ΕΟ υλικού με εναλλασσόμενο πόλο και πάχος ίσα με το μήκος συμφωνίας της οπτικής ανόρθωσης. Τα πιο γνωστά QPM υλικά περιλαμβάνουν το περιοδικά πολωμένο νιοβικό λιθίου και το περιοδικά πολωμένο αρσενίδιο γαλλίου. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι δομές QPM αυξάνουν το μήκος αντιστοίχισης φάσης στον ΕΟ κρύσταλλο ενώ δεν διορθώνουν τη χρονική καθυστέρηση που δημιουργείται από την μη αντιστοίχιση ταχύτητας ανάμεσα στην οπτική ακτίνα διέγερσης και στην THz ακτίνα. Για το λόγο αυτό, η χρήση QPM μπορεί να παράξει έναν μεγάλο THz παλμό με πολλούς κύκλους ταλάντωσης ακόμη και αν χρησιμοποιείται ένας στενός οπτικός παλμός.

## Κεφάλαιο 3

### Φασματοσκοπία και απεικόνιση THz ακτινοβολίας

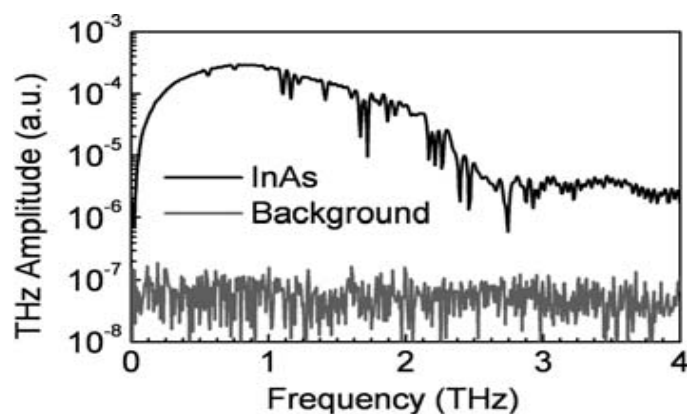
Από τη στιγμή που οι κατάλληλες πηγές και ανιχνευτές THz η/μ κυμάτων θα είναι διαθέσιμοι, οι ερευνητές θα ενδιαφερθούν και για την ανάπτυξη τεχνολογιών εφαρμογής με σκοπό την αξιοποίησή τους. Μέχρι στιγμής, οι περισσότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούν THz κύματα μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες: την φασματοσκοπία THz κυμάτων και την απεικόνιση THz κυμάτων. Όταν χρησιμοποιείται ένα παλμικό THz σήμα, η φασματοσκοπική τεχνική που κυρίως χρησιμοποιείται είναι η φασματοσκοπία πεδίου χρόνου. Στο παρόν κεφάλαιο κάνουμε μια σύντομη εισαγωγή στην έννοια της φασματοσκοπίας πεδίου χρόνου και στην απεικόνιση THz κυμάτων. Στη συνέχεια εξετάζουμε ορισμένες τεχνικές φασματοσκοπίας και απεικόνισης.

### Φασματοσκοπία στο πεδίο του χρόνου

Σε ένα παλμικό THz σύστημα, η κυματομορφή του THz παλμού  $E(t)$  ανιχνεύεται μέσω ενός ρυθμού δειγματοληψίας του THz παλμού με τη χρήση παλμών ανίχνευσης laser. Όπως έχει προαναφερθεί, ένας παλμός ultrafast laser διασπάται σε μια δέσμη άντλησης και μια δέσμη ανίχνευσης, όπου η πρώτη χρησιμοποιείται για την παραγωγή THz παλμών και η δεύτερη για την ανίχνευση των παλμών αυτών. Προερχόμενοι από την ίδια πηγή, οι παλμοί άντλησης και ανίχνευσης έχουν μια καθορισμένη χρονική σχέση. Καθώς διαδίδεται κατά μήκος μιας οπτικής γραμμής καθυστέρησης, ο παλμός ανίχνευσης δειγματοληπτεί τον THz παλμό και καταγράφει το ηλεκτρικό του πεδίο ως συνάρτηση χρόνου καθυστέρησης. Ο μετασχηματισμός Fourier της χρονικής κυματομορφής  $E(t)$  μας δίνει τη φασματική κατανομή του THz παλμού στο πεδίο της συχνότητας

$$\tilde{E}(\omega) = A(\omega)e^{-i\varphi(\omega)} = \int dt E(t)e^{-i\omega t}. \quad (1)$$

Το THz πεδίο στο πεδίο της συχνότητας είναι κατ' αρχήν μια σύνθετη τιμή, που χαρακτηρίζεται από το πλάτος και τη φάση. Ένας THz παλμός περιλαμβάνει συνήθως λίγους κύκλους ταλάντωσης, και ως εκ τούτου το φασματικό εύρος ζώνης του μπορεί να είναι μεγαλύτερο από μια οκτάδα. Διαφορετικές πηγές THz παλμών εκπέμπουν THz ακτινοβολία με διαφορετικές τιμές εύρους ζώνης που κυμαίνονται από 0.1 THz μέχρι και πάνω από 100 THz. Καταγράφοντας την κυματομορφή ενός παλμού μετά από την αλληλεπίδρασή του με ένα στόχο και στη συνέχεια εξάγοντας το φάσμα του THz παλμού μέσω της εξίσωσης (1) μπορούμε να βρούμε την THz απόκριση του στόχου μέσα στο εύρος ζώνης των THz παλμών.



**Εικ. 3.1** Το φάσμα ενός THz παλμού που έχει παραχθεί από έναν πομπό InAs. Συγκριτικά αναπαριστάται ο θόρυβος υποβάθρου.

Καθώς η προαναφερόμενη φασματοσκοπική μέτρηση εκτελείται καταγράφοντας την THz κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου, η τεχνική αυτή ονομάζεται φασματοσκοπία πεδίου χρόνου (ή αλλιώς TDS). Στην εικ. 3.1 αναπαριστάται το φάσμα ενός THz παλμού συγκρινόμενο με το θόρυβο υποβάθρου.

Η φασματική ανάλυση της THz-TDS,  $\delta\omega$ , ορίζεται από το χρονικό εύρος σάρωσης  $T$ . Το εύρος συχνότητας του φασματόμετρου περιορίζεται από την απόκριση της πηγής και του ανιχνευτή THz παλμών, ενώ το φάσμα είναι μαθηματικά σημαντικό μέσα σε ένα εύρος ζώνης  $\Delta\Omega$ , το οποίο σχετίζεται με το χρονικό διάστημα της δειγματοληψίας  $\delta t$ . Η ανάλυση του εύρους ζώνης και του φάσματος της THz-TDS δίνονται από την εξίσωση



$$\delta\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (2)$$

$$\Delta\Omega = \frac{2\pi}{\delta t}.$$

Όταν εφαρμόζεται ένας γρήγορος μετασχηματισμός Fourier, το φάσμα είναι συμμετρικό περίπου  $\Omega=0$ . Ως εκ τούτου, το εύρος συχνότητας κυμαίνεται από  $-1/(2\Omega)$  έως  $1/(2\Omega)$ . Προκειμένου να έχουμε ένα ομαλά υπολογισμένο THz φάσμα, μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική padding 0, η οποία προσθέτει αρκετές τιμές 0 στη μια ή και στις δυο πλευρές της THz κυματομορφής. Η συμπλήρωση με μηδενικά αυξάνει μαθηματικά το χρονικό εύρος σάρωσης  $T$  και δίνει έτσι περισσότερο ισχυρά σημεία δεδομένων στο THz φάσμα. Ωστόσο, η συμπλήρωση με μηδενικά δεν παρέχει επιπλέον πληροφορίες και δεν βελτιώνει τη φασματική ανάλυση.

Για τη μέτρηση της φασματικής απόκρισης ενός στόχου, πρέπει πρώτα να καταγραφεί η THz κυματομορφή ενός δείγματος αναφοράς, λχ του ελεύθερου χώρου (κενού). Η THz κυματομορφή του δείγματος αναφοράς ονομάζεται κυματομορφή αναφοράς. Η THz κυματομορφή που εκπέμπεται από το στόχο ονομάζεται κυματομορφή σήματος. Ο μετασχηματισμός Fourier της κυματομορφής αναφοράς και της κυματομορφής σήματος μας δίνει το φάσμα αναφοράς  $A_R$  και το φάσμα σήματος  $A_S$  αντίστοιχα. Οι φασματικές ιδιότητες του στόχου μπορούν να εξαχθούν από τη σύγκριση του φάσματος αναφοράς και του φάσματος σήματος.

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{A_R}{A_S} \quad (3)$$

$$n = 1 + \frac{[\varphi_s(\omega) - \varphi_R(\omega)]c}{d\omega},$$

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης,  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης,  $d$  είναι το πάχος του στόχου και  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Σε μια πραγματική μέτρηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυο δείγματα, ως το δείγμα και η αναφορά, με

την ίδια σύνθεση αλλά με διαφορετικό πάχος. Σε αυτή την περίπτωση, η απώλεια Fresnel στις επιφάνειες των δειγμάτων θα ακυρωθεί. Η εξίσωση (3) μας δίνει το αποτέλεσμα στη φασματοσκοπία εκπομπής. Ο σύνθετος δείκτης διάθλασης των δειγμάτων μπορεί επίσης να μετρηθεί με άλλους τύπους φασματοσκοπίας, όπως είναι η φασματοσκοπία αντανάκλασης και η φασματοσκοπία διάχυτης σκέδασης. Η ακριβής μαθηματική έκφραση δύναται να διαφέρει από την εξίσωση (3). Η φασματοσκοπία THz-TDS μετρά το ηλεκτρικό πεδίο ενός THz παλμού, που έχει πληροφορίες πλάτους και φάσης, και έτσι αναλύει τόσο τις απορροφητικές όσο και τις διαθλαστικές ιδιότητες του στόχου. Η THz-TDS μετρά απευθείας το σύνθετο δείκτη διάθλασης του στόχου και στη συνέχεια εξάγει τη σύνθετη διαπερατότητά του χωρίς τη χρήση της σχέσης Kramers-Kronig (K-K).

Η THz-TDS παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλους τύπους φασματοσκοπίας: προσφέρει μια συνεκτική φασματοσκοπική ανίχνευση σε ένα μεγάλο εύρος στα THz, πράγμα που είναι δύσκολο να επιτευχθεί με άλλες μεθόδους. Ο THz παλμός έχει διάρκεια παλμού ps, και έτσι έχει εγγενή υψηλή χρονική ανάλυση. Για το λόγο αυτό είναι κατάλληλος για δυναμική φασματοσκοπία. Η THz-TDS χρησιμοποιεί μεθόδους ανίχνευσης συμφωνίας, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της διαδικασίας συμφωνίας των φορέων. Επιπλέον, η THz-TDS χρησιμοποιεί τη μέθοδο time-gating κατά τη δειγματοληψία THz παλμών, μέθοδος η οποία μειώνει σημαντικά το θόρυβο υποβάθρου. Σαν αποτέλεσμα, ο λόγος σήματος προς θόρυβο της THz-TDS είναι πολύ μεγάλος. Η μέτρηση φασματοσκοπίας με υψηλή ακτινοβολία υποβάθρου που είναι συγκρίσιμη ή και ισχυρότερη από το σήμα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη.

Η THz-TDS παρουσιάζει επίσης προκλήσεις. Κατ' αρχάς, είναι συνήθως αργή λόγω της χρονικής δειγματοληψίας των THz παλμών. Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για τη βελτίωση της ταχύτητας των μετρήσεων της THz-TDS. Σήμερα η THz-TDS μπορεί να πραγματοποιήσει μια μέτρηση σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο με ένα σχετικά υψηλό SNR (signal to noise ratio). Επιπλέον, η THz-TDS έχει μικρή φασματική ανάλυση λόγω του περιορισμένου χρονικού εύρους σάρωσης T σε πραγματικές μετρήσεις. Κατ' αρχήν, η σάρωση ενός THz παλμού μπορεί να γίνεται για όσο χρόνο είναι αναγκαίο. Ωστόσο, μια μεγαλύτερης διάρκειας σάρωση όχι μόνο απαιτεί περισσότερο χρόνο για τη λήψη των δεδομένων, αλλά ταυτόχρονα μειώνει το δυναμικό εύρος του φασματόμετρου. Η σχέση ανάμεσα στο δυναμικό εύρος και στη

διάρκεια σάρωσης θα εξεταστεί λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο. Η περιορισμένη φασματική ανάλυση δεν αποτελεί πρόβλημα όταν μετράμε το φάσμα ενός στόχου σε συμπακνωμένη κατάσταση, του οποίου τα φασματικά χαρακτηριστικά συχνά έχουν εύρος ζώνης λίγα δέκατα THz. Η φασματική ανάλυση θα είναι όμως ανεπαρκής όταν μετρώνται αέρια. Για μια τέτοια μέτρηση προτιμάται μια πηγή cw-THz με στενό εύρος γραμμής.

Τόσο η THz-TDS όσο και η FTIR είναι τεχνικές φασματοσκοπίας στη μέση και μακρινή υπέρυθη ακτινοβολία. Η THz-TDS χρησιμοποιεί THz παλμούς που παράγονται χρησιμοποιώντας ένα fs laser ως πηγή φωτός, ενώ η FTIR συνήθως χρησιμοποιεί μια θερμική πηγή φωτός. Και οι δυο χρησιμοποιούν ευρυζωνικές πηγές και, αρχικά καταγράφουν το σήμα που βασίζεται στη χρονική καθυστέρηση και το παρουσιάζουν στο πεδίο του χρόνου και στη συνέχεια μετατρέπουν το σήμα στο πεδίο συχνότητας μέσω τους μετασχηματισμού Fourier. Ωστόσο, υπάρχουν σαφείς διαφορές ανάμεσα στις δυο τεχνικές φασματοσκοπίας.

Ένα τυπικό σύστημα THz-TDS καλύπτει το εύρος συχνότητας 0.1–3 THz. Μπορεί επίσης να ξεπεράσει τα 10 THz εάν χρησιμοποιηθεί ένας μικρότερος παλμός laser, ενώ μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και εύρος ζώνης 100 THz εάν χρησιμοποιηθεί ένας ακόμη πιο στενός χρονικά παλμός laser με έναν πιο λεπτό EO κρύσταλλο σαν πομπό και αισθητήρα. Εντούτοις, η μέτρηση του δυναμικού εύρους είναι συχνά περιορισμένη για ένα σύστημα THz-TDS με πολύ μεγάλο εύρος ζώνης. Η πηγή φωτός που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα FTIR μπορεί να καλύψει μια ευρύτερη ζώνη από τις κοινές πηγές THz παλμών. Ο περιορισμός ζώνης ενός φασματόμετρου FTIR εξαρτάται από τον ανιχνευτή του, ο οποίος συνήθως έχει χαμηλή απόκριση στις ακτινοβολίες χαμηλής συχνότητας, ενώ τα οπτικά μέσα στο φασματόμετρο FTIR επίσης μειώνουν το αξιοποιήσιμο φασματικό εύρος. Βασισμένη στη σύγχρονη τεχνολογία, η φασματοσκοπία FTIR μας δίνει συνήθως καλύτερα αποτελέσματα για συχνότητες πάνω από 10 THz, ενώ η φασματοσκοπία THz-TDS προτιμάται όταν οι σχετικές συχνότητες είναι κάτω από τα 3 THz. Οι δυο αυτές τεχνικές μας δίνουν μια συγκρίσιμη απόδοση μεταξύ 3 και 10 THz.

Η πηγή φωτός για ένα σύστημα THz-TDS είναι ένας THz παλμός, πράγμα που το καθιστά κατάλληλο για χρονο-αναλύσιμη φασματοσκοπία με χρονική ανάλυση σε κλίμακα ps. Το φασματόμετρο FTIR μπορεί επίσης να μετρήσει χρονο-αναλύσιμη

φασματοσκοπία, αλλά η χρονική της ανάλυση με τα βίαια ξεπερνάει την κλίμακα ns, η οποία περιορίζεται από την ταχύτητα της πηγής φωτός flash ή του οπτικού διαμορφωτή. Η φασματοσκοπία THz-TDS μετρά απευθείας το ηλεκτρικό πεδίο των THz παλμών. Έτσι, μετρά άμεσα το δείκτη απορρόφησης και διάθλασης του δείγματος. Η φασματοσκοπία FTIR μετρά την ισχύ του φωτός και μπορεί να αποκτήσει μόνο πληροφορίες πλάτους. Ο μετασχηματισμός Kramers-Kronig απαιτείται για την εύρεση του δείκτη διάθλασης του δείγματος. Στον πίνακα 3.1 συγκρίνεται η φασματοσκοπία THz-TDS και η φασματοσκοπία FTIR.

**Πίνακας 3.1** Σύγκριση της φασματοσκοπίας THz-TDS και της φασματοσκοπίας FTIR

	THz-TDS	FTIR
Εύρος ζώνης	0.1-100 THz	Πλήρες φάσμα
Ανώτατο εύρος	0.1-10 THz	>10 THz
Μετρήσιμο	Ηλεκτρικό πεδίο	Ισχύς
Χρονική ανάλυση	ps	ns
Συνοχή	Ναι	Όχι

### **Δυναμικό εύρος της φασματοσκοπίας THz-TDS**

Η μέτρηση του δυναμικού εύρους  $D(\omega)$  είναι αναγκαία στις φασματοσκοπικές μετρήσεις. Εάν η πηγή THz παλμών σε ένα φασματόμετρο δίνει ένα ηλεκτρικό πεδίο  $E(\omega)$  και το ισοδύναμο πεδίο θορύβου του ανιχνευτή είναι  $N(\omega)$ , τότε η μέτρηση του δυναμικού εύρους αυτού του φασματόμετρου είναι  $D(\omega)=E(\omega)/N(\omega)$ . Όταν το φασματόμετρο αυτό χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του φάσματος ενός στόχου πάχους  $d$ , η μείωση του THz κύματος που προκαλείται από το στόχο μπορεί να διακριθεί σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το εάν η απώλεια σχετίζεται με τα

χαρακτηριστικά του στόχου ή όχι. Για να απλοποιήσουμε τη συζήτηση, θεωρούμε ότι η απώλεια που σχετίζεται με το φασματικό χαρακτηριστικό του στόχου που μας ενδιαφέρει είναι ανεξάρτητο από τη συχνότητα. Η απώλεια αυτή μπορεί να περιγραφεί με τη χρησιμοποίηση του συντελεστή απορρόφησης του στόχου  $\alpha(\omega)$ . Εφόσον η φασματοσκοπία THz-TDS μετρά συνήθως απευθείας το ηλεκτρικό πεδίο και όχι την ισχύ της THz δέσμης, ορίζουμε εδώ  $\alpha(\omega)$  ως το συντελεστή απορρόφησης του ηλεκτρικού πεδίου. Για να απλοποιήσουμε ακόμη περισσότερο τη συζήτηση, θεωρούμε ότι ο στόχος έχει μόνο μια γραμμή απορρόφησης, η οποία είναι μια συνάρτηση δέλτα που βρίσκεται στο  $\omega = \omega_0$ . Το ηλεκτρικό πεδίο που ανιχνεύεται από το φασματόμετρο είναι

$$\begin{cases} E_D(\omega) = E(\omega)L & \omega \neq \omega_0 \\ E_D(\omega) = E(\omega)e^{-\alpha d} L & \omega = \omega_0 \end{cases}, \quad (4)$$

όπου  $L$  είναι η απώλεια που δεν εξαρτάται από τη συχνότητα. Προκειμένου να προσδιοριστεί η δυνατότητα απορρόφησης, η διαμόρφωση του THz πεδίου που προκαλείται από τη γραμμή απορρόφησης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το ισοδύναμο του θορύβου πεδίο του συστήματος.

$$E(\omega_0)L[1 - e^{-\alpha d}] > N(\omega_0). \quad (5)$$

Όταν  $\alpha d \ll 1$ , η εξίσωση (5) γίνεται

$$D(\omega_0) \equiv \frac{E(\omega_0)}{N(\omega_0)} > \frac{1}{\alpha d} \frac{1}{L} \quad (6)$$

Η εξίσωση (6) δείχνει τη σημασία της μέτρησης του δυναμικού εύρους: η συσκευή εικονοληψίας THz κυμάτων μπορεί να ταυτοποιήσει φασματικά χαρακτηριστικά του στόχου μόνο αν έχει επαρκές δυναμικό εύρος.

Μια άλλη κρίσιμη παράμετρος της φασματοσκοπίας THz-TDS είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), που ορίζεται ως το μέγιστο πλάτος της THz κυματομορφής προς το θόρυβο στο σύστημα ανίχνευσης. Όπως έχουμε ήδη εξετάσει, μέσω της τεχνικής time-gating η φασματοσκοπία THz-TDS έχει συνήθως πολύ μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Ωστόσο, ο SNR στις μετρήσεις πεδίου χρόνου δεν είναι πάντα ίσος με το πραγματικό δυναμικό εύρος του συστήματος THz-TDS. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη σχέση μεταξύ του SNR στη μέτρηση πεδίου χρόνου και του δυναμικού εύρους του φασματόμετρου.

Υπάρχουν δυο κύριες πηγές θορύβου στο παλμικό THz σύστημα. Αυτή που προέρχεται από τη δέσμη laser ανίχνευσης,  $N_b$ , και αυτή που προέρχεται από τους THz παλμούς,  $N_{THz}$ . Η  $N_{THz}$  είναι ανάλογη προς το THz πεδίο και μπορεί να γραφεί:

$$N_{THz}(t) = R(t)E(t), \quad (7)$$

όπου  $R(t)$  είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που δίνει τη σχέση ανάμεσα στο θόρυβο που σχετίζεται με το THz κύμα και το THz πεδίο. Τόσο η  $N_b$  και η  $R(t)$  μπορούν να θεωρηθούν τυχαίες συναρτήσεις του χρόνου. Οι τυπικές αποκλίσεις των  $N_b$  και  $R(t)$ , που συμβολίζονται  $\sigma_B$  και  $\sigma_R$  αντίστοιχα, προσδιορίζουν το επίπεδο θορύβου στην THz μέτρηση πεδίου χρόνου. Για να διακρίνουμε το θόρυβο υποβάθρου από το θόρυβο που δημιουργείται από τα THz κύματα, ονομάζουμε το λόγο ανάμεσα στο THz πλάτος  $A$  και την τυπική απόκλιση του θορύβου υποβάθρου  $\sigma_B$ , δυναμικό εύρος της μέτρησης πεδίου χρόνου, και ονομάζουμε  $1/\sigma_R$  τη μέτρηση SNR. Αξίζει να σημειώσουμε ότι ο ορισμός του SNR διαφέρει από αυτόν που είχε οριστεί στην αρχή της παραγράφου. Σε ένα τυπικό παλμικό THz σύστημα, ο θόρυβος που δημιουργείται από τα THz κύματα συνήθως επικρατεί του θορύβου υποβάθρου. Για το λόγο αυτό, και οι δύο ορισμοί δίνουν παρόμοια αποτελέσματα.

Εάν η χρονική ανάλυση στη φασματοσκοπία THz-TDS είναι  $\delta t$ , και το συνολικό εύρος σάρωσης είναι  $T$ , το εύρος και η ανάλυση του φάσματος μπορούν να υπολογιστούν με βάση την εξίσωση (2). Στις περισσότερες περιπτώσεις, τόσο η  $\sigma_B$  και η  $\sigma_R$  δεν εξαρτώνται από το THz φάσμα. Αυτοί οι θόρυβοι, ως συναρτήσεις συχνότητας στο εξαχθέν φάσμα, οφείλονται αποκλειστικά στη μέτρηση. Κατά πάσα πιθανότητα, αποτελούν συνδυασμό λευκού θορύβου και θορύβου 1/f. Καθώς η λεπτομερής κατανομή του θορύβου δεν επηρεάζει τη συζήτηση, θεωρούμε και τις δυο αυτές πηγές θορύβου ως ανεξάρτητες της συχνότητας. Η THz πηγή έχει παλμικό πλάτος  $T'$  και εύρος ζώνης  $\Omega'$ . Σε μια μέτρηση TDS έχουμε πάντα  $T \geq T'$  και  $\Omega \geq \Omega'$ , και κατά συνέπεια το επίπεδο θορύβου στο THz φάσμα είναι

$$\rho_{THz} = \sqrt{\frac{\delta t}{2\pi}} \sigma_R A_K, \quad (8)$$

$$\rho_B = \sqrt{\frac{\delta t T}{2\pi}} \sigma_B.$$

Εδώ  $\kappa = A^{-1} \sqrt{\int |E(t)|^2 dt}$  είναι η μέση τετραγωνική ρίζα του THz πεδίου ομαλοποιημένη από το πλάτος του. Η εξίσωση (8) δείχνει ότι στο πεδίο της συχνότητας ο θόρυβος που προκαλείται από τα THz κύματα δε σχετίζεται με το χρονικό εύρος της σάρωσης  $T$ , ενώ ο θόρυβος υποβάθρου είναι ανάλογος προς την τετραγωνική ρίζα του  $T$ .

Το μετρούμενο δυναμικό εύρος του φασματομέτρου THz, είναι

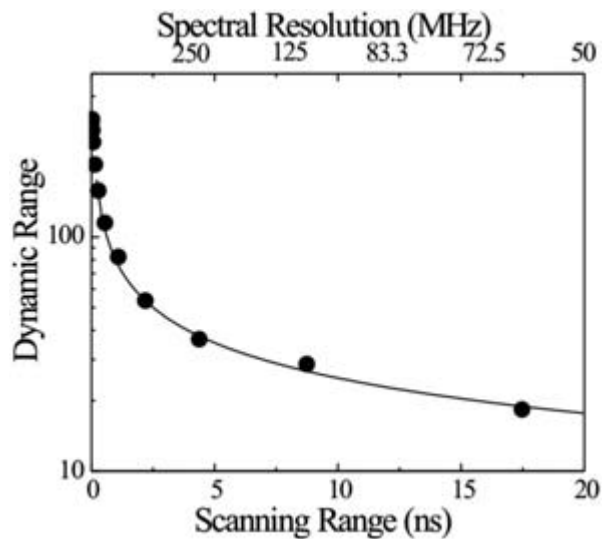
$$D(\omega) = \frac{k(\omega)}{\sqrt{\frac{\delta t}{2\pi} \left(\frac{\kappa}{S}\right)^2 + \frac{T \delta t}{2\pi} \frac{1}{D^2}}}, \quad (9)$$

όπου  $k(\omega) = E(\omega)/A$  είναι το ομαλοποιημένο φάσμα του THz παλμού. Στον πίνακα 3.2 δίνεται η έκφραση των  $k(\omega)$  και  $\kappa^2$  που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την

παρουσίαση ορισμένων τυπικών THz κυματομορφών. Η εικ. 3.2 παρουσιάζει το μετρούμενο δυναμικό εύρος ενός φασματόμετρου σαν συνάρτηση της φασματικής ανάλυσης.

**Πίνακας 3.2**  $k(\omega)$  και  $\kappa^2$  για τυπικές THz κυματομορφές

Πομπός	Περιγραφή	Κυματομορφή	$k(\omega)$	$\kappa^2$
Κεραία PC	μονοπολική	$2A \frac{t}{\tau^2} e^{-t^2/\tau^2}$	$\frac{\omega\tau}{\sqrt{2}} e^{-\omega^2\tau^2/4}$	$\frac{\sqrt{2\pi}}{2\tau}$
Πεδίο επιφάνειας	διπολικό	$\frac{2A}{\tau^2} e^{-t^2/\tau^2} - 4A \frac{t^2}{\tau^4} e^{-t^2/\tau^2}$	$\frac{\omega^2\tau}{\sqrt{2}} e^{-\omega^2\tau^2/4}$	$\frac{3\sqrt{2\pi}}{2\tau^3}$
Οπτική ανόρθωση	Φθίνουσας ταλάντωσης	$A \sin(\omega_0 t) e^{-\alpha t} \quad t > 0$ $0 \quad t < 0$	$\frac{\omega_0^2}{\sqrt{[\alpha^2 + (\omega_0 - \omega)^2][\alpha^2 + (\omega_0 + \omega)^2]}}$	$\frac{\omega_0^2}{4\alpha(\alpha^2 + \omega_0^2)}$



**Εικ. 3.2** Δυναμικό εύρος ενός THz φασματόμετρου σαν συνάρτηση της φασματικής του ανάλυσης

Είναι σαφές ότι υψηλότερη φασματική ανάλυση οδηγεί σε χαμηλότερο δυναμικό εύρος. Η εξίσωση (9) δείχνει επίσης ότι το μετρούμενο δυναμικό εύρος σχετίζεται με το πλάτος του βήματος δειγματοληψίας στο πεδίο του χρόνου. Η εξίσωση (2) δείχνει



ότι το πλάτος του βήματος δειγματοληψίας  $\delta t$  καθορίζει το συνολικό εύρος συχνότητας στο φάσμα. Όταν  $1/\delta t$  είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης των THz παλμών, στενότερο πλάτος του βήματος δειγματοληψίας δεν οδηγεί σε πιο χρήσιμο εύρος ζώνης του φάσματος. Ωστόσο, παρέχει μεγαλύτερο δυναμικό εύρος στο πεδίο συχνότητας.

Σύμφωνα με την εξίσωση (6), για τον προσδιορισμό ενός δείγματος μέσω των φασματικών του χαρακτηριστικών, το φασματόμετρο THz κυμάτων πρέπει να δώσει επαρκές δυναμικό εύρος στο πεδίο συχνότητας. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (6) και (9) οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η πιθανή φασματική ανάλυση, που μπορεί ένα σύστημα THz-TDS να παρέχει, περιορίζεται από το δυναμικό εύρος της μέτρησης στο πεδίο του χρόνου.

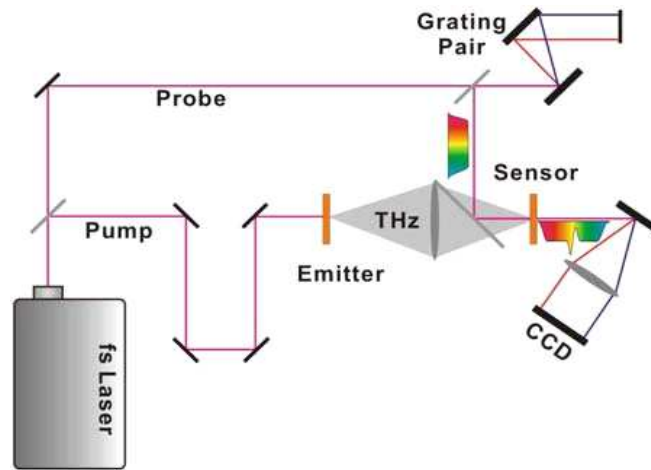
$$\delta\nu \geq \frac{1}{2\Omega} \left( \frac{1}{\alpha dk(\omega) D e^{-\beta d}} \right)^2. \quad (10)$$

Η σχέση ανάμεσα στο μετρούμενο δυναμικό εύρος και την πιθανή φασματική ανάλυση μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητή. Η THz παλμική ενέργεια κατανέμεται σε ολόκληρο το εύρος ζώνης της. Υψηλότερη φασματική ανάλυση σημαίνει ότι πρέπει να ανιχνεύσουμε ενέργεια που περιέχεται σε στενότερο, και άρα που περιέχει λιγότερη ενέργεια, εύρος ζώνης. Σαν αποτέλεσμα, το δυναμικό εύρος του φασματόμετρου είναι αντιστρόφως ανάλογος προς τη φασματική του ανάλυση. Καθώς από τη φασματοσκοπία THz-TDS μετριέται το ηλεκτρικό πεδίο και όχι η ισχύς, η πιθανή φασματική ανάλυση είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο του δυναμικού εύρους στη μέτρηση στο πεδίο του χρόνου. Ένα μικρότερο πλάτος βήματος δειγματοληψίας υπολογίζει κατά μέσο όρο τη μέτρηση, και έτσι ενισχύει το μετρούμενο δυναμικό εύρος στο πεδίο της συχνότητας.

## **Ανίχνευση THz κυματομορφής με τη χρήση ενός παλμού Laser**

Η δειγματοληψία μιας THz κυματομορφής απαιτεί συνήθως μια σειρά THz παλμών και παλμών ανίχνευσης με διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις. Ωστόσο, εάν το

THz πεδίο είναι αρκετά ισχυρό, μπορούμε να “πιάσουμε” ολόκληρη την THz κυματομορφή χρησιμοποιώντας έναν μόνο παλμό laser.

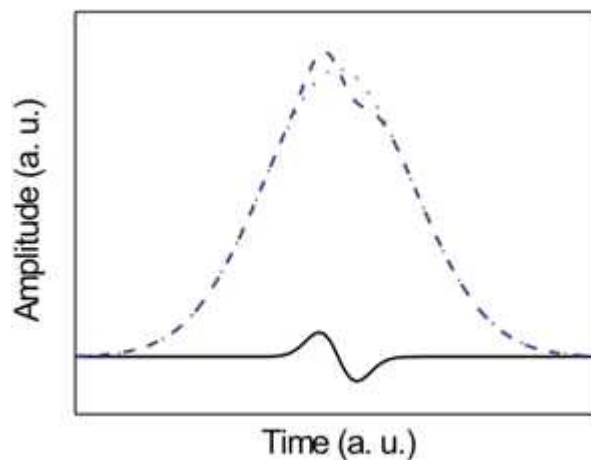


Εικ. 3.3 Οπτική εγκατάσταση ενός συστήματος ανίχνευσης παλμού chirped.

Μπορούμε να εφαρμόσουμε διάφορες μεθόδους για την ανίχνευση THz κυματομορφής με τη χρήση ενός παλμού laser, συμπεριλαμβανομένης της μέτρησης της THz κυματομορφής μέσω της χωρικής κατανομής ή μέσω της φασματικής κατανομής του παλμού ανίχνευσης. Η τεχνική ανίχνευσης με τη χρήση ενός παλμού laser παρέχει μια σημαντική μείωση του χρόνου λήψης και επεκτείνει σε μεγάλο βαθμό την εφαρμοσιμότητα των THz συστημάτων σε καταστάσεις στις οποίες το δείγμα είναι δυναμικό ή κινούμενο.

Η εικ. 3.3 παρουσιάζει την έννοια της μέτρησης της THz κυματομορφής χρησιμοποιώντας έναν chirped παλμό ανίχνευσης. Η κατασκευή είναι παρόμοια με μια τυπική THz-TDS μέτρηση, στην οποία μια δέσμη ultrafast laser διασπάται σε μια δέσμη ανίχνευσης και μια δέσμη άντλησης, όπου η δέσμη άντλησης χρησιμοποιείται για την παραγωγή THz παλμών ενώ η δέσμη ανίχνευσης για την ανίχνευση αυτών των παλμών. Ωστόσο, στο σύστημα ανίχνευσης chirped παλμού δεν υπάρχει κάποιο όργανο σάρωσης της καθυστέρησης. Αντ' αυτού, ο οπτικός παλμός ανίχνευσης είναι chirped - συχνότητας και εκτεινόμενος χρονικά μέσω ενός ζεύγους εσχάρας από υπο-ps σε κάποιες δεκάδες ps. Το αρνητικό chirp της εσχάρας κάνει τη μπλε συνιστώσα να κυριαρχεί της κόκκινης συνιστώσας. Η απόδοση της εσχάρας είναι ένας παλμός με

μεγαλύτερη παλμική διάρκεια και μήκος κύματος που μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο. Ο chirped παλμός ανίχνευσης διαμορφώνεται από τον THz παλμό όταν αναμειγνύονται σε έναν κρύσταλλο EO. Εννοιολογικά, ο chirped παλμός ανίχνευσης μπορεί να ιδωθεί ως μια διαδοχή βραχέων παλμών με διαφορετικό μήκος κύματος έκαστος. Κάθε μια από τις συνιστώσες του μήκους κύματος κωδικοποιεί ένα διαφορετικό τμήμα του THz παλμού. Ένα φασματόμετρο διαχωρίζει χωρικά τις διαφορετικές συνιστώσες του μήκους κύματος αποκαλύπτοντας έτσι το χρονικό THz παλμό. Η απόδοση χωρικού σήματος του φασματόμετρου μετράται μέσω ενός CCD. Η εικ. 3.4 μας δίνει τους εγγεγραμμένους από το CCD παλμούς ανίχνευσης χωρίς και με τον THz παλμό. Για μέγιστη ταχύτητα της λήψης εικόνας, οι THz παλμοί άντλησης και ανίχνευσης μπορούν να επεκταθούν στην κάθετη διάσταση χρησιμοποιώντας κυλινδρικούς φακούς. Έτσι το CCD μπορεί να πιάσει τις χρονικές THz κυματομορφές και ταυτόχρονα μερικές εκατοντάδες κάθετα pixels, ενώ απαιτείται μόνο ένα στάδιο μετάφρασης για τη φασματική εικονοληψία.



**Εικ. 3.4** Εξαγωγή THz κυματομορφής χρησιμοποιώντας τη μέτρηση chirped παλμού.

Θεωρούμε ότι ο παλμός ανίχνευσης αρχικά έχει μια Gaussian κατανομή τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και της συχνότητας και ότι η κεντρική της συχνότητα είναι  $\omega_0$ . Εάν ληφθεί υπόψη μόνο δεύτερης τάξης διασπορά, και αγνοηθεί διασπορά τρίτης και ανώτερης τάξης του ζεύγους εσχάρας, τα ηλεκτρικά πεδία του παλμού ανίχνευσης πριν και μετά το chirping είναι:

$$E_0(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{T_0^2} - i\omega_0 t\right), \quad (11)$$

$$E_C(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{T_C^2} - iat^2 - i\omega_0 t\right),$$

όπου  $T_0$  και  $T_C$  είναι τα παλμικά πλάτη του παλμού ανίχνευσης πριν και μετά το chirping αντίστοιχα, και  $a$  είναι ο λόγος chirping του παλμού. Όταν ο chirped παλμός διαμορφωθεί από τους THz παλμούς το ηλεκτρικό του πεδίο είναι:

$$E_m(t) = E_C(t)[1 + kE_{THz}(t - \tau)], \quad (12)$$

$k$  είναι ο παράγοντας διαμόρφωσης, που δείχνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο του παλμού ανίχνευσης έχει επηρεαστεί από το THz πεδίο. Το  $\tau$  συμβολίζει τη σχετική χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στον THz παλμό και στον παλμό ανίχνευσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις το  $kE_{THz}$  είναι μικρότερο από 1. Η διαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου στις διάφορες συνιστώσες συχνότητας είναι

$$N(\omega) \equiv \frac{I(\omega)|_{THzOn} - I(\omega)|_{THzOff}}{I(\omega)|_{THzOff}} \quad (13)$$

$$= \frac{\int g(\omega - \bar{\omega}) 2kE(t_{\bar{\omega}} - \tau) \exp(-2t_{\bar{\omega}}^2/T_{\bar{\omega}}^2) d\bar{\omega}}{\int g(\omega - \bar{\omega}) \exp(-2t_{\bar{\omega}}^2/T_{\bar{\omega}}^2) d\bar{\omega}}$$

$$\propto 2kE_{THz}(t_{\bar{\omega}} - \tau).$$

εδώ  $I(\omega)$  είναι η ισχύς του παλμού ανίχνευσης στο πεδίο της συχνότητας, που μπορεί να οριστεί ως ισχύς με ή χωρίς THz πεδίο.  $g(\omega - \dots)$  είναι η φασματική συνάρτηση του φασματόμετρου.  $t\omega$  ορίζεται ως  $t\omega \equiv (\omega\theta - \omega)/2a$ . Η εξίσωση (13) δείχνει ότι η διαμόρφωση της ισχύος του παλμού ανίχνευσης στο πεδίο της συχνότητας είναι γραμμικά ανάλογη προς το ηλεκτρικό πεδίο του THz παλμού στο πεδίο του χρόνου.

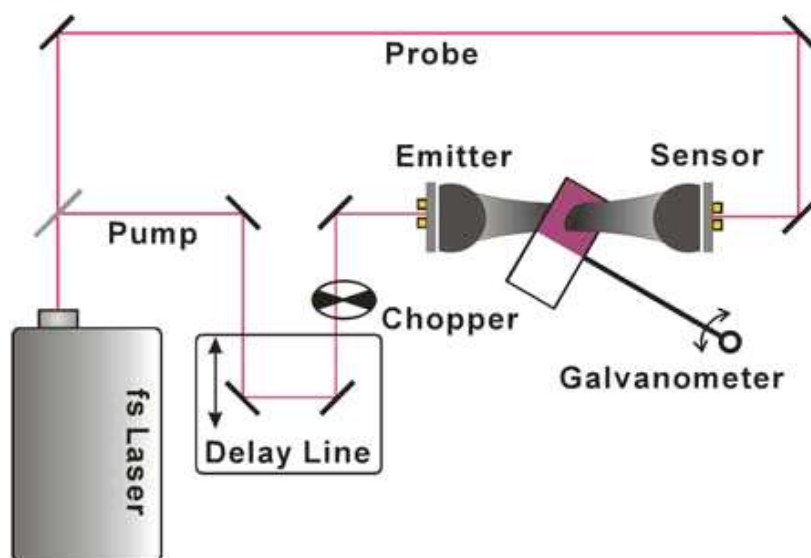
Σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg, υψηλότερη χρονική ανάλυση απαιτεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Όταν ο παλμός ανίχνευσης είναι chirped και χρησιμοποιείται μόνο ένα τμήμα της συνιστώσας της συχνότητας για τη δειγματοληψία ενός χρονικού παραθύρου στην THz κυματομορφή, τότε η χρονική ανάλυση δεν θα είναι τόσο υψηλή όσο του αρχικού παλμού. Εάν ο αρχικός παλμός είναι περιορισμένου μετασχηματισμού, τότε η παραγωγή του χρόνου-εύρους ζώνης θα είναι μια σταθερά  $T\Omega\theta = k$ , η τιμή της οποίας εξαρτάται από το πραγματικό σχήμα του παλμού, δηλ. 0.44 για έναν Gaussian παλμό. Όταν ο παλμός είναι chirped, το παλμικό του πλάτος γίνεται  $T_C$  ενώ διατηρεί το ίδιο εύρος ζώνης. Μπορούμε να αποκτήσουμε την βέλτιστη χρονική ανάλυση εάν όλες οι συνιστώσες της συχνότητας που χρησιμοποιούνται στη μέτρηση της THz κυματομορφής παραμείνουν περιορισμένου μετασχηματισμού, που είναι η συνιστώσα με εύρος ζώνης  $\delta\Omega$  που μας δίνει χρονική ανάλυση  $\delta T = k/\delta\Omega$ . Σε αυτή την περίπτωση, η χρονική ανάλυση  $\delta T$  είναι:

$$\begin{aligned}\delta T &= \frac{T_C}{\Omega/\delta\Omega} \quad (14) \\ &= \sqrt{T_o T_C}.\end{aligned}$$

Η εξίσωση (14) μας δίνει τη βέλτιστη δυνατή χρονική ανάλυση της μεθόδου μέτρησης chirped παλμού. Η χρονική ανάλυση είναι γραμμικά ανάλογη προς την τετραγωνική ρίζα του πλάτους του παλμού τόσο για τον αρχικό παλμό όσο και για τον chirped παλμό. Ένας μεγαλύτερος chirped παλμός θα έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερη χρονική ανάλυση.

## Διαφορική THz Φασματοσκοπία

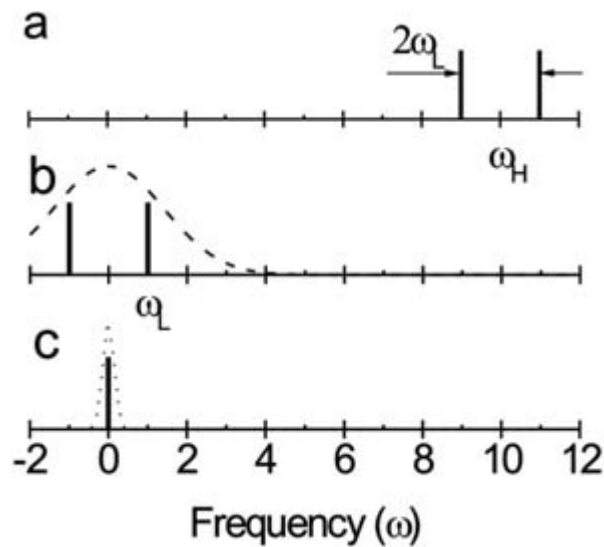
Η τεχνολογία lock-in χρησιμοποιείται συνήθως στην THz-TDS μέτρηση προκειμένου να μειώσει το θόρυβο υποβάθρου. Για να χρησιμοποιήσουμε την τεχνολογία lock-in, το ανιχνεύσιμο σήμα διαμορφώνεται σε μια ορισμένη συχνότητα. Η συχνότητα διαμόρφωσης χρησιμοποιείται σαν τη συχνότητα αναφοράς του lock-in ενισχυτή. Μόνο μια συγκεκριμένη συνιστώσα μέσα στην είσοδο, αυτή που έχει την ίδια συχνότητα και ορισμένη μετατόπιση φάσης με την αναφορά, ενισχύεται και καταγράφεται. Όλες οι υπόλοιπες συνιστώσες αποκλείονται από την καταγραφή. Έτσι, αποβάλλεται ένας τεράστιος θόρυβος λόγω της διαλογής συχνότητας και φάσης. Η χρήση της τεχνολογίας lock-in μπορεί να χαμηλώσει το επίπεδο του θορύβου στο 10... του αρχικού επιπέδου του θορύβου. Με τη χρήση της τεχνολογίας lock-in στην THz-TDS μέτρηση, διαμορφώνοντας την THz πηγή, μπορούμε να μειώσουμε αποτελεσματικά το θόρυβο υποβάθρου που παράγεται στο σύστημα ανίχνευσης, όπως αυτόν που συνδέεται με τη δέσμη ανίχνευσης laser. Ωστόσο, η τεχνική αυτή δεν μπορεί να μειώσει το θόρυβο που σχετίζεται με τα THz κύματα, καθώς ο θόρυβος διαμορφώνεται στην ίδια συχνότητα. Όταν ο στόχος είναι μια λεπτή μεμβράνη ή ένα υλικό εντοπισμού, προκαλεί μια ασθενή διαμόρφωση στο THz πεδίο. Η ασθενής αυτή διαμόρφωση μπορεί να θαφτεί κάτω από το θόρυβο που σχετίζεται με το THz πεδίο. Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο διαφορικής φασματοσκοπίας, η οποία μετρά απευθείας τη διαφορά μεταξύ στόχου και αναφοράς.



Εικ. 3.5 Πειραματική εγκατάσταση ενός διαφορικού THz φασματόμετρου στο πεδίο του χρόνου.

Η εικ. 3.5 παρουσιάζει την έννοια της διαφορικής THz φασματοσκοπίας στο πεδίο του χρόνου, στην οποία χρησιμοποιείται μια διπλή τεχνική lock-in. Οι δυο ενισχυτές lock-in συνδέονται σειριακά. Ο ένας από αυτούς χρησιμοποιεί μεγαλύτερη συχνότητα αναφοράς  $\omega_H$  με μικρότερη σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης  $T_H$ . Η έξοδος του ενισχυτή lock-in χρησιμοποιείται σαν είσοδος του δεύτερου ενισχυτή lock-in, ο οποίος χρησιμοποιεί χαμηλότερη συχνότητας αναφοράς  $\omega_L$  και μεγαλύτερη σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης  $T_L$ . Η εικ. 3.6 δείχνει τη διαδικασία της τεχνολογίας διπλού lock-in. Προκειμένου να λειτουργήσει η τεχνική διπλού lock-in, πρέπει να ικανοποιηθεί η ακόλουθη σχέση:

$$\omega_H \gg 1/T_H \gg \omega_L \gg 1/T_L. \quad (15)$$



**Εικ. 3.6** Έννοια της τεχνικής διπλού lock-in. (α) Κατανομή συχνότητας σήματος που έχει διαμορφωθεί από δυο συχνότητες, (β) η συχνότητα του σήματος μετατοπίζεται από  $-\omega_H$  μετά από τον πρώτο ενισχυτή, και (γ) η συχνότητα του σήματος μετατοπίζεται από  $-\omega_L$  μετά από το δεύτερο ενισχυτή.

Στις μετρήσεις διαφορικής φασματοσκοπίας η THz ακτίνα περνά εναλλάξ μέσα από το δείγμα και την αναφορά με συχνότητα  $\omega_L$ . Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα γαλβανόμετρο για να ανακινεί το δείγμα μέσα και έξω από την THz ακτίνα. Η THz πηγή διαμορφώνεται, πχ χρησιμοποιώντας έναν οπτικό chopper

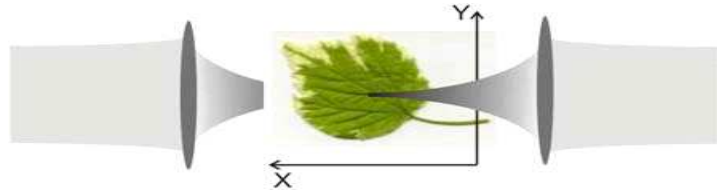
με συχνότητα  $\omega_H$ . Ο πρώτος ενισχυτής lock-in, με τη μεγαλύτερη συχνότητα αναφοράς, χρησιμοποιείται για τη μείωση του θορύβου υποβάθρου που σχετίζεται με το σύστημα ανίχνευσης, όπως η διακύμανση του ηλεκτρικού ρεύματος της δέσμης ανίχνευσης laser, ενώ ο δεύτερος ενισχυτής lock-in, με τη χαμηλότερη συχνότητα αναφοράς, χρησιμοποιείται για να μειώσει το θόρυβο που σχετίζεται με το THz κύμα.

## Απεικόνιση THz κύματος

Ακριβώς όπως και οι παρακείμενες ζώνες, τα μικροκύματα και η υπέρυθρη ακτινοβολία, τα THz κύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα απεικόνισης σε μια ποικιλία εφαρμογών. Η απεικόνιση Terahertz κύματος είναι ελκυστική για πολλούς λόγους: η ακτινοβολία είναι μη ιονίζουσα και δημιουργεί πολύ λίγους κινδύνους ασφάλειας, είναι ικανή για χωρική ανάλυση υποχιλιοστού και ένας σημαντικός αριθμός υλικών, όπως το χαρτί, το πλαστικό και το χαρτόνι είναι σχετικά διαφανείς στην εν λόγω ζώνη συχνοτήτων. Η εικ. 3.7 παρουσιάζει την έννοια της απεικόνισης σάρωσης raster THz κυμάτων. Το THz κύμα εστιάζεται από έναν φακό ή παραβολικό κάτοπτρο. Ο στόχος τοποθετείται απέναντι από την THz ακτίνα στο εστιακό σημείο της. Τότε, υφίσταται σάρωση raster σε ένα επίπεδο κάθετο στην THz ακτίνα. Η εκπομπή ή αντανάκλαση THz κύματος από κάθε σημείο του στόχου καταγράφεται, πράγμα που σχηματίζει την εικόνα THz κύματος του στόχου.

Σε αντίθεση με μια κοινή οπτική εικόνα ή εικόνα ακτίνας X, κάθε pixel μιας παλμικής εικόνας THz κύματος περιέχει ολόκληρη την THz κυματομορφή και όχι μόνο την ισχύ της ακτίνας. Ο μετασχηματισμός Fourier της THz κυματομορφής εξάγει τις φασματικές πληροφορίες του pixel. Έτσι, η απεικόνιση THz κύματος δεν προσδιορίζει μόνο το στόχο της από το προφίλ του, αλλά λαμβάνει και πληροφορίες για τη σύνθεση αυτού. Εκτός από την κατανομή αντανάκλασης, η παλμική απεικόνιση THz κύματος μπορεί επίσης να φτιάξει το προφίλ του στόχου ανάλογα με την κατανομή του δείκτη διάθλασής του, πράγμα που προκαλεί αλλαγή φάσης του THz παλμού. Η εικ. 3.8 δείχνει την εικόνα ενός THz κύματος του σήματος του νερού σε ένα χαρτονόμισμα των 100 δολαρίων που δημιουργήθηκε από την αλλαγή φάσης των THz παλμών.



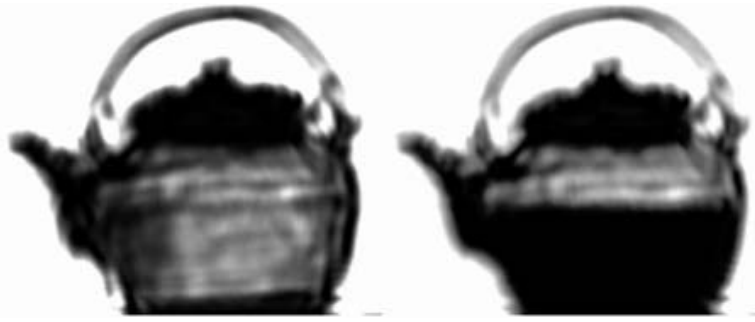


**Εικ. 3.7** Έννοια της απεικόνισης THz κύματος μέσω σάρωσης raster



**Εικ. 3.8** εικόνα ενός THz κύματος του σήματος του νερού σε ένα χαρτονόμισμα των 100 δολαρίων

Η απεικόνιση με THz παλμούς απαιτεί σάρωση σε τρεις διαστάσεις, περιλαμβάνοντας το χώρο (2-D) και το χρόνο (1-D), έτσι είναι συνήθως πολύ χρονοβόρα. Εάν δεν απαιτούνται φασματικές πληροφορίες, μπορούμε να απεικονίσουμε το THz κύμα ενός στόχου σε μια ορισμένη χρονική καθυστέρηση, όπως στην κορυφή της THz κυματομορφής. Κατά τη σάρωση του στόχου απέναντι από την THz ακτίνα καταγράφεται μόνο το μήκος του THz πεδίου. Μια παρόμοια λήψη εικόνας μπορούμε να έχουμε και με τη χρήση μιας cw-THz πηγής, εγγράφοντας την ισχύ της εκπομπούμενης ή αντανακλούμενης THz ακτίνας. Η εικ. 3.9 δείχνει την εκπομπή εικόνων cw-THz κύματος μιας τσαγιέρας όταν αυτή είναι άδεια και όταν είναι μισογεμάτη με νερό. Στον πίνακα 3.3 συγκρίνονται η παλμική απεικόνιση και η απεικόνιση cw-THz κύματος.



**Εικ. 3.9** Εικόνες cw-THz κύματος μιας τσαγιέρας. Στ' αριστερά μια άδεια τσαγιέρα, ενώ στα δεξιά μια μισογεμάτη.

**Πίνακας 3.3** Σύγκριση συστημάτων απεικόνισης cn και παλμικού THz κύματος

	Απεικόνιση cw-THz κύματος	Απεικόνιση παλμικού THz κύματος
Κόστος	\$50,000–\$150,000	\$200,000–\$1,000,000
Πολυπλοκότητα συστήματος	Χαμηλή	Υψηλή
Βάρος	3 kg	10 kg
Ταχύτητα	100,000 point/s	<4,000 point/s
Πολυπλοκότητα δεδομένων	Χαμηλή	Υψηλή
Φασματικές πληροφορίες	Όχι	Ναι
Πληροφορίες βάθους	Όχι	Ναι
Δείκτης διάθλασης	Όχι	Ναι

Εκτός από χρονοβόρα, η απεικόνιση THz κύματος παρουσιάζει και άλλες προκλήσεις. Τα THz κύματα παρουσιάζουν υψηλή αντανακλαστικότητα από τις μεταλλικές επιφάνειες με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διαπεράσουν τα μεταλλικά δοχεία. Επίσης, τα THz κύματα απορροφώνται σε μεγάλο βαθμό από το νερό με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διαπεράσουν υλικό που περιέχει μεγάλη ποσότητα νερού. Η απεικόνιση THz κύματος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις ιατρικές διαγνώσεις εσωτερικών στο ανθρώπινο σώμα οργάνων παρά μόνο σε ενδοσκοπικές τεχνικές. Επιπλέον, καθώς τα THz κύματα έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος από τα ορατά και τα IR κύματα, η απεικόνιση της χωρικής ανάλυσης του THz κύματος περιορίζεται στο υποχιλιοστό στο μακρινό πεδίο. Η απεικόνιση εγγύς πεδίου πρέπει

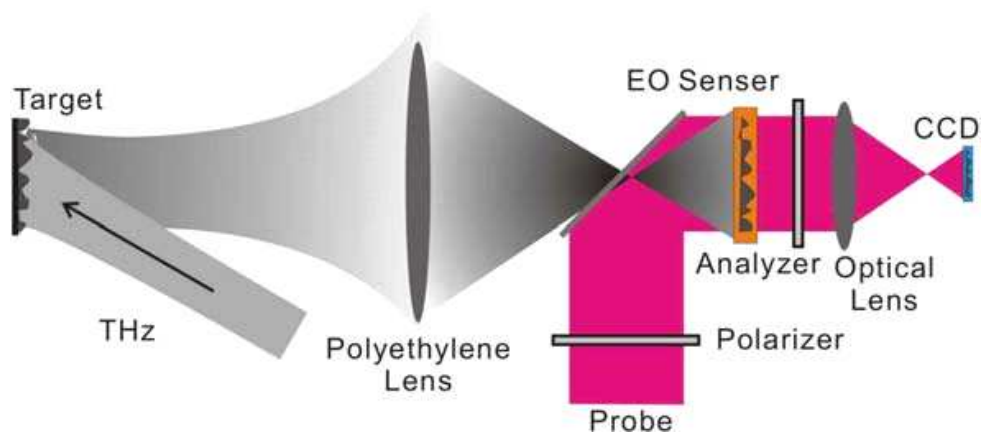
να χρησιμοποιείται για το ξεπέρασμα του περιθλαστικού ορίου για ακόμα υψηλότερη χωρική ανάλυση.

## **Απεικόνιση THz κύματος Εστιακού Επιπέδου 2D**

Η απεικόνιση THz κύματος με τη μέθοδο σάρωσης Raster χρησιμοποιεί ολόκληρη την THz ακτινοβολία που παράγεται από τον πομπό για να ερευνηθεί κάθε pixel της εικόνας, προσφέροντας έτσι έναν πολύ μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο. Ωστόσο, η ταχύτητα της γραμμικής μεταφοράς στόχου με πεπερασμένη μάζα μπρος και πίσω είναι αρκετά περιορισμένη. Ο χαμηλός ρυθμός καρέ είναι ένα από τα σημαντικά τεχνικά εμπόδια που αποκλείουν πραγματικές εφαρμογές της απεικόνισης THz κύματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια παρόμοια μέθοδος που χρησιμοποιείται στο παραδοσιακό οπτικό σύστημα απεικόνισης, την οπτική απεικόνιση THz κύματος, που μπορεί να είναι ένας φακός ή ένα κοίλο κάτοπτρο που απεικονίζει απευθείας την εκπομπή ή αντανάκλαση του THz κύματος από το στόχο στον εκτεταμένο αισθητήρα THz κύματος. Η εικόνα THz κύματος του στόχου καταγράφεται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας τον εκτεταμένο αισθητήρα. Καθώς δεν απαιτείται σάρωση, η εικόνα THz κύματος 2D μειώνει σε μεγάλο βαθμό το χρόνο λήψης. Ο εκτεταμένος αισθητήρας THz κύματος μπορεί να είναι μια διάταξη ανιχνευτών THz κύματος, όπως η διάταξη πυροηλεκτρικού ανιχνευτή, η διάταξη μικροβολόμετρου, η διάταξη ετερόδυνου ανιχνευτή κα. Όταν χρησιμοποιούμε EO δειγματοληψία για την ανίχνευση THz κύματος, ο εκτεταμένος αισθητήρας μπορεί να είναι ένας EO κρύσταλλος με επαρκές διάφραγμα.

Η εικ. 3.10 παρουσιάζει την έννοια της λήψης του συστήματος απεικόνισης THz κύματος Εστιακού Επιπέδου 2-D χρησιμοποιώντας έναν EO κρύσταλλο με μεγάλο διάφραγμα. Μια οπτική απεικόνιση THz κύματος, όπως οι φακοί πολυαιθυλενίου, χρησιμοποιείται για το σχηματισμό της εικόνας του THz κύματος του στόχου, καθώς ο στόχος και ο EO κρύσταλλος εντοπίζουν το αντικείμενο και το επίπεδο της εικόνας αντίστοιχα. Έτσι, η κατανομή του THz κύματος πάνω στον EO κρύσταλλο μεταφέρει χωρικές πληροφορίες του στόχου. Μια εκτεταμένη, γραμμικά πολωμένη THz δέσμη ανίχνευσης, που καλύπτει ολόκληρη την περιοχή κατανομής THz κύματος, διαδίδεται

συγγραμικά με την THz ακτίνα διαμέσου του EO κρυστάλλου. Η χωρική κατανομή του THz κύματος εγγράφεται πάνω στη δέσμη ανίχνευσης μέσω της διαδικασίας EO. Μια σταυρωτή μέθοδος εντοπισμού χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της διαμόρφωσης του THz κύματος της δέσμης ανίχνευσης, στην οποία ένας αναλυτής με την εφαρμογή σταυρωτής πόλωσης μετά τον EO κρύσταλλο και η διαρροή της δέσμης ανίχνευσης απεικονίζεται σε μια CCD κάμερα. Μέσω μιας διαδικασίας σειριακής απεικόνισης, η οπτική εικόνα στην CCD κάμερα αντανακλά την εικόνα του THz κύματος του στόχου.



**Εικ. 3.10** Ιδέα της απεικόνισης THz κύματος 2D με τη χρήση ενός κρυστάλλου με μεγάλο διάφραγμα σαν εκτεταμένο ανιχνευτή εστιακού επιπέδου

Η χωρική ανάλυση ενός συστήματος απεικόνισης μακρινού πεδίου περιορίζεται από την περίθλαση του κύματος μεταφορέα.

$$\Delta = 1.22\lambda \frac{l}{D}, \quad (16)$$

όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος του κύματος μεταφορέα,  $l$  είναι η απόσταση ανάμεσα στο στόχο και το φακό απεικόνισης και  $D$  είναι η διάμετρος του διαφράγματος του φακού. Το βάθος του πεδίου παίζει έναν σημαντικό ρόλο στο σύστημα απεικόνισης, καθώς καθορίζει το εύρος μέσα στο οποίο ο στόχος μπορεί να προβάλλει μια καθαρή εικόνα σε ένα καθορισμένο επίπεδο απεικόνισης. Έχουν αναπτυχθεί πολύπλοκοι τύποι προκειμένου οι φωτογράφοι να υπολογίζουν το βάθος του πεδίου της κάμεράς

τους. Οι ακριβείς πληροφορίες για το βάθος του πεδίου διαφέρουν ανάλογα με το φακό ή τις συνθήκες λήψης της εικόνας. Εν συντομία χωρίς να αναφερόμαστε σε λεπτομέρειες παραμέτρων του φακού, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα σύστημα απεικόνισης που χρησιμοποιεί έναν ιδανικό φακό. Σε ένα τέτοιο σύστημα, μια σημειακή πηγή, η οποία δεν εντοπίζει το επίπεδο του αντικειμένου, προβάλλει ένα εκτεταμένο σημείο πάνω στο επίπεδο της εικόνας. Μπορούμε να θεωρήσουμε ένα σημείο μέσα στο βάθος πεδίου, εάν το μέγεθος της εκτεταμένης εικόνας του είναι μικρότερο από την καθορισμένη χωρική ανάλυση στο επίπεδο της εικόνας. Όταν το βάθος πεδίου είναι πολύ μικρότερο από την απόσταση του αντικειμένου, μπορεί να περιγραφεί ως

$$L = \delta D l / (\delta D' \pm D), \quad (17)$$

Εδώ  $\delta D$  είναι η απαιτούμενη χωρική ανάλυση στο στόχο και  $\delta D'$  είναι η απαιτούμενη ανάλυση στο επίπεδο απεικόνισης, ενώ το πρόσημο δείχνει το βάθος πεδίου σε διαφορετικές πλευρές του στόχου. Οι  $\delta D$  και  $\delta D'$  έχουν την ακόλουθη σχέση:  $\delta D' = \delta D (l' / l)$ , όπου  $l'$  είναι η απόσταση της εικόνας, η οποία ισούται κατά προσέγγιση με το εστιακό μήκος του φακού απεικόνισης ενός αντικειμένου μακρινού πεδίου. Ένα κύμα με THz συχνότητα ίση με 1 έχει μήκος κύματος ίσο με 300  $\mu\text{m}$ , πολύ μεγαλύτερο δηλαδή από το οπτικό μήκος κύματος. Έτσι, η εικόνα του THz κύματος έχει πολύ χαμηλότερη χωρική ανάλυση από μια οπτική εικόνα. Η χρήση ενός φακού διαμέτρου 40 cm για την απεικόνιση ενός στόχου που βρίσκεται 10m μακριά, η χωρική ανάλυση είναι 9.5 mm εάν η συχνότητα του κύματος μεταφορέα είναι 1THz. Εάν η απαιτούμενη χωρική ανάλυση είναι ίση με την περιορισμένη από την περίθλαση ανάλυση τότε το βάθος του πεδίου είναι 45.8 cm.

Το μέγεθος του ΕΟ κρυστάλλου καθορίζεται από το μέγεθος του στόχου και το εστιακό μήκος της οπτικής απεικόνισης. Η απόσταση του αντικειμένου σε ένα σύστημα απεικόνισης είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από το εστιακό μήκος της οπτικής απεικόνισης. Για το λόγο αυτό, η διάσταση του ΕΟ κρυστάλλου ορίζεται ως το μέγεθος της εικόνας.

$$D_S \approx D_T \frac{f}{l}, \quad (18)$$

$D_T$  είναι η διάσταση του στόχου και  $f$  είναι το εστιακό μήκος της οπτικής απεικόνισης. Στο προηγούμενο παράδειγμα, εάν ο στόχος είναι ένας κύκλος με διάμετρο 1m και το εστιακό μήκος του φακού απεικόνισης είναι 44.7 cm (ο N.A. του φακού είναι 0.5), τότε η διάμετρος του ΕΟ κρυστάλλου είναι 4.47 cm. Το πάχος του κρυστάλλου μπορεί να υπολογιστεί σε δυο χρόνους του εστιακού βήθους, και είναι

$$L' = \frac{\delta D' f}{D} \approx \frac{\delta D'}{2\text{N.A.}}, \quad (19)$$

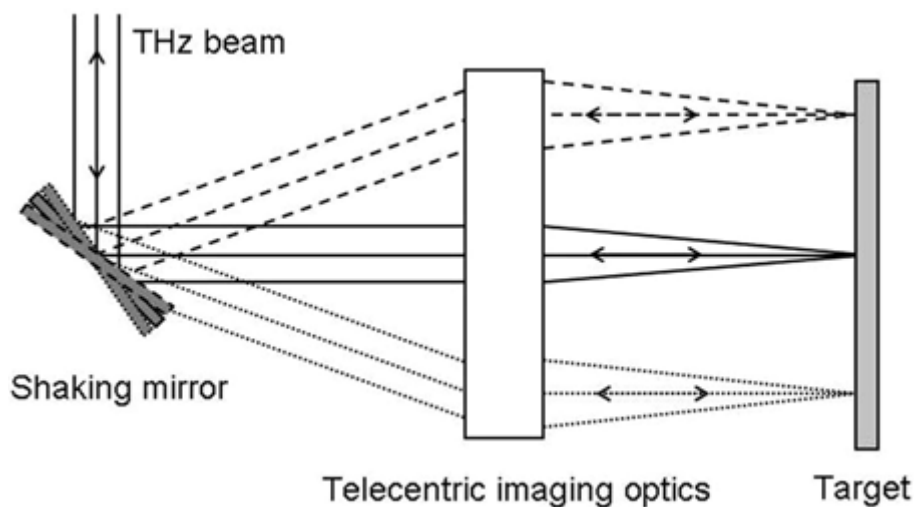
όπου  $\delta D'$  είναι η απαιτούμενη ανάλυση του επιπέδου απεικόνισης, που μπορεί να τεθεί από τη χωρική ανάλυση που περιορίζεται από την περίθλαση. N.A. είναι το αριθμητικό διάφραγμα του φακού. Στο προηγούμενο παράδειγμα, το μέγιστο πάχος του κρυστάλλου θα είναι 0.7 mm προκειμένου να διατηρήσει τη χωρική ανάλυση. Η άνω συζήτηση δεν λαμβάνει υπόψη το δείκτη διάθλασης του κρυστάλλου. Καθώς οι κοινοί κρύσταλλοι έχουν σχετικά μεγάλο δείκτη διάθλασης, ο ΕΟ κρύσταλλος μπορεί να είναι λίγα mm πιο παχύς χωρίς να επηρεάζει τη χωρική ανάλυση.

## **Απεικόνιση THz κύματος μέσω της Τηλεκεντρικής Σάρωσης Ακτινών**

Καθώς το THz κύμα αραιώνεται στον εκτεταμένο αισθητήρα σε ένα σύστημα απεικόνισης 2D, ο λόγος σήματος ανίχνευσης προς θόρυβο είναι συνήθως χαμηλός. Σε ένα τέτοιο σύστημα απαιτείται μια ισχυρή THz πηγή. Ένας εναλλακτικός τρόπος για να εκτελέσουμε την απεικόνιση THz κύματος με μεγάλη ταχύτητα είναι η σάρωση της THz δέσμης μέσω ιπτάμενων ή ανακινούμενων οπτικών μέσων και όχι η σάρωση του στόχου. Καθώς σχετίζεται λιγότερη μάζα με τη σάρωση της THz δέσμης, αναμένεται μια ταχύτερη διαδικασία απεικόνισης. Σε αντίθεση με την οπτική απεικόνιση, όπου το σκεδασμένο φως είναι ο κύριος φορέας της πληροφορίας, στα

THz κύματα, λόγω του μεγάλου μήκους κύματός τους, η σκέδαση ή η διάχυση είναι συνήθως λιγότερο σημαντικά από την εκπομπή και την κατοπτρική αντανάκλαση στη διαδικασία απεικόνισης. Έτσι, η συλλογή των εκπομπόμενων ή αντανακλώμενων THz κυμάτων είναι απαραίτητη στο σύστημα απεικόνισης THz κύματος μέσω της σάρωσης ακτινών. Η τεχνική Τηλεκεντρικής Σάρωσης Ακτινών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διασφαλίσει έναν υψηλό συντελεστή συλλογής στη διαδικασία απεικόνισης THz κύματος μέσω της σάρωσης ακτινών.

Στην εικ. 3.11 παρουσιάζεται η ιδέα του συστήματος απεικόνισης Τηλεκεντρικής Σάρωσης Ακτινών. Η ευθυγραμμισμένη THz δέσμη οδηγείται στο σύστημα απεικόνισης και κατευθύνεται από την κάμψη περίπου δυο ορθογώνιων αξόνων με τη χρήση ενός ζεύγους κατόπτρων ανακίνησης. Η δέσμη εξόδου από το ζεύγους των κατόπτρων οδηγείται ύστερα σε έναν τηλεκεντρικό φακό. Ο τηλεκεντρικός φακός μπορεί να είναι ένας σφαιρικός φακός, ενώ το κάτοπτρο εντοπίζει σε ένα εστιακό σημείο του φακού και ο στόχος εντοπίζεται στο εστιακό του επίπεδο στην αντίθετη πλευρά. Η THz δέσμη εξόδου από τον τηλεκεντρικό φακό είναι κάθετη στο εστιακό επίπεδο και εστιάζει στο στόχο. Η ανακίνηση του ζεύγους των κατόπτρων σαρώνει την THz δέσμη κατά μήκος του στόχου. Το THz κύμα που αντανακλάται από το στόχο συλλέγεται από τους ίδιους φακούς και ανατροφοδοτείται ακολουθώντας την ίδια κατεύθυνση. “Μαζεύεται” από το ίδιο ζεύγος κατόπτρων και διαδίδεται αντίθετα με τη δέσμη εισόδου. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε έναν πομποδέκτη THz κύματος, που εκπέμπει και ανιχνεύει THz ακτινοβολία, ή έναν διασπαστή δέσμης για να οδηγήσει την επιστρεφόμενη THz δέσμη πίσω στον ανιχνευτή.



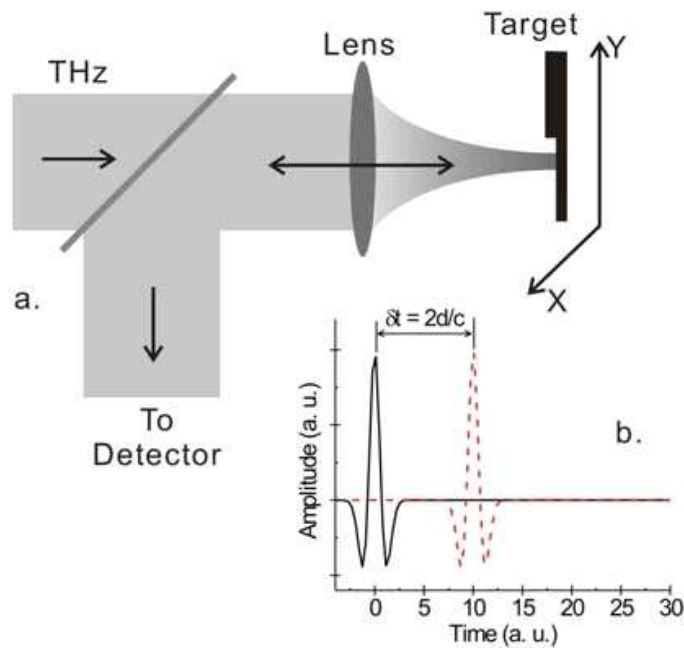
Εικ. 3.11 Σχηματική αναπαράσταση ενός απεικονιστή Τηλεκεντρικής Σάρωσης Ακτινών

Μια κοινή αντίληψη είναι ότι η απεικόνιση εστιακού επιπέδου 2D, που είναι μια παράλληλη διαδικασία, θα έπρεπε να είναι περισσότερο γρήγορη από την απεικόνιση σάρωσης raster, που είναι μια σειριακή διαδικασία. Αυτό αληθεύει για την παθητική απεικόνιση, όπως και για την ενεργή απεικόνιση με επαρκές δυναμικό εύρος. Στην απεικόνιση THz κύματος, ωστόσο, αφ' ής στιγμής η ταχύτητας επεξεργασίας γίνει αρκετά γρήγορη, το δυναμικό εύρος γίνεται σημείο συμφόρησης λόγω της χαμηλής ισχύος πηγής και της χρήσης ανιχνευτή χαμηλής ευαισθησίας. Σε μια διαδικασία απεικόνισης σάρωσης raster κάθε pixel χρησιμοποιεί ολόκληρη την THz ακτινοβολία αλλά μοιράζεται με άλλα πληροφορίες που απαιτούν χρόνο. Το δυναμικό εύρος της μέτρησης περιορίζει το χρόνο κατά τον οποίο κάθε THz ακτίνα πρέπει να μείνει σε κάθε pixel της εικόνας. Σε μια διαδικασία απεικόνισης 2D κάθε pixel χρησιμοποιεί πλήρως το χρόνο λήψης πληροφοριών αλλά μοιράζεται THz ισχύ με τα άλλα, πράγμα που οδηγεί σε χαμηλότερο δυναμικό εύρος για όλα τα pixels. Εάν το συνολικό δυναμικό εύρος του συστήματος απεικόνισης περιορίζεται, η ταχύτητα μιας διαδικασίας απεικόνισης 2D εστιακού επιπέδου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από μια διαδικασία απεικόνισης σάρωσης raster.

## **Απεικόνιση Time-of-Flight**

Όταν γίνεται απεικόνιση παλμικού THz κύματος ολόκληρη η THz κυματομορφή καταγράφεται για κάθε pixel. Εάν αντανακλώνται δυο THz παλμοί από δυο επιφάνειες που βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη, οι παλμοί αυτοί έχουν διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις λόγω των διαφορετικών οπτικών διαδρομών. Από τη χρονική καθυστέρηση μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες βάθους για κάθε pixel και έτσι να παρουσιάσουμε το τοπογραφικό προφίλ του στόχου. Η μέθοδος αυτή απεικόνισης αποκαλείται απεικόνιση THz κύματος time-of-flight. Η εικ. 3.12 αναπαριστά την έννοια της απεικόνισης THz κύματος time-of-flight.





**Εικ. 3.12** Η έννοια της απεικόνισης THz κύματος time-of-flight. Το κύριο θέμα δείχνει τη χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στις δυο THz κυματομορφές.

Το βάθος στην ανάλυση στην απεικόνιση THz κύματος time-of-flight περιορίζεται από τη χρονική ανάλυση στη μέτρηση της THz κυματομορφής, η οποία συνδέεται κατά βάση με το THz μήκος κύματος. Η (χρονική) ανάλυση του πραγματικού βάθους που μπορούμε να λάβουμε πειραματικά είναι συνήθως μικρότερη από το κεντρικό THz μήκος κύματος. Όταν χρησιμοποιούνται THz παλμοί με κεντρικό THz μήκος κύματος 2, η μικρότερη ανάλυση βάθους φτάνει τα λίγα microns. Παρόλο που η απεικόνιση time-of-flight αποδίδει ένα 3D τοπογραφικό προφίλ ή στρωματική δομή του στόχου, συνήθως δεν θεωρείται εξ'ολοκλήρου τεχνική απεικόνισης 3D καθώς δεν προσφέρει πληροφορίες εσωτερικές του στόχου εάν δεν παρουσιάζεται κάποια στρωματική δομή αυτού. Η εικ. 3.13 παρουσιάζει την εικόνα time-of-flight από ένα μπουζί, η οποία δείχνει το επιφανειακό τοπογραφικό προφίλ και τη στρωματική δομή από το μπουζί.

### **Συνθετικό διάφραγμα και Απεικόνιση Συμβολής (Interference)**

Η εξίσωση (16) μας δίνει τη χωρική ανάλυση της απεικόνισης THz κύματος. Για να έχουμε υψηλή χωρική ανάλυση, ειδικά όταν γίνεται η απεικόνιση ενός στόχου σε χαμηλή απόσταση, πρέπει να χρησιμοποιούμε οπτικά μέσα απεικόνισης με μεγάλο

διάφραγμα. Τέτοια οπτικά μέσα είναι, όχι μόνο ακριβά, αλλά και δύσκολα στη λειτουργία και τη μεταφορά τους λόγω του μεγάλου όγκου και βάρους τους. Το Συνθετικό διάφραγμα και η Απεικόνιση Συμβολής (Interference) χρησιμοποιεί είτε έναν φορητό ανιχνευτή είτε μια διάταξη ανιχνευτών με χωριστή χωρική κατανομή για τη δημιουργία της εικόνας ενός στόχου. Στις τεχνικές αυτές η χωρική ανάλυση της εικόνας δεν περιορίζεται πλέον από το διάφραγμα κάθε χωριστού ανιχνευτή αλλά περιορίζεται από την κίνηση ή την τοποθεσία του(των) ανιχνευτή(-ών). Σαν αποτέλεσμα, με τη χρήση της μεθόδου Συνθετικού διαφράγματος και Απεικόνισης Συμβολής μπορούμε να έχουμε υψηλή χωρική ανάλυση με μικρά όργανα απεικόνισης.

Η τεχνική αυτή αρχικά αναπτύχθηκε για RF και μικροκύματα. Στην εικ. 3.14 βλέπουμε ένα σχηματικό διάγραμμα της τεχνικής αυτής με εναέριο ραντάρ. Ο παλμός του ραντάρ που μεταφέρεται από ένα αεροσκάφος φωτίζει ένα κύμα μεταφορέα στο έδαφος από τη μια πλευρά του αεροσκάφους. Υποθέτουμε ότι η ταχύτητα του αεροσκάφους είναι  $v$ , το ύψος πτήσης του είναι  $H$ , η απόσταση με το σημείο ανίχνευσης είναι  $R$ , το πλάτος του παλμού του ραντάρ είναι  $T$ , το διάφραγμα είναι  $D$ , και το μήκος κύματος του κύματος μεταφορέα είναι  $\lambda$ . Το διάφραγμα του ραντάρ είναι  $\Phi = \lambda D$ , όπως φαίνεται από το μακρινό πεδίο. Το ραντάρ συνθετικού διαφράγματος λαμβάνει ένα σήμα σκέδασης πίσω σε αυτό από αντικείμενα που βρίσκονται στο έδαφος. Η πλευρική του ανάλυση καθορίζεται από τη χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στους παλμούς του ραντάρ που αντανακλώνται πίσω σε αυτό από τα διάφορα σημεία

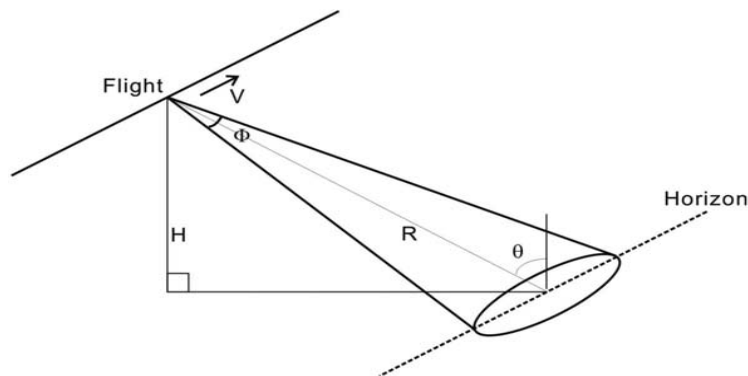
$$r_g = \frac{T_C}{2 \sin \theta}. \quad (20)$$

Εδώ  $\theta$  είναι η γωνία που παρουσιάζεται στην εικ. 3.14. Κατά μήκος της διεύθυνσης της πτήσης η χωρική ανάλυση ορίζεται από τη διαφορά οπτικής διαδρομής ανάμεσα σε ένα σημείο του εδάφους και τη διαφορετική τοποθεσία του αεροσκάφους. Καθορισμένο από το διάφραγμα του ραντάρ, το κύμα μεταφορέας καλύπτει μήκος  $L = \Phi R$  στο έδαφος. Από διαφορετική οπτική, το κύμα από το ραντάρ μπορεί να καλύψει το ίδιο σημείο μέσα σε απόσταση πτήσης  $L$ . Σαν αποτέλεσμα, το διάφραγμα

απεικόνισης εκτείνεται από το διάφραγμα του ραντάρ  $D$  στην απόσταση πτήσης  $L$ . Η χωρική ανάλυση στην διεύθυνση πτήσης μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης (16).

$$r_a = \lambda \frac{L}{R} = D. \quad (21)$$

Εδώ ο συντελεστής του 1.22 έχει πέσει. Τυπικά, η χωρική ανάλυση στη διεύθυνση της πτήσης ορίζεται ως  $D/2$ . Η εξίσωση (21) δείχνει ότι, λόγω της σχέσης ανάμεσα στα  $\lambda$ ,  $D$ , και  $\Phi$ , κατά τη διάρκεια της διεύθυνσης της πτήσης δεν εξαρτάται ούτε από το μήκος κύματος του κύματος μεταφορέα ούτε από την απόσταση ανάμεσα στο στόχο και το ραντάρ. Επιπλέον, όσο μικρότερο είναι το διάφραγμα του ραντάρ τόσο καλύτερη είναι η χωρική ανάλυση. Διαφέρει έτσι από μια κοινή οπτική κατασκευή απεικόνισης. Η παραπάνω συζήτηση ωστόσο αφορά το διάφραγμα που είναι πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος του κύματος μεταφορέα. Για το λόγο αυτό η εξίσωση (21) δεν οδηγεί στο ακόλουθο συμπέρασμα: μειώνοντας το μέγεθος του ραντάρ, η εικόνα συνθετικού διαφράγματος μπορεί να έχει χωρική ανάλυση κάτω από το μήκος κύματος.



**Εικ. 3.14** Αναπαράσταση της έννοιας της απεικόνισης από εναέριο ραντάρ συνθετικού διαφράγματος

Παρόμοια τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην απεικόνιση παλμικού THz κύματος συνθετικού διαφράγματος. Το πλάτος του παλμού είναι περίπου 1 picosecond για τους THz παλμούς που έχει σαν αποτέλεσμα πλευρική ανάλυση εκατοντάδων microns. Στην πραγματικότητα, η χρονική ανάλυση στη μέτρηση των

THz παλμών μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από το πλάτος του THz παλμού, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα πλευρική ανάλυση στην κλίμακα υπό-μm. Η χωρική ανάλυση στη διεύθυνση πτήσης μπορεί να είναι όσο μικρή όσο το επίπεδο του μήκους κύματος. Αυτό διαφέρει από την κοινή απεικόνιση με ραντάρ συνθετικού διαφράγματος, διότι ένα κοινό πλάτος παλμού ραντάρ είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερο από την περίοδο ταλάντωσης του κύματος μεταφορέα. Σαν αποτέλεσμα, δίνει καλύτερη χωρική ανάλυση κατά μήκος της κατεύθυνσης πτήσης, ενώ η εικόνα THz κύματος συνθετικού διαφράγματος δίνει καλύτερη πλευρική χωρική ανάλυση. Εάν η σχετική μετατόπιση φάσης μεταξύ των διαφόρων περιοχών του αισθητήρα καταγράφεται, το σύστημα απεικόνισης συνθετικού διαφράγματος μπορεί να λάβει μια εικόνα συμβολής. Σε μια κατασκευή απεικόνισης συμβολής, κάθε ζεύγος ανιχνευτών,  $i$  και  $j$ , σχηματίζει μια γραμμή βάσης. Κάθε γραμμή βάσης αντιστοιχεί σε ένα σημείο στο χώρο φάσης. Θεωρούμε ότι όλοι ανιχνευτές κατανέμονται σε ένα επίπεδο  $x$ - $y$ . Η συντεταγμένη της γραμμής βάσης  $ij$  στο χώρο της φάσης είναι

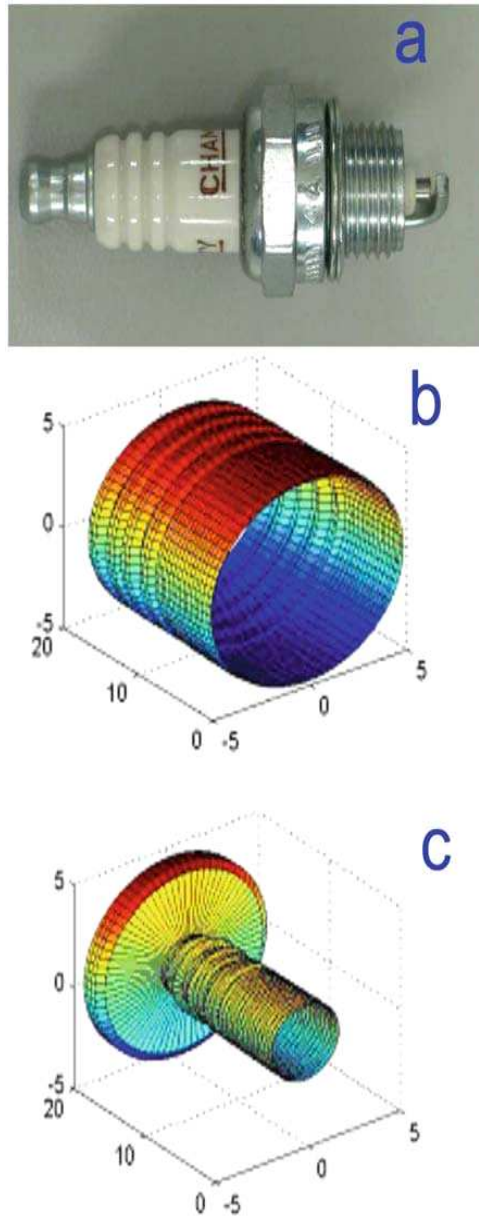
$$u_{ij} = \frac{x_i - x_j}{\lambda} \quad (22)$$

$$v_{ij} = \frac{y_i - y_j}{\lambda},$$

όπου  $u$  και  $v$  είναι συντεταγμένες στο χώρο φάσης και  $x$  και  $y$  είναι οι συντεταγμένες στον πραγματικό χώρο. Το πλάτος του σήματος σε αυτό το σημείο είναι το σύνολο από τα πλάτη των σημάτων των δυο αυτών ανιχνευτών, και το οποίο είναι  $A_{ij} = A_i A_j$ , ενώ η φάση ορίζεται ως η διαφορά φάσης μεταξύ των δυο ανιχνευτών:  $\Phi_{ij} = \Phi_i - \Phi_j$ . Εάν ο συνολικός αριθμός ανιχνευτών είναι  $N$ , τότε θα υπάρχουν  $N(N-1)$  σημεία στο χώρο φάσης. Την εικόνα του στόχου εξάγουμε από το μετασχηματισμό Fourier του σήματος στο χώρο φάσης, που είναι

$$I(x', y') = \iint A(u, v) e^{-i\Phi(u, v)} e^{-i2\pi xu} e^{-i2\pi yv} du dv; \quad (23)$$

$x'$  και  $y'$  είναι μονάδες συντεταγμένων στο χώρο απεικόνισης. Η χωρική ανάλυση της εγκατάστασης απεικόνισης συμβολής καθορίζεται από το μήκος της μακρύτερης γραμμής βάσης.



**Εικ.3.13** Εικόνα THz κύματος time-of-flight από ένα μπουζί. (α) φωτό από το μπουζί, (β) εικόνα του THz κύματος του εξωτερικού κέλυφους, (γ) εικόνα του THz κύματος της εσωτερικής μεταλλικής μπάρας

# Επίλογος

## Σημασία και εφαρμογές της THz τεχνολογίας σήμερα

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο θα κάνουμε μια συνοπτική αναφορά στη σημασία της τέραχερτζ τεχνολογίας σήμερα όπως αυτή διαγράφεται από τους επιστήμονες στα διηλεκτρικά υλικά, τους ημιαγωγούς και στη φαρμακοβιομηχανία.

Έχουμε ήδη δει ότι η μελέτη της THz ακτινοβολίας δεν μπορεί να γίνει αποκλειστικά ούτε με τις προσεγγίσεις της κλασσικής ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας αλλά ούτε και με αυτές της οπτικής. Η περιοχή αυτή μέχρι πρότινος ήταν ανεξερεύνητη αφού οι τεχνολογίες παραγωγής και ανίχνευσης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας περιορίζονταν στις γειτονικές περιοχές λόγω της δυσκολίας υλοποίησης τους στο THz «χάσμα». Ωστόσο, η THz ακτινοβολία εμφανίζει κάποιες ιδιαιτερότητες, οι οποίες οφείλονται στην θέση της στο φάσμα, που είναι κατά κάποιο τρόπο μεταβατική ανάμεσα στα μικροκύματα και τις οπτικές συχνότητες και οι οποίες έχουν πλήθος εφαρμογών.

Μια από τις ιδιαιτερότητες αυτές είναι οι τρόποι με τους οποίους αλληλεπιδρά η τέραχερτζ ακτινοβολία με τα υλικά σε σύγκριση με άλλες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες. Λόγου χάρη, το πλαστικό και το χαρτί, ενώ είναι αδιαφανή στο απλό φως, είναι διαφανή στην τέραχερτζ ακτινοβολία. Επιπλέον, όπως έχουμε ήδη δει, η THz ακτινοβολία είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στο νερό που περιέχεται στο υλικό, με αποτέλεσμα έστω και μια μικρή τέτοια ποσότητα να απορροφά σε μεγάλο βαθμό THz ακτινοβολία και άρα είναι δυνατός ο προσδιορισμός του περιεχομένου νερού σε υλικά μέσω της THz φασματοσκοπίας.

Ιδιαιτερότητες όπως οι παραπάνω προσφέρουν πολλές δυνατότητες εφαρμογών της THz ακτινοβολίας σε πολλούς τομείς. Έτσι, στα διηλεκτρικά υλικά, για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να σκεφτούμε πολλαπλά στρώματα κολλημένα μεταξύ τους. Επειδή το φως terahertz μπορεί να διαπεράσει τα πολλαπλά αυτά στρώματα και να συγκεντρώσει πληροφορίες από όλα αυτά, η χρήση της φασματοσκοπίας terahertz θα ήταν κατάλληλη για τον προσδιορισμό της χημικής σύνθεσης του στρώματος συγκολλησεως συναρτήσει του χρόνου σε αυτή τη σύνθετη δομή. Μια άλλη

δυνατότητα είναι η THz φασματοσκοπία ευαισθησίας πόλωσης (polarization sensitive) που χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή για να εξετάσει την ευθυγράμμιση των ιών σε σύνθετα διηλεκτρικά. Έτσι, υπάρχουν πολλές ευκαιρίες για την εξέταση των διηλεκτρικών υλικών μέσω της φασματοσκοπίας terahertz.

Στο πεδίο των ημιαγωγών, η απεικόνιση terahertz έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία και προοπτικές. Ορισμένοι κατασκευαστές αντιμετωπίζουν την απεικόνιση terahertz ως έναν τρόπο ανίχνευσης βλάβης στα κυκλώματα. Είναι λίγο μακριά από την πλευρά της φασματοσκοπίας terahertz, αλλά είναι μια πραγματικά σημαντική εφαρμογή της ενέργειας terahertz.

Τέλος, στη φαρμακευτική βιομηχανία έχει υπάρξει μια ισχυρή κίνηση για την παρακολούθηση της διασφάλισης της συνολικής ποιότητας, γεγονός που έχει παρακινήσει την ανάπτυξη νέων εργαλείων που παρέχουν μια χρήσιμη ανάλυση των σκευασμάτων δισκίων. Η ικανότητα της τεχνολογίας THz για τον προσδιορισμό τόσο των φασματικών όσο και των δομικών πληροφοριών, έχει στρέψει το ενδιαφέρον στις φαρμακευτικές εφαρμογές αυτής της τεχνικής.