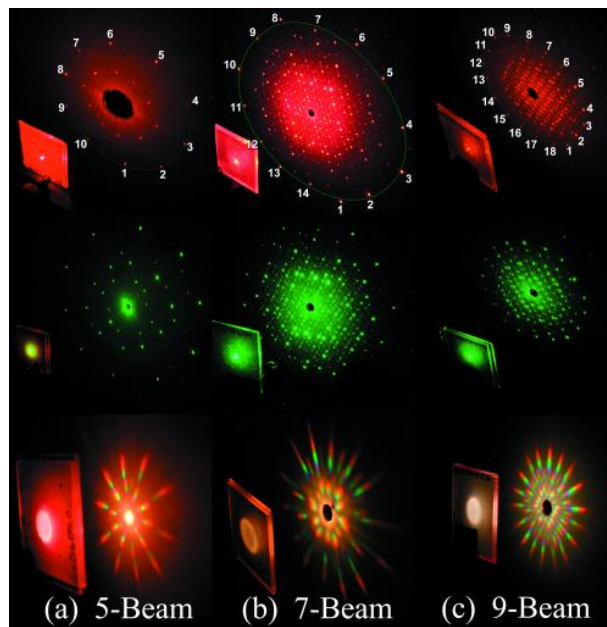


ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
ΤΜΗΜΑ ΚΛΩΣΤΟΨΦΑΝΤΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΒΑΦΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ:

ΦΩΤΟΝΙΚΟΙ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΕΥΦΥΗ
ΚΛΩΣΤΟΨΦΑΝΤΟΥΡΓΙΚΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ
ΛΕΚΚΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

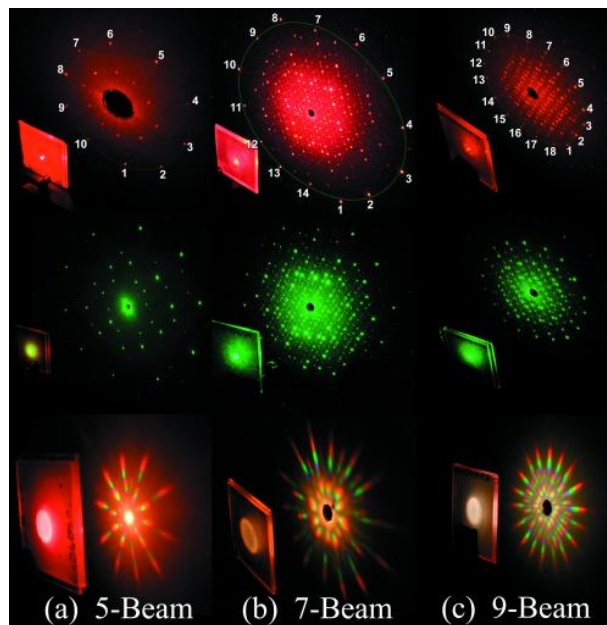
ΑΘΗΝΑ 2016

ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
ΤΜΗΜΑ ΚΛΩΣΤΟΨΦΑΝΤΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΒΑΦΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ:

ΦΩΤΟΝΙΚΟΙ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΕΥΦΥΗ
ΚΛΩΣΤΟΨΦΑΝΤΟΥΡΓΙΚΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ
ΛΕΚΚΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ
κ. ΑΘΗΝΑ ΕΦΕΝΤΑΚΗ

ΑΘΗΝΑ 2016

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος/η ΛΕΚΚΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ, του ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ, φοιτητής του Τμήματος Κλωστοϋφαντουργών Μηχανικών Τ.Ε. του Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε, ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα, σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση Π.Ε με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε πρέπει να ολοκληρώσει εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού βμήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18. παρ.5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού».

Ο Δηλών



Ημερομηνία

29/11/2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	I
Περίληψη.....	II
Abstract.....	III
1. Διαχείριση φωτός με φωτονικούς (photonics) κρυστάλλους για έξυπνα και ευφυή ενδύματα.....	1
2. Ενεργειακά χάσματα στους φωτονικούς κρυστάλλους.....	3
2.1. Κυματικές και σωματιδιακές ιδιότητες φωτονίων.....	3
2.2. Κυματική φύση των ηλεκτρονίων και των φωτονίων.....	4
3. Αρχές λειτουργίας των φωτονικών κρυστάλλων: θεώρημα του Bloch, συνεχή διαγράμματα και ενεργειακά χάσματα.....	10
3.1. Ανάλυση της θεωρίας φωτονικών κρυστάλλων και των ενεργειακών χασμάτων.....	10
3.2. Οι εξισώσεις Maxwell σε περιοδικά μέσα.....	11
3.2.1. Κύματα Bloch και ζώνες Brillouin.....	12
3.2.2. Προέλευση των φωτονιακών κενών ζωνών.....	13
3.2.3. Υπολογιστικές τεχνικές.....	16
3.2.4. Ημι-αναλυτικές μέθοδοι: Θεωρία διαταραχών.....	16
4. Δύο διαστάσεων φωτονικοί κρύσταλλοι.....	18
5. Πλάκες φωτονικών κρυστάλλων.....	21
6. Τρισδιάστατοι φωτονικοί κρύσταλλοι.....	23
7. Εφαρμογές.....	26
7.1. Ευφυή αυτοφωτιζόμενα ενδύματα.....	26
7.2. Οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μεγάλης απόστασης, με εξαιρετικά χαμηλή απώλεια και υψηλό ρυθμό στο φωτονικό ενεργειακό χάσμα.....	27
7.3. Οπτικές εφαρμογές βασισμένες στην κατασκευή νήματο.....	27
7.4. Αυτοσυναρμολογούμενα block συμπολυμερών ως υλικά φωτονικών ενεργειακών χασμάτων.....	28
7.5. Βιοσυμβατοί φωτονικοί κρύσταλλοι.....	28
8. Έρευνες σε εξέλιξη.....	29
9. Συμπεράσματα – Σχόλια.....	30
Λεξικό όρων.....	32
Βιβλιογραφία.....	33

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το ερέθισμα για την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας υπήρξε η σχέση της Κλωστοϋφαντουργίας και των προϊόντων της με την θεωρία των φωτονικών κρυστάλλων. Πιο συγκεκριμένα χωρίς την χρήση χημικών χρωμάτων, αλλά με την εφαρμογή της θεωρίας των φωτονικών κρυστάλλων σε υφάσματα κατάλληλα σχεδιασμένα, ως προς την επιλογή των υλικών και της ύφανσής τους, να παρουσιάζεται χρωματισμός του υλικού μέσω της διαχείρισης της ακτινοβολίας του φωτός.

Αυτή η εργασία κάνει εισαγωγή στο μοναδικό κόσμο των φωτονικών κρυστάλλων. Οι φωτονικοί κρύσταλλοι είναι τεχνητά πολυδιάστατες περιοδικές δομές με περιοδική αναλογία απορρόφησης μήκους κύματος. Έχουν πολλές ομοιότητες με τους κρυστάλλους σε στερεά κατάσταση. Το πιο σημαντικό είναι η *ζώνη των φωτονίων*, η οποία είναι μια σημαντική θεωρία για την κατανόηση της συμπεριφοράς του φωτός σε μια πολύπλοκη φωτονική κρυσταλλική δομή. Μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε το φωτονικό ενεργειακό χάσμα και να ελέγξουμε το φώς. Υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες για νέες εφαρμογές στην οπτική, οπτικοηλεκτρονική, τεχνολογίες μ-κυμάτων, κβαντική μηχανική, βιο-φωτονική, ακουστική, και ούτω καθεξής. Στην παρουσίαση αυτής της πτυχιακής εργασίας, περιγράφονται οι βασικές δομές και τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των φωτονικών κρυστάλλων με την πρόοδο των ερευνών να εστιάζεται στα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. [1]

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω μια σειρά ανθρώπων για την συμβολή τους. Πρώτα και κύρια την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, Εφεντάκη Αθηνά για την μεγάλη υπομονή και την πολύτιμη καθοδήγησή της που μου έδειξε κατά την διάρκεια της δημιουργίας και ολοκλήρωσης της εργασίας. Καθώς επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους, Λέκκα Λάμπρο και Καταχανά Μαρίνα, για την στήριξη και την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχαν καθ'όλη την διάρκεια αυτής της περιόδου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το χρώμα στα κλασσικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα εμφανίζεται με την σύνδεση του υποστρώματος με χημική ένωση (χρώμα) που φέρει χρωμοφόρα. Στα ευφυή κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα αναζητούνται τρόποι διαχείρισης του φωτός με τη δυνατότητα πολλαπλών αποχρώσεων μέσω των κατάλληλων κρυσταλλικών δομών των πολυμερών. Αφορμή δόθηκε από την ανάπτυξη της θεωρίας των φωτονικών κρυστάλλων μέσω των οποίων γίνεται διαχείριση του φωτός ανάλογα με την διαμόρφωση που θα έχει η κρυσταλλική τους δομή.

Σε αυτή την εργασία γίνεται εισαγωγή στην θεωρία των φωτονικών κρυστάλλων και των φωτονικών ενεργειακών χασμάτων με βάση τις κυματικές και σωματιδιακές ιδιότητες των φωτονίων, καθώς και των φυσικών και μαθηματικών θεωριών που τις διέπουν.

Επίσης γίνεται προσπάθεια σύνδεσης του κλάδου της κλωστοϋφαντουργίας και των εφαρμογών της με την επιστημονική θεωρία των φωτονικών κρυστάλλων, με σκοπό να γίνει περαιτέρω εκμετάλλευση και αξιοποίηση των έξυπνων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, όπου η δημιουργία τους βασίζεται στην θεωρία των φωτονικών κρυστάλλων. Κατ' επέκταση πολυμερή ή πολυεστερικά προϊόντα που παρουσιάζουν κρυστάλλωση, αποκτώντας έτσι τις ιδιότητες των φωτονικών κρυστάλλων, να έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση χρώματος χωρίς την παρουσία χημικής ουσίας.

Τέλος απώτερος στόχος της εφαρμογής αυτής της θεωρίας σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα είναι η παροχή διευκολύνσεων, ανέσεων και μορφών προστασίας σε αρκετούς επιστημονικούς και εργασιακούς κλάδους, παραδείγματος χάριν, ποδιές και ρουχισμός σε ερευνητές και γιατρούς που θα παρουσιάζουν διέγερση όταν θα εκτίθενται σε βλαβερές ακτινοβολίες, αντίστοιχα ρουχισμός σε ασθενείς που θα αλλάζει χρωματισμό ανάλογα με την σωματική κατάσταση τους (όρθιος ή σε πτώση), καθώς και στολές παραλλαγής με αντίστοιχες ιδιότητες σε στρατιωτικές μονάδες.

ABSTRACT

The color in the classic textiles displayed by connecting the substrate with a chemical compound (color) carrying chromophores. At intelligent textiles searched management modes of light with the possibility of multiple shades through appropriate crystal structures of polymers. The reason was the development of the theory of the photonic crystal through which light management depending on the configuration that has the crystal structure.

In this paper are introduced in the theory of photonic crystals and photonic band gaps based on the wave and particle properties of photons, and the physical and mathematical theories governing.

It also attempts to connect the textile industry and its applications with the scientific theory of photonic crystals, with a view to making further exploitation and utilization of smart textiles, where their creation is based on the theory of photonic crystals. Thus polymers or polyester products exhibit crystallisation, thereby obtaining the properties of photonic crystals, can result in the appearance of color without the presence of the chemical substance.

Finally ultimate goal of applying this theory to textile products is the provision of facilities, amenities and forms of protection in a number of scientific and labor sectors, for example, coats and clothing to researchers and doctors will present excitation when exposed to harmful radiation, respectively, clothing in patients that changes color depending on their physical state (up or falling) and camouflage uniforms with similar properties in military units.

1. ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΦΩΤΟΣ ΜΕ ΦΩΤΟΝΙΚΟΥΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ (PHOTONICS) ΓΙΑ ΕΞΥΠΝΑ ΚΑΙ ΕΥΦΥΗ ΕΝΔΥΜΑΤΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δυσκολία εφαρμογής των ηλεκτρονικά έξυπνων ενδυμάτων στις συνθήκες καθημερινής χρήσης, καθαριότητας και αντοχή τους, ανάγκασε τους επιστήμονες να στρέψουν τις έρευνές τους στη δημιουργία προϊόντων με όσο το δυνατόν λιγότερα συμβατικά ηλεκτρονικά στοιχεία.

Η προσπάθεια αυτή, να μεταβούν απ' την ηλεκτρονική διαχείριση του φωτός στην ευφυή διαχείριση, οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των φωτονικών κρυστάλλων (photonics), με εφαρμογές σε ίνες κατάλληλες για να υφανθούν και να πλεχτούν, για διάθεση πληροφοριών (δίκτυα Bragg) και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Με αυτόν τον τρόπο ένα ευφυές ένδυμα μπορεί να γίνει πιο εύχρηστο και εργονομικό από ένα ένδυμα το οποίο είναι καλωδιωμένο, δίνοντας τη δυνατότητα σ' αυτόν που το φοράει να έχει την αίσθηση της ελευθερίας και να είναι πιο παραγωγικός.

Με το πέρασμα του χρόνου και την ταυτόχρονη ανάπτυξη της τεχνολογίας στον συγκεκριμένο τομέα, όλο και περισσότερες εταιρίες προσπαθούν να εκμεταλλευτούν τις εφαρμογές της διαχείρισης του φωτός από ηλεκτρονικούς κρυστάλλους γρήγορα, επενδύοντας χρήματα για να φέρουν τα νέα προϊόντα στην αγορά. Μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη της τεχνολογίας διαχείρισης του φωτός από τους φωτονικούς κρυστάλλους με εφαρμογές στις ίνες και τα υφάνσιμα υλικά.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για να ελέγξουμε αν είναι αυθεντικός ένας πολύτιμος λίθος π.χ. το διαμάντι, είναι η εμβάπτιση του σε διάλυμα με κατάλληλο δείκτη διάθλασης όπου γίνεται ορατό, ενώ σε άλλο υγρό με ειδικά επιλεγμένο δείκτη διάθλασης γίνεται άορατο, αποτελεί ταυτόχρονα την αρχή λειτουργίας των φωτονικών κρυστάλλων. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα όρια ενός ομοιογενούς αντικειμένου γίνονται ορατά με την ανάκλαση και την διάθλαση του φωτός μέσα στο χώρο. Το φως δεν ανακλάται αλλά διασκορπίζεται εάν διαπεράσει ένα υλικό που δεν παρουσιάζει καμία διαφοροποίηση στη δομή και τη σύστασή του. Το κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα των φωτονικών κρυστάλλων είναι η περιοδική διαμόρφωση ενός κύριου χαρακτηριστικού τους που είναι ο δείκτης διάθλασης κατά μήκος μιας διάστασης (1D), δύο διαστάσεων (2D) ή και τριών διαστάσεων (3D).

Μια σημαντική αλλαγή στο δείκτη διάθλασης μεταξύ της περιοδικής δομής του πλέγματος του υλικού και των χασμάτων των υποστρωμάτων, μπορεί να επιτρέψει να διαβιβαστούν φωτόνια, οπότε θα έχουμε περιοχές που θα φαίνονται και περιοχές που ενεργειακά απαγορεύεται να φαίνονται. Κατά συνέπεια η ακτινοβολία με μήκος κύματος που συμπίπτει ενεργειακά με την «απαγορευμένη περιοχή» εμποδίζεται, ενώ αντίστοιχα η ακτινοβολία της οποίας το μήκος κύματος καλύπτει το υπόλοιπο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διέρχεται από το υλικό ελεύθερα. Έτσι η περιοδικότητα στην εναλλαγή των υλικών που παρουσιάζουν διαφοροποίηση του δείκτη διάθλασης θα οδηγήσει στη δημιουργία *απαγορευμένων ζωνών ή αλλιώς φωτονικών χασμάτων (PBG)*, καθώς ορισμένα μήκη κύματος του φωτός θα μπορούν να διαπεράσουν το μέσον ενώ άλλα όχι. Οι περιοχές του μήκους κύματος που είναι απαγορευμένες, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση διάδοσης παρουσιάζουν ένα

πλήρες χάσμα (PBG). Ωστόσο εάν η απαγορευμένη φωτονική ζώνη ποικίλλει ανάλογα με την κατεύθυνση διάδοσης τότε ονομάζεται ψευδοχάσμα (pseudo gap). Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα να καθορισθεί το εύρος του ενεργειακού χάσματος με την εισαγωγή επιλεγμένων «ατελειών» στον φωτονικό κρύσταλλο. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα διαχείρισης των φωτονίων ορισμένων συχνοτήτων. Ο λεπτός χειρισμός του φωτός οφείλεται αρχικώς στη δομή του δικτυακού πλέγματος, αλλά συνεργούν και οι μικροσκοπικές οπές αέρα, στην τελική διαφοροποίηση του δείκτη διάθλασης. Παρατηρείται αναλογία στην συμπεριφορά ηλεκτρονίου που διαπερνά ένα κρύσταλλο με περιοδική διηλεκτρική σταθερά και στην συμπεριφορά ενός φωτονίου που διαπερνά ένα φωτονικό κρύσταλλο με περιοδικό δείκτη διάθλασης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, με τη βοήθεια των φωτονικών χασμάτων ζωνών (το οποίο είναι ένα φωτονιακό ανάλογο των χασμάτων των ενεργειακών ζωνών στους ημιαγωγούς), οι φωτονικοί κρύσταλλοι επιτρέπουν τον έλεγχο της ροής φωτονίων. Πολλοί είναι οι ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με ίνες που παρουσιάζουν τις παραπάνω συμπεριφορές-ιδιότητες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτούς του τμήματος **Photonic Bandgap Fibers & Devices group** (τμήμα RLE στο MIT, καθώς και από το επιστημονικό περιοδικό OPTICS EXPRESS). [2]

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΧΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΟΥΣ ΦΩΤΟΝΙΚΟΥΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥΣ

2.1 ΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ

Τα στοιχειώδη σωματίδια, σύμφωνα με την θεώρηση του Einstein για τα φωτόνια, έχουν διπλή φύση και ιδιότητες, σωματιδιακή και κυματική. Επιπλέον με το αξίωμα του ο De Broglie δέχτηκε ότι κάθε σωματίδιο χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος p και λ (ορμή και μήκος κύματος) τα οποία συνδέονται με την σχέση $\lambda = h/p$, η οποία συσχέτισε μαθηματικά δύο έννοιες «ασύμβατες» μεταξύ τους, την σωματιδιακή ορμή p και την κυματική λ . Από την παραπάνω σχέση γίνεται αντιληπτό ότι οι δύο ιδιότητες είναι αντιστρόφως ανάλογες, κατά συνέπεια όσο μεγαλύτερη είναι ορμή τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος. Για τις τεράστιες τιμές p των μακροσκοπικών αντικειμένων το αντίστοιχο λ είναι πολύ μικρό, έτσι η κυματική ιδιότητα είναι σχεδόν μη υπαρκτή. Αντιθέτως, όταν μελετάμε ένα ηλεκτρόνιο με ταχύτητα της τάξεως των $3 \cdot 10^6$ m/sec και παρατηρούμενο μήκος κύματος $\lambda = 2 \cdot 10^{-10}$ m, δηλαδή περίπου ίσο με τη διάμετρο του ατόμου, το μήκος κύματος τέτοιας τάξης είναι πολύ εύκολα ανιχνεύσιμο. Τα πειράματα ερευνητών[3] σε καθαρούς κρυστάλλους απέδειξαν την κυματική φύση των ηλεκτρονίων από το γεγονός ότι η ένταση των ηλεκτρονίων που σκεδάζονται από ένα δείγμα καθαρού κρυστάλλου Νικελίου ήταν εξαρτημένη από τη γωνία σκέδασης.

Ένας κρύσταλλος είναι ιδανικός για να δράσει ως φράγμα περίθλασης για κατάλληλου μήκους κύματος ακτινοβολία, λόγω της περιοδικότητας των ατόμων του. Ειδικότερα, η ακτινοβολία ανακλάται στα διαδοχικά επίπεδα των ατόμων του κρυστάλλου και παρατηρούνται μέγιστα εντάσεως σε «γωνίες Bragg», δηλαδή σε ορισμένες γωνίες για τις οποίες οι ανακλώμενες ακτίνες που προέρχονται από συνεχόμενα επίπεδα διαφέρουν κατά ακέραιο αριθμό μηκών κύματος. Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ένας κρύσταλλος είναι ένα φράγμα περίθλασης. Με τη βοήθεια του *σχήματος 1* μπορεί να συνδεθεί η γωνία θ με το μήκος κύματος λ και την ατομική απόσταση a σε μια έδρα του κρυστάλλου.

➤ Η συνθήκη για ενισχυτική συμβολή είναι:

$$n\lambda = 2\Delta s = 2d \sin \alpha, \text{ όπου } n = \text{ακέραιος αριθμός} \quad (1)$$

➤ Η απόσταση μεταξύ των επιπέδων ανάκλασης d δίνεται από την σχέση:

$$d = a \sin \alpha \quad (2)$$

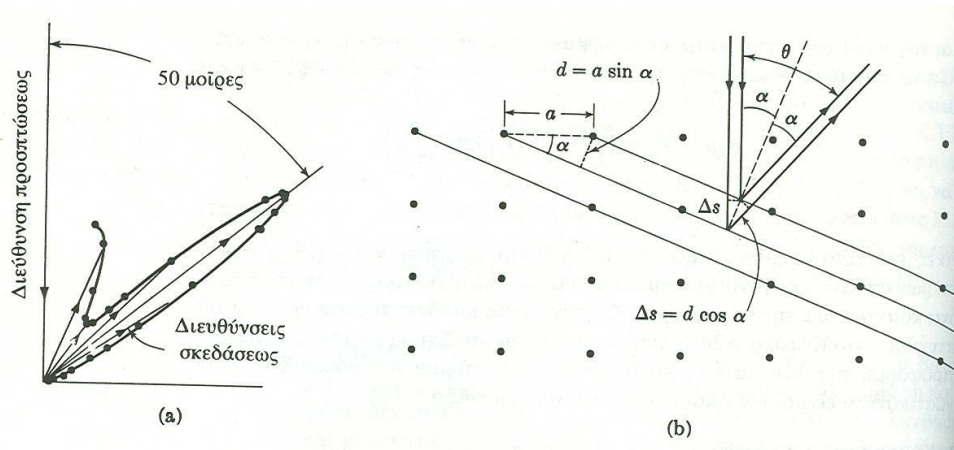
➤ Οπότε η σχέση (1) με τη χρήση της (2), γίνεται :

$$n\lambda = 2\Delta s = 2 a \sin \alpha \cdot \sin \alpha, \text{ όπου } n = \text{ακέραιος αριθμός}$$

➤ Τέλος από γνωστή τριγωνομετρική σχέση, της οποίας η παραπάνω ισότητα είναι ανάπτυγμα, έχουμε:

$$n\lambda = a \sin \Theta, \text{ όπου } \Theta = 2\alpha$$

Η γωνία Θ είναι η γωνία της προσπίπτουσας δέσμης με την σκεδάζουσα δέσμη.

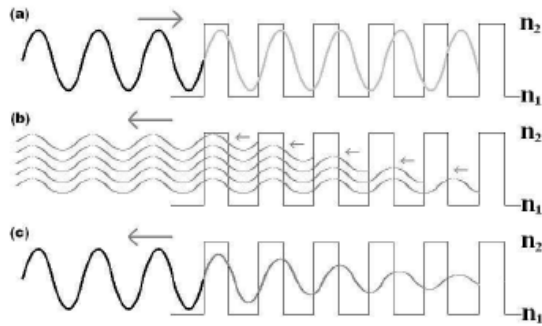


Σχήμα 1 : Κυματική φύση του ηλεκτρονίου σε κρύσταλλο νικελίου [4]

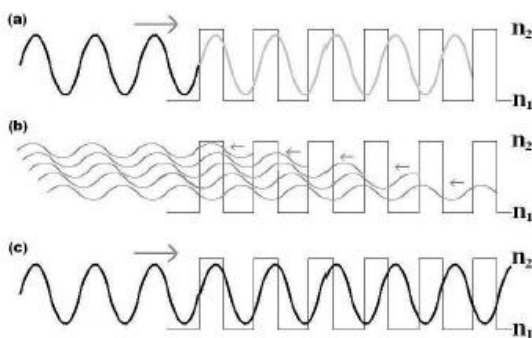
Τα υλικά που έχουν περιοδική δομή όπως οι κρύσταλλοι παρουσιάζουν και περιοδικά διαμορφωμένους δείκτες διάθλασης στη δομή του πλέγματος, με αποτέλεσμα να γίνονται φωτονικοί κρύσταλλοι και να παρουσιάζουν φωτονικό χάσμα ζωνών (PBG). [5]

2.2 ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΗΣ ΦΥΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΦΩΤΟΝΙΩΝ

Το κύριο χαρακτηριστικό των φωτονικών κρυστάλλων ΠΧ είναι η περιοδική διαμόρφωση των εν λόγω χαρακτηριστικών, της διηλεκτρικής σταθεράς και του δείκτη διάθλασης, κατά μήκος ενός, δύο ή τριών κατευθύνσεων του χώρου. Οπότε σε μια σύνθεση που σχηματίζεται από δύο διηλεκτρικά (υλικά με δύο διαφορετικούς δείκτες διάθλασης), θα εξετάσουμε το κέντρο σκέδασης στο οποίο το φως διαδίδεται πιο αργά, δηλαδή της τριτοβάθμιας εξίσωσης του E. Εάν τα κέντρα σκέδασης είναι τοποθετημένα τακτικά σε ένα μέσο, το φως διασπείρεται. Σε αυτή την περίπτωση, η παρεμβολή τελικώς θα έχει ως αποτέλεσμα ορισμένες συχνότητες να μην διαδοθούν, οδηγώντας σε απαγορευμένες και επιτρεπτές ζώνες. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες που θα αναλυθούν αργότερα σε αυτήν την ενότητα, μπορεί να εμφανιστούν απαγορευμένες περιοχές συχνοτήτων, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση διάδοσης στον ΠΧ. Σε μια τέτοια περίπτωση, αυτό το ΠΧ λέγεται ότι παρουσιάζει ένα πλήρες χάσμα ζώνης PBG. Αντιθέτως, εάν οι απαγορευμένες φωτονικές ζώνες ποικίλλουν ανάλογα με την κατεύθυνση διάδοσης στο ΠΧ, τότε γίνεται λόγος για ένα φωτονιακό ψευδοχάσμα. Επιπλέον, με την εισαγωγή ατελειών στο ΠΧ, μπορούμε να εισαγάγουμε επιτρεπτά επίπεδα ενέργειας στο ενεργειακό χάσμα, όπως συμβαίνει σε ημιαγωγούς με προσμίξεις. Όλα αυτά επιτρέπουν να καθοριστεί ένας συσχετισμός μεταξύ του σχηματισμού που χρησιμοποιείται για τα ηλεκτρόνια σε απλούς κρυστάλλους και των φωτονίων σε ένα ΠΧ.



Σχήμα 2α : Μηχανισμός φωτονιακού χάσματος σε μία διάσταση με εμφάνιση μερικώς ανακλωμένου κύματος [6]



Σχήμα 2β : Μηχανισμός φωτονιακού χάσματος σε μία διάσταση με καταστροφική παρέμβαση των υλικών [7]

Το φωτονικό χάσμα ζωνών (PBG), που αποτελεί το βασικότερο χαρακτηριστικό των φωτονικών κρυστάλλων, είναι φαινόμενο ανάλογο με το ενεργειακό χάσμα ζώνης (band gap) που προκύπτει από την κυματοειδή φύση των ηλεκτρονίων που περνούν μέσα από ημιαγωγό με περιοδική δυνατότητα διέλευσης ανάλογη της ενεργειακής κατάστασης (κλάσης) του κύματος.

Έτσι δίνεται η δυνατότητα στους φωτονικούς κρυστάλλους (PX) να χειρισθούν το φως με μεγάλη ακρίβεια. Τέτοιες δομές ονομάζονται φωτονικοί κρύσταλλοι ή photonics (PC ή PX) και τα υλικά, φωτονικά υλικά χάσματος ζωνών (PBG) και κινούν το ενδιαφέρον για την περαιτέρω μελέτη και έρευνα οπτικών συσκευών, μικρομοριακών λέιζερ, οπτικών κυκλωμάτων, έξυπνων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, βιοϊατρικών μεταφορικών συστημάτων, ανιχνευτών, συζευκτών και κυματοδηγών. [8]

Το φαινόμενο ήταν από καιρό γνωστό, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, από τους επεξεργαστές των διαμαντιών, και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της γνησιότητάς τους, διότι βυθίζοντας έναν πολύτιμο λίθο σε ένα διάλυμα με επιλεγμένο δείκτη διάθλασης αυτό μετατρέπεται σε αόρατο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτό που κάνει ένα ομοιογενές αντικείμενο ορατό είναι η αντανάκλαση και η διάθλαση του φωτός σ' αυτό. Ως εκ τούτου, εάν το φως δεν βρίσκει διαφορά διασχίζοντας μία επιφάνεια δεν θα μπορέσει με κανένα τρόπο να διασκορπισθεί. Δοθείσης της αναλογίας της συμπεριφοράς, που προαναφέρθηκε, μεταξύ του ηλεκτρονίου και του φωτονίου μπορεί να

στηριχθεί η μαθηματική επεξεργασία της συμπεριφοράς των φωτονίων από την εξίσωση του Schrödinger. Η εξίσωση του Schrödinger για ένα ηλεκτρόνιο με μάζα m σε ένα κρύσταλλο, στον οποίο το δυναμικό είναι V , μπορεί να γραφτεί ως:

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \Psi(\mathbf{r}) = E \Psi(\mathbf{r}) \quad (1)$$

όπου η $V(\mathbf{r})$ είναι το δυναμικό με την περιοδικότητα του πλέγματος, το \mathbf{R} :

$$V(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r} + \mathbf{R}) \quad (2)$$

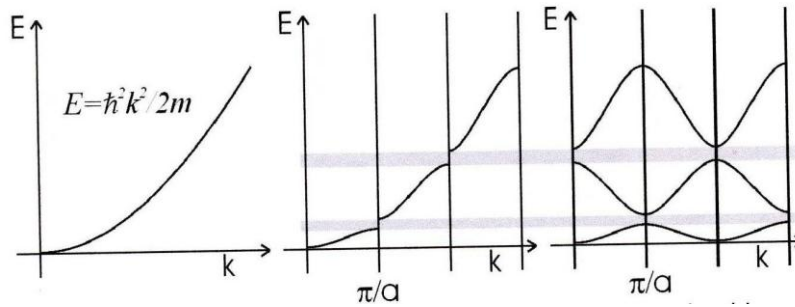
Οι συναρτήσεις της εξίσωσης αυτής είναι επίσης περιοδικές συναρτήσεις με περίοδο \mathbf{R} . Η σχέση διασποράς που προέρχεται από το $E(\mathbf{k})$, θα παρουσιάσει μια απαγορευμένη ζώνη για όλες τις ενέργειες E που έχουν φανταστικές τιμές. Ομοίως, σε ένα μέσο στο οποίο υπάρχει μια χωροταξική διαμόρφωση της διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon(\mathbf{r})$, ή του δείκτη διάθλασης, η διάδοση του φωτονίου διέπεται από την κλασσική εξίσωση κύματος για το μαγνητικό πεδίο $\mathbf{H}(\mathbf{r})$.

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right] = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

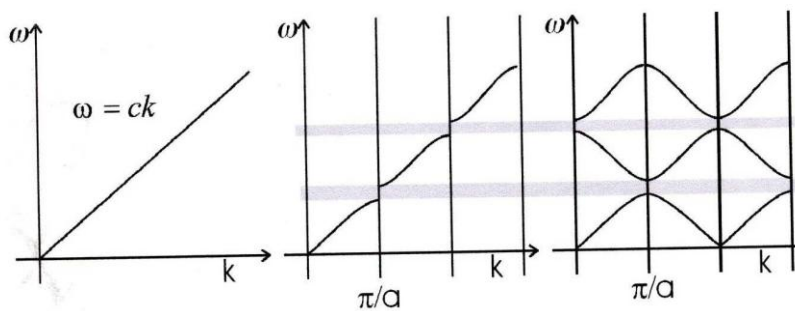
Σε ένα ΠΧ, η $\epsilon(\mathbf{r})$ είναι περιοδική:

$$\epsilon(\mathbf{r}) = \epsilon(\mathbf{r} + \mathbf{R}) \quad (4)$$

Οι εξισώσεις αυτές δείχνουν τον παραλληλισμό μεταξύ, των ηλεκτρονίων σε κρυσταλλικά στερεά και των φωτονίων σε ΡΧ. Φαίνεται πως χάσματα αναπτύσσονται τόσο σε ένα ηλεκτρονικό κρύσταλλο όσο και σε ένα υλικό ΡΧ.



Σχήμα 3α : Διαγραμματική απεικόνιση ελεύθερου ηλεκτρονίου (E/k) και της αντίστοιχης κρυσταλλικής περιοδικότητάς του (a). [9]



Σχήμα 3β : Διαγραμματική απεικόνιση φωτονίου στο κενό (ω/k) και της αντίστοιχης περιοδικότητάς του (a) σε διηλεκτρικό μέσο. [10]

Η σχέση διασποράς ενέργειας $E=E(k)$ για ένα ηλεκτρόνιο στο κενό, είναι παραβολική χωρίς κενά (όταν ένα περιοδικό δυναμικό παρουσιάζει κενά ανοιχτά και ηλεκτρόνια με ενέργειες, σε αυτό εντοπίζονται μη διαδιδόμενες κυματοσυναρτήσεις σε αντίθεση με εκείνες των ηλεκτρονίων σε επιτρεπόμενες ζώνες οι οποίες έχουν επεκταμένες (πολλαπλασιαστικές) κυματοσυναρτήσεις). Κατά παρόμοιο τρόπο, ένα περιοδικό διηλεκτρικό μέσο θα παρουσιάσει περιοχές συχνοτήτων όπου πολλαπλασιαστικά φωτόνια δεν επιτρέπονται και θα είναι αδύνατον να ταξιδέψουν στον κρύσταλλο. Μια σημαντική διαφορά υπάρχει μεταξύ των ηλεκτρονίων και φωτονίων και στηρίζεται στη διαφορετική φύση των κυμάτων τους. Τα φωτόνια, σε αντίθεση με τα ηλεκτρόνια χαρακτηρίζονται και από την πόλωση. Αυτό τελικά οδηγεί σε πολύ πιο περιοριστικές προϋποθέσεις για εμφάνιση χάσματος, που είναι η περίπτωση για τα ηλεκτρόνια. Αντίθετα, η κυματική εξίσωση του ηλεκτρονίου δεν είναι βαθμωτή, δεδομένου ότι ένα ουσιαστικό μέτρο μήκους σχετίζεται με το ηλεκτρόνιο (μήκος κύματος de Broglie) σύμφωνα με την οποία η πιθανή περιοδικότητα μπορεί να μετρηθεί. Ο περιορισμός αυτός δεν ισχύει για τα φωτόνια. Η κυματική εξίσωση των φωτονίων είναι βαθμωτή, ως εκ τούτου, εάν

ένας ΡΧ παρουσιάζει ένα δεδομένο μήκος περιοδικότητας, θα δείξει φωτονικές ζώνες σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων και μια κλιμάκωση, που θα οδηγήσει σε ένα νέο σύστημα με το ίδιο ακριβώς καθεστώς ζωνών αλλά με ανάλογη κλίμακα. Αν μειώσουμε κατά το ήμισυ το μέγεθος θα διπλασιάσουμε την ενέργεια. Οι παράμετροι στις οποίες οι οπτικές ιδιότητες του ΡΧ θα εξαρτηθούν αναφέρονται παρακάτω:

- Το είδος της συμμετρίας της δομής.
- Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_1 / ϵ_2).
- Ο παράγοντας πλήρωσης, ο οποίος είναι, ο λόγος μεταξύ του όγκου που καταλαμβάνεται από κάθε διηλεκτρικό σε σχέση με το συνολικό όγκο του σύνθετου υλικού.
- Η τοπολογία, η οποία μπορεί να είναι:
 - κεραμομετάλλου όπου τα κέντρα σκέδασης απομονώνονται το ένα απ' το άλλο ή δικτύου όπου τα κέντρα σκέδασης είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους.
- Το σχήμα των κέντρων σκέδασης.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν την δομή της φωτονικής ζώνης του ΡΧ και, ως εκ τούτου, τις οπτικές ιδιότητες του. Οι ερευνητές[11] έχουν δημοσιεύσει μια γενική συζήτηση σχετικά με τοπολογίες στη θεωρία της PBG και τη γενίκευση της σε άλλα κλασσικά κύματα. Πρόσφατα, απεδείχθη ότι μία ελαφρά τροποποίηση είτε της συμμετρίας είτε του σχήματος του σκεδαστή μπορεί να μεγεθύνει το κενό.

Μπορεί να φανεί ότι η υψηλή συμμετρία ευνοεί την εμφάνιση φωτονιακών χασμάτων. Στην περίπτωση αυτή η υψηλότερη συμμετρία του εξαγωνικού πλέγματος αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι η ζώνη Brillouin είναι πιο κοντά στο κυκλικό από το τετραγωνικό πλέγμα: οι αποστάσεις του κοινού διαθέσιμου χώρου για τα κύρια σημεία της κενής ζώνης, είναι παρόμοιες. Είναι προφανές ότι μια υψηλή σχετική διηλεκτρική σταθερά ευθύνεται για το ότι οι οπτικές ζώνες αποκλίνουν σημαντικά από την ελεύθερη συμπεριφορά των φωτονίων, παράγοντας ευρύτερα κενά στα επίπεδα Bragg (άκρα ζώνης Brillouin) σε αμοιβαία διαστήματα (βλέπε σχήμα 8 κεφάλαιο 4).

Η έννοια του PBG είναι βαθιά ριζωμένη σε εκείνη της περίθλασης των ακτίνων κατά Bragg. Δυνάμει πολλών ακτίνων σκέδασης κάθε σύνολο κρυσταλλογραφικών επιπέδων μπορεί να οδηγήσει σε μία κορυφή περίθλασης ακτίνων X σε μια ορισμένη συχνότητα που σχετίζεται με την πλεγματική απόσταση. Η περίθλαση ακτίνων X ακολουθεί το νόμο Bragg:

$$2d_{(hkl)} * \sin \theta = m * \lambda \quad , \text{όπου } m = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Όπου $d_{(hkl)}$ είναι η απόσταση μεταξύ ατομικών κρυσταλλικών επιπέδων όπως επισημαίνονται από τους δείκτες Miller (hkl), θ είναι η γωνία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, το m είναι η τάξη περίθλασης και λ είναι το μήκος κύματος ακτίνων X . Τα φωτόνια εκείνα των οποίων τα μήκη κύματος λ ικανοποιούν την συνθήκη Bragg ανακλώνται από τον κρύσταλλο με συνέπεια να μην μπορούν να διαδοθούν στο εσωτερικό του κρυστάλλου. Τα μέγιστα περίθλασης Bragg σε συνήθεις κρυστάλλους, εμφανίζονται στην περιοχή ακτίνων X , δεδομένου ότι οι παράμετροι πλέγματος είναι της τάξης των μερικών Angstroms. Μια εντελώς παρόμοια δράση λαμβάνει χώρα στους ΡΧ. Λόγω της ύπαρξης των κρυσταλλικών επιπέδων στους ΡΧ, μερικές περιοχές

συχνότητας θα διαθλώνται σύμφωνα με τον νόμο του Bragg για την οπτική περιοχή:

$$\lambda_c = 2 \cdot d_{(hkl)} \cdot \sqrt{[(\epsilon) - (\sin^2 \theta_{(hkl)})]} \quad (6)$$

Όπου λ είναι το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, d η πλεγματική απόσταση για την (hkl) κρυσταλλογραφική κατεύθυνση, ϵ η μέση διηλεκτρική σταθερά του PX και θ η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της κανονικής στο σύνολο των κρυσταλλικών επιπέδων τα οποία καθορίζονται από τους (hkl) δείκτες Miller. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ της περίθλασης ακτίνων X σε στερεά και της περίθλασης σε PX είναι το εύρος ζώνης των κορυφών Bragg. Τα μέγιστα περίθλασης ακτίνων X είναι εξαιρετικά περιορισμένες ($\Delta\lambda/\lambda = 10^{-6}$) και κυρίως οργανικά διευρυμένες. Στους PX , η κατάσταση της περίθλασης για μια δεδομένη κατεύθυνση του διανυσματικού κύματος, πληρείται για ένα μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων ($\Delta\lambda/\lambda = 10^{-2}$). Αυτό προκύπτει κυρίως από τις διάφορες αντίθετες διηλεκτρικές σταθερές που εμφανίζονται για αυτά τα δύο πολύ διαφορετικά μήκη κύματος: η διαφορά στους δείκτες διάθλασης ακτινοβολίας ακτίνων X είναι ελάχιστη στην ενότητα, ενώ στα οπτικά μήκη κύματος είναι μάλλον μεγαλύτερη. Τελικά, οι κορυφές Bragg στο PX είναι τόσο ευρείες, ώστε να επικαλύπτονται μόνο άλλες που προέρχονται από διαφορετικά κρυσταλλογραφικά επίπεδα. Αυτό συμβαίνει σε μία εξαγωνική συμμετρία, σε αντίθεση με την τετραγωνική συμμετρία στην οποία τα κενά δεν επικαλύπτονται. Κατά συνέπεια, θα μπορούσε να είναι δυνατό να βρεθεί μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων όπου το φωτόνιο δεν επιτρέπεται να διαδοθεί ανεξάρτητα από την κατεύθυνση. Ένα υλικό με αυτές τις ιδιότητες ονομάζεται PX με ένα πλήρες κενό (χάσμα). [12]

Με αυτά τα δεδομένα τα φωτόνια (ηλεκτρομαγνητικά κύματα) μπορούν να διευθετηθούν μέσα σε μια περιοδική δομή. Στο *σχήμα 3* γίνεται ο παραλληλισμός μεταξύ της πορείας του ηλεκτρονίου σε κρυσταλλικό στερεό και του φωτονίου σε φωτονιακό κρύσταλλο και παρουσιάζονται τα χάσματα που αναπτύσσονται στα όρια των ηλεκτρονικών κρυστάλλων και στα υλικά που παρουσιάζουν φωτονιακά χάσματα αντίστοιχα.

Αυτή η δομή έχει τη δυνατότητα να αποβάλλει τα φωτόνια με ορισμένα μήκη κύματος επομένως λειτουργεί ως μονωτής του φωτός και το φαινόμενο αναφέρεται ως «φωτονιακό χάσμα ζωνών». Στην απλούστερη περίπτωση της μονοδιάστατης δομής (1D) η οποία έχει εναλλασσόμενα στρώματα δύο διηλεκτρικών υλικών, όταν εισάγεται ένα στιγμιαίο κύμα ανακλάται μερικώς στα όρια των διηλεκτρικών στρωμάτων.

Εάν τα μερικώς ανακλώμενα κύματα είναι σε φάση όπου επικαλύπτονται, διαμορφώνουν ένα συνολικό ανακλώμενο κύμα που δεν μπορεί να διέλθει από το μέσο. [13]

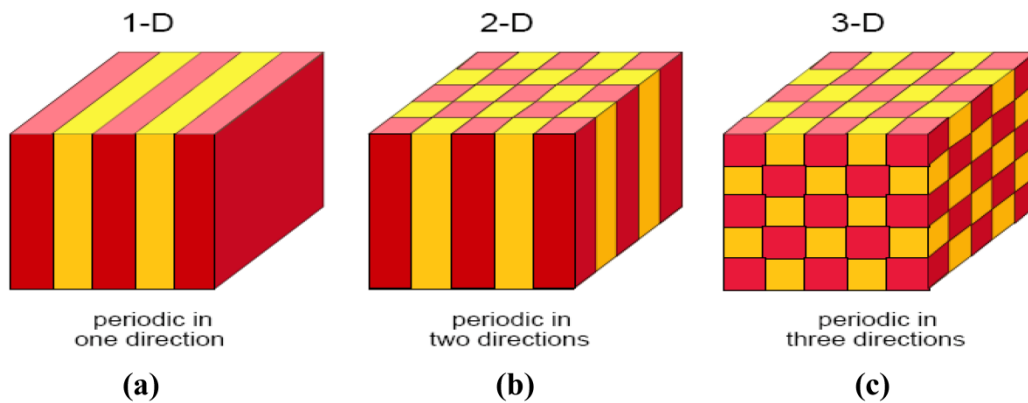
3. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ : ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΟΥ BLOCH, ΣΥΝΕΧΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΖΩΝΕΣ ΧΑΣΜΑΤΩΝ

3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΑΣΜΑΤΩΝ ΖΩΝΩΝ

Οι φωτονικοί κρύσταλλοι είναι περιοδικοί, κατασκευασμένοι από ηλεκτρομαγνητικά μέσα, και παρουσιάζουν χάσματα ζωνών (band gaps): δηλαδή πεδία συχνότητας κάποιου μήκους κύματος φωτός που δεν μπορούν να μεταδοθούν μέσα από την δομή. Αυτή η περιοδικότητα, της οποίας η κλίμακα είναι ανάλογη του μήκους κύματος του φωτός στην ζώνη του χάσματος, είναι η ηλεκτρομαγνητική αναλογία του κρυσταλλικού ατομικού πλέγματος, όταν το τελευταίο δρα στην κυματική μορφή του ηλεκτρονίου, για να παράξει τις δικές του ζώνες χάσμάτων, ημιαγωγούς και άλλα ακόμη σταθερής μορφής παράγωγα. Η μελέτη των φωτονικών κρυστάλλων αντίστοιχα διέπεται από το θεώρημα Bloch – Floquet, και σκόπιμα εισάγονται ατέλειες στον κρύσταλλο (ανάλογα με τις ηλεκτρονικές προσμίξεις) που προκαλούν τοπικές ηλεκτρομαγνητικές καταστάσεις όπως: γραμμικούς κυματοδηγούς και σημεία κοιλότητας. Ο κρύσταλλος μπορεί έτσι να σχηματίσει ένα είδος τέλειου οπτικού «μονωτήρα», ο οποίος μπορεί να περιορίσει το φως χωρίς απώλειες γύρω από αιχμηρές γωνίες, με την χρήση μέσων χαμηλού δείκτη διάθλασης και μέσα από κοιλότητες για τον έλεγχο ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων. Παρακάτω, εισάγουμε το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο των φωτονικών κρυστάλλων σε μια, δύο και τρεις διαστάσεις (σχηματικά απεικονίζεται στο σχήμα 4), καθώς και υβριδικές δομές που συνδυάζουν τα αποτελέσματα των φωτονικών κρυστάλλων σε συγκεκριμένες καταστάσεις με περισσότερο συμβατικούς δείκτες που οδηγούν σε άλλες κατευθύνσεις.

Η μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιοδικά μέσα μελετήθηκε πρώτα από τον λόρδο Rayleigh το 1987, σε σύνδεση με τις ιδιόμορφες ανακλαστικές ιδιότητες ενός κρυσταλλικού ορυκτού με περιοδικά «αδελφοποιημένα» επίπεδα (στα οποία η διηλεκτρική σταθερά υφίσταται «αναστροφή» (mirror flip)). Αυτά αντιστοιχούν σε μονοδιάστατους φωτονικούς κρυστάλλους, και αναγνωρίστηκε το γεγονός ότι έχουν ένα στενό χάσμα ζωνών που απαγορεύει τη διέλευση του φωτός μέσα απ' τα επίπεδα. Αυτό το χάσμα ζωνών εξαρτάται απ' τη γωνία, λόγω των διαμορφωμένων περιοδικοτήτων που δέχεται κατά τη διάδοση του φωτός και σε μη κανονικές συχνότητες παράγεται ένα ανακλώμενο χρώμα που ποικίλει ανάλογα με τη γωνία (ένα παρόμοιο αποτέλεσμα είναι υπεύθυνο για πολλά άλλα ιριδίζοντα χρώματα στη φύση, όπως τα φτερά της πεταλούδας και τα κοχύλια). Επίσης τα πολυεπίπεδα φιλμ δέχτηκαν επισταμένη έρευνα τον περασμένο αιώνα, δεν έχουν περάσει 100 χρόνια από όταν οι ερευνητές [14] συνδύασαν τα «εργαλεία» του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού και της φυσικής στερεών. Αυτές ήταν οι έννοιες που έδωσαν την κατεύθυνση για τα φωτονικά χάσματα ζωνών δύο και τριών διαστάσεων. Αυτή η γενίκευση, απ' όπου και εμπνεύστηκε το όνομα «φωτονικοί κρύσταλλοι», οδήγησε σε πολλές μεταγενέστερες βελτιώσεις στην κατασκευή, τη θεωρία και την εφαρμογή τους από την

ολοκληρωμένη οπτική στην αρνητική διάθλαση των οπτικών ινών που καθοδηγούν το φως στον αέρα. [15]



Σχήμα 4 : Σχηματική απεικόνιση των περιοδικών φωτονικών κρυστάλλων σε μια, δύο και τρεις κατευθύνσεις, όπου η περιοδικότητα είναι στο υλικό δομής του (τυπικά διηλεκτρισμένο). Μόνο μια τρισδιάστατη περιοδικότητα, με μια πιο σύνθετη τροπολογία απ' ότι φαίνεται εδώ, μπορεί να υποστηρίξει ένα κατευθυντικό χάσμα ζωνών των φωτονιακών κρυστάλλων. [16]

3.2. ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΜΕΣΑ

Η μελέτη της διάδοσης κυμάτων σε τρισδιάστατα περιοδικά μέσα έγινε πρώτα από τον Felix Bloch το 1928, εν αγνοία του επέκτεινε το θεώρημα μιας διάστασης του G. Floquet το 1883. Ο Bloch απέδειξε ότι τα κύματα σε ένα τέτοιο μέσο μπορούν να μεταδοθούν χωρίς σκέδαση. Αν και ο Bloch μελέτησε κβαντομηχανική, οδηγήθηκε στο εκπληκτικό συμπέρασμα ότι τα ηλεκτρόνια σε ένα αγωγό σκεδάζονται μόνο από τις ατέλειες και όχι από τα περιοδικά ιόντα. Οι ίδιες τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν στον ηλεκτρομαγνητισμό συνδυάζοντας τις εξισώσεις του Maxwell με τις εξισώσεις του Schrodinger . Συνδυάζοντας τους αυτοτελείς νόμους του Faraday και του Ampere σε σταθερή συχνότητα ω , με χρονική εξάρτηση $e^{-i\omega t}$, μπορεί να ληφθεί μια εξίσωση μόνο, το μαγνητικό πεδίο H:

$$\vec{\nabla} \cdot \frac{1}{\epsilon} \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \vec{H} \quad (1)$$

Όπου το ϵ είναι η διηλεκτρική σταθερά και c είναι η ταχύτητα του φωτός. Αυτή η εξίσωση έχει την ιδιοτιμή $\left(\frac{\omega}{c}\right)^2$ και έναν τελεστή $\vec{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon}\right) \vec{\nabla} \cdot$, υπό το εσωτερικό γινόμενο $\int_{H^*} \vec{H}'$ μεταξύ των δύο πεδίων \vec{H} και \vec{H}' (οι δύο καμπές αντιστοιχούν χονδρικά στην «κινητική ενέργεια» και το $\frac{1}{\epsilon}$ στο «δυναμικό» συγκρινόμενο με το $\nabla^2 + V$). Μερικές φορές είναι πιο βολικό να γράφουμε αντί μιας γενικευμένης αμφίδρομης εξίσωσης στο ηλεκτρικό πεδίο την εξίσωση με μορφή \vec{E} , $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \epsilon \vec{E}$, η οποία διαχωρίζει τους όρους της κινητικής από αυτούς της δυναμικής ενέργειας. Τα ηλεκτρικά πεδία που βρίσκονται σε υψηλότερο ϵ , δηλαδή έχουν χαμηλότερο δυναμικό, θα έχουν

χαμηλότερο ω . Αυτό εξετάζεται περαιτέρω στο πλαίσιο του θεωρήματος Μεταβολής στην εξίσωση (3).

Έτσι, τα ίδια θεωρήματα όπως εκείνα στην κβαντομηχανική μπορούν να εφαρμοστούν στις λύσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το γεγονός ότι το πρόσημο είναι πάντα θετικό (για πραγματικό $\epsilon > 0$) σημαίνει ότι οι ιδιοσυχνότητες ω είναι πραγματικές, και επίσης οδηγεί σε ορθογωνιότητα, διαμορφώνει μεταβαλλόμενες καταστάσεις και διαταραχή στην θεωρία σχέσεων που θα συζητήσουμε περαιτέρω παρακάτω. Μια σημαντική διαφορά σε σύγκριση με την κβαντομηχανική είναι ότι υπάρχει ένας εγκάρσιος περιορισμός: κατά κανόνα αποκλείονται συνήθως $\vec{\nabla} \cdot \vec{H} \neq 0$ (ή $\vec{\nabla} \cdot \epsilon \cdot \vec{E} \neq 0$) οι συναρτήσεις, οι οποίες βρίσκονται στο $\omega=0$, δηλαδή οι λύσεις στατικού πεδίου χωρίς μαγνητικό (ή ηλεκτρικό) φορτίο είναι απαγορευτικές. [17]

3.2.1 ΚΥΜΑΤΑ BLOCH ΚΑΙ ΖΩΝΕΣ BRILLOUIN

Ένας φωτονικός κρύσταλλος αντιστοιχεί στην περιοδική διηλεκτρική συνάρτηση $\epsilon(\vec{x}) = \epsilon(\vec{x} + \vec{R}_i)$ για ορισμένα αρχικά πλέγματα φορείς \vec{R}_i ($i=1,2,3$ για την περιοδικότητα κρυστάλλων και για τις 3 διαστάσεις). Σε αυτή την περίπτωση το θεώρημα Bloch – Floquet για περιοδικότητες συναρτήσεων, αναφέρει ότι η λύση στην εξίσωση (1) μπορεί να επιλεγεί από τη μορφή $\vec{H}(\vec{x}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}} \vec{H}_{n,k}(\vec{x})$ με ιδιοτιμές $\omega_n(\vec{k})$, όπου $\vec{H}_{n,k}$ είναι μια περιοδική, περιβληματική συνάρτηση που ικανοποιεί την:

$$\left(\vec{\nabla} + i\frac{\vec{x}}{k}\right) \cdot \frac{1}{\epsilon} \left(\vec{\nabla} + i\frac{\vec{x}}{k}\right) \cdot \vec{H}_{n,k} = \left(\frac{\omega_n \vec{k}}{c}\right)^2 \vec{H}_{n,k} \quad (2)$$

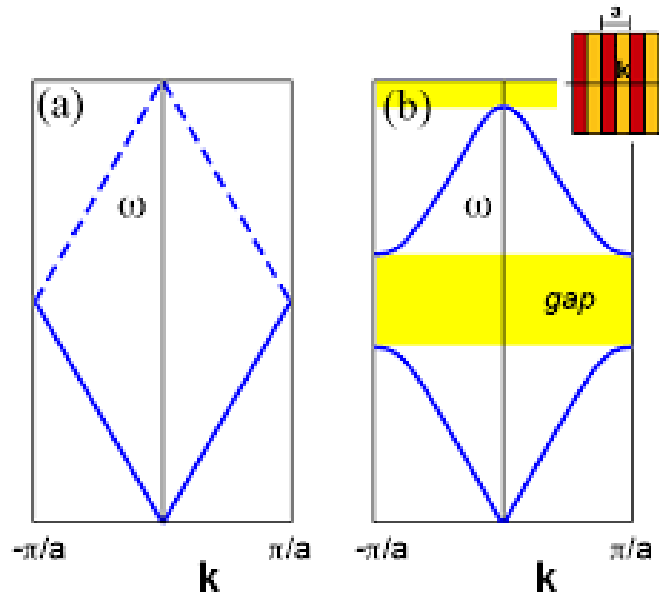
δίδοντας μία διαφορετική αμφίδρομη συνάρτηση πάνω από την αρχική μορφή του πλέγματος σε κάθε κυματοδιάνυσμα \vec{k} του Bloch.

Αυτό το αρχικό μοντέλο είναι ένα πεπερασμένο πεδίο αν η δομή είναι περιοδική προς όλες τις κατευθύνσεις οδηγώντας σε διακριτές ιδιοτιμές με $n = 1,2,\dots$. Αυτές οι ιδιοτιμές του $\omega_n(\vec{k})$ είναι συνεχείς συναρτήσεις του \vec{k} , που αποτελούν διακριτές «ζώνες», όταν σχεδιάζονται σε αντίθεση με το τελευταίο. Σε μια «δομή ζωνών» ή σε διάγραμμα διασποράς τόσο το ω όσο και το \vec{k} είναι σταθερές ποσότητες, πράγμα που σημαίνει ότι ένα διάγραμμα ζώνης χαρτογραφεί όλες τις πιθανές αλληλεπιδράσεις του συστήματος, σημειώνεται επίσης ότι το \vec{k} δεν απαιτείται να είναι πραγματικό (το σύμπλεγμα του \vec{k} δίνει παροδικούς τρόπους που μπορεί να διασπαστεί εκθετικά απ' τα όρια ενός πεπερασμένου κρυστάλλου, ο οποίος δεν μπορεί να υπάρχει διάσπαρτος). [18]

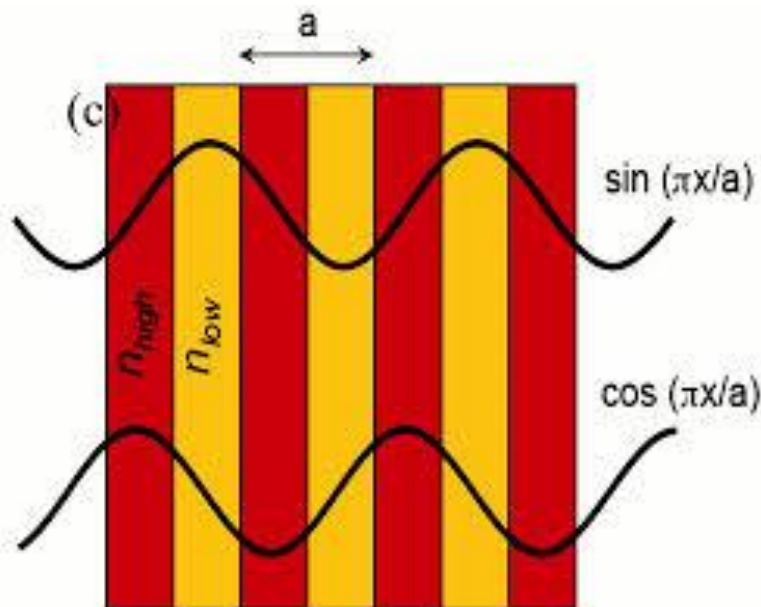
3.2.2 Η ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΚΕΝΩΝ ΖΩΝΩΝ

Μια πλήρης φωτονική ζώνη κενού είναι μια σειρά από ω τα οποία δεν είναι πραγματικές λύσεις (πραγματικά $\vec{\omega}_k$) των εξισώσεων (2) Maxwell για κανένα \vec{k} , δεν περιλαμβάνονται από πραγματικές καταστάσεις πάνω και κάτω απ' τα κενά. Υπάρχουν επίσης ελλειπή κενά, τα οποία εντοπίζονται μόνο σ' ένα υποσύνολο όλων των πιθανών κυματοδιανυσμάτων, πολώσεων ή/και συμμετριών.

Θεωρούμε ένα σύστημα μιας διάστασης με ενιαίο $\epsilon=1$, το οποίο έχει κύμα πεδίου τη συνάρτηση $\omega(k) = ck$, όπως απεικονίζεται στο σχ.5 (αριστερά). Το ϵ αυτό έχει πολύ μικρή περιοδικότητα a για κάθε $a \geq 0$, με $a=0$ δίνει τη συνήθη απεριόριστη σχέση διασποράς. Μπορούμε ωστόσο, να ονομάσουμε τις καταστάσεις αναφορικά με τις λειτουργίες και τους κυματοφορείς που περιβάλλονται στον Bloch για κάποιο $a \neq 0$, σε κάποια περίπτωση οι ζώνες για $|k| > \pi/a$ μετατρέπονται («διπλώνονται») στην πρώτη Brillouin ζώνη, όπως φαίνεται απ' τις διακεκομμένες γραμμές στο σχ.5 (αριστερά). Ειδικότερα η λειτουργία $k = -\pi/a$ σε αυτή την περιγραφή βρίσκεται τώρα σε ισοδύναμο κυματοδιάνυσμα με τη λειτουργία $k = \pi/a$ και την ιδιοσυχνότητα. Αυτός ο τυχαίος εκφυλισμός είναι ένα κατασκευάσμα της «τεχνητής» περιόδου που έχουμε επιλέξει. Αντί να γράφουμε αυτές τις διανυσματικές λύσεις με τα ηλεκτρικά πεδία $\vec{E}(x) \sim e^{(\pm) i\pi x/a}$, μπορούμε ισοδύναμα να γράφουμε γραμμικούς συνδυασμούς που να είναι άρτιες (even) και περιττές (odd) συναρτήσεις $e(x) = \cos(\pi x/a)$ και $o(x) = \sin(\pi x/a)$ όπως φαίνεται στο σχήμα 6 και στο $\omega = c \pi/a$. Τώρα όμως ας υποθέσουμε ότι έχουμε διαταράξει το ϵ έτσι ώστε να είναι μη τετριμμένα περιοδικό με περίοδο a , για παράδειγμα ένα ημιτονοειδές $\epsilon(x) = 1 + \Delta \cos(2\pi x/a)$ ή ένα τετραγωνικό κύμα όπως στο ένθετο του σχ.5. Με την παρουσία ενός τέτοιου ταλαντωμένου «δυναμικού», ο τυχαίος εκφυλισμός μεταξύ $e(x)$ και $o(x)$ έχει σπάσει: υποθέτοντας ότι $\Delta > 0$, τότε το πεδίο $e(x)$ είναι πιο συγκεντρωμένο στις υψηλότερες, $-\epsilon$, περιοχές από ότι το $o(x)$ και έτσι βρίσκεται σε μικρότερη συχνότητα. Αυτή η αντίθετη μετατόπιση των άκρων των ζωνών δημιουργεί ένα χάσμα ζωνών, όπως απεικονίζεται στο σχ.5 (δεξιά) (Στην πραγματικότητα, απ' την θεωρία διαταραχών που περιγράφεται στη συνέχεια, μπορεί κανείς να δείξει ότι για $\Delta \ll 1$ το χάσμα ζωνών σαν κλάσμα της συχνότητας του μέσου χάσματος, είναι $\Delta\omega / \omega = \Delta/2$).



Σχήμα 5: (αριστερά): σχέση διασποράς (διαγραμματικής ζώνης), η συχνότητα ω έναντι του κυματάρηθου k , ενός μονοδιάστατου μέσου, όπου οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν την «αναδίπλωση», αποτέλεσμα της εφαρμογής του θεωρήματος του Bloch με μια τεχνητή περιοδικότητα a . (δεξιά): σχηματική επίδραση σχετικά με τις ζώνες μιας φυσικής, περιοδικής, διηλεκτρικής μεταβολής (ένθετο), όπου ένα κενό έχει ανοίξει απ' το διαχωριστικό του εκφυλισμού στο $k = \pm \pi/a$ στα όρια της ζώνης Brillouin (όπως ένα κενό υψηλότερης τάξης στο $k=0$). [19]



Σχήμα 6: Σχηματική προέλευση της ζώνης κενού σε μια διασταση. Τα εκφυλισμένα $k=\pm\pi/a$ κυματοεπίπεδα ενός ενιαίου μέσου χωρίζονται σε $\sin(\pi x/a)$ και $\cos(\pi x/a)$ στάσιμων κυμάτων από μια διηλεκτρική περιοδικότητα, σχηματίζοντας τις κάτω και άνω ακμές της ζώνης κενού. Αντιστοίχως η πρώτη έχει κορυφές ηλεκτρικού πεδίου σε υψηλή διηλεκτρική (n_{high}) και έτσι θα βρίσκεται σε χαμηλότερη συχνότητα από την τελευταία, η οποία κορυφώνεται στην χαμηλή διηλεκτρική. [20]

Από τα ίδια επιχειρήματα, συνάγεται ότι οποιαδήποτε περιοδική διηλεκτρική μεταβολή σε μια διάσταση θα οδηγήσει σε μια ζώνη κενού, ακόμα και μικρή ζώνη κενού για μια μικρή μεταβολή. Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα αναγνωρήστηκε από το Λόρδο Rayleigh το 1887.

Τότε προκύπτει άμεσα από τις ιδιότητες των αμφίδρομων εξισώσεων ότι οι ιδιοτιμές ελαχιστοποιούν ένα μεταβλητό πρόβλημα:

$$\omega_{n,k}^2 = \min_{E_{n,k}} \frac{\int |(\nabla + i\vec{k})^* \cdot \vec{E}_{n,k}|^2}{\int \epsilon |\vec{E}_{n,k}|^2} * c^2 \quad (3)$$

Από την άποψη του περιεχομένου του περιοδικού ηλεκτρικού πεδίου $\vec{E}_{n,k}$, ο αριθμητής ελαχιστοποιεί την «κινητική ενέργεια» και ο παρονομαστής ελαχιστοποιεί τη «δυναμική ενέργεια». Εδώ, οι ζώνες με $n > 1$ περιορίζονται να είναι κάθετες προς τις χαμηλότερες ζώνες:

$$\int_{\vec{H}^*_{m,k}} \vec{H}^*_{m,k} \cdot \int_{\vec{H}_{m,k}} \vec{H}_{m,k} = \int \epsilon \vec{E}_{n,k} \cdot \vec{E}_{n,k} = 0 \quad (4)$$

Για $m < n$. Ως εκ τούτου, σε κάθε \vec{k} θα υπάρχει ένα χάσμα μεταξύ των χαμηλότερων «διηλεκτρικά» ζωνών συμπυκνωμένων στην υψηλή διηλεκτρική σταθερά (χαμηλό δυναμικό) και στις υψηλότερες «αέριες» ζώνες που είναι λιγότερο συμπυκνωμένες στην υψηλή διηλεκτρική: οι ζώνες αέρα πιέζονται προς τα έξω από την κατάσταση ορθογωνιότητας, ή αλλιώς πρέπει να έχουν γρήγορες ταλαντώσεις που αυξάνουν την κινητική ενέργεια. (Οι ζώνες διηλεκτρικού αέρα είναι ανάλογες με τις ζώνες αγωγιμότητας σε ημιαγωγούς.)

Προκειμένου να προκύψει μια ολοκληρωμένη ζώνη κενού σε 2 ή 3 διαστάσεις δυο επιπλέον εμπόδια πρέπει να ξεπεραστούν. Πρώτον, αν και σε κάθε κατεύθυνση συμμετρίας του κρυστάλλου (και κάθε σημείο \vec{k}) υπάρχει ζώνη κενού από την μονοδιάστατη άποψη, αυτές οι ζώνες κενού δεν θα επικαλύπτονται στην συχνότητα απαραίτητα (ή ακόμα βρίσκονται μεταξύ των ίδιων ζωνών). Προκειμένου να επικαλύπτονται τα κενά πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλα, πράγμα που συνεπάγεται ένα ελάχιστο ϵ διαφοροποιημένο (συνήθως το λιγότερο 4/1 σε 3D). Δεδομένου ότι η μονοδιάστατη συχνότητα του μέσου κενού είναι περίπου $c\pi/\alpha\sqrt{\epsilon}$ μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την περίοδο α , είναι επίσης χρήσιμο εάν η περιοδικότητα είναι σχεδόν η ίδια σε διαφορετικές κατευθύνσεις – κατά συνέπεια τα μεγαλύτερα κενά συνήθως προκύπτουν για εξαγωνικά πλέγματα σε 2D και fcc πλέγματα σε 3D τα οποία έχουν τις περισσότερες σχεδόν κυκλικές/σφαιρικές ζώνες Brillouin. Δεύτερον, πρέπει κανείς να λάβει υπόψη τις διανισματικές οριακές συνθήκες για το ηλεκτρικό πεδίο: κινούμενο πέρα από ένα διηλεκτρικό όριο ϵ σε κάποιο $\epsilon' < \epsilon$, το αντίστροφο δυναμικό $\epsilon |\vec{E}|^2$ θα μειωθεί ασυνεχώς αν το \vec{E} είναι παράλληλο προς την διεπαφή (\vec{E}_{\parallel} συνεχές) και θα αυξηθεί ασυνεχώς αν το E είναι κάθετο προς τη διεπαφή ($\epsilon \vec{E}_{\perp}$ συνεχές). Αυτό σημαίνει ότι, κάθε φορά που οι ηλεκτρικές γραμμές πεδίου διαπερνούν ένα διηλεκτρικό όριο τους είναι πολύ πιο δύσκολο να περιέχουν σε υψηλό βαθμό την ενέργεια πεδίου μέσα στην υψηλή διηλεκτρική, και το αντίστροφο ισχύει όταν οι γραμμές πεδίου είναι

παράλληλα προς ένα όριο. Έτσι, προκειμένου να ληφθεί μια μεγάλη ζώνη κενού μια διηλεκτρική δομή θα πρέπει να αποτελείται από λεπτές, συνεχείς φλέβες/μεμβράνες κατά μήκος των οποίων οι ηλεκτρικές γραμμές πεδίου μπορούν να τρέξουν με αυτή τη φορά. Έτσι η χαμηλότερη ζώνη(-ες) να μπορεί να περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό, ενώ οι ανώτερες ζώνες να αναγκάζονται σε μια πολύ υψηλότερη συχνότητα, επειδή οι λεπτές φλέβες δεν μπορούν να υποστηρίξουν πολλαπλές λειτουργίες (εκτός από 2 ορθογώνιες πολώσεις). Οι φλέβες πρέπει επίσης να τρέχουν προς όλες τις κατευθύνσεις, έτσι ώστε αυτή η απομόνωση να μπορεί να λάβει χώρα για όλα τα \vec{k} και τις πολώσεις, απαιτώντας μια πολύπλοκη τοπολογία στον κρύσταλλο.

Τελικά, όμως, σε δύο ή τρεις διαστάσεις μπορούμε να προτείνουμε μόνο εμπειρικούς κανόνες για την ύπαρξη ενός χάσματος σε μια περιοδική δομή, δεδομένου ότι δεν έχουν οριστεί αυστηρά κριτήρια ακόμη. Αυτό έκανε το σχεδιασμό των 3D φωτονικών κρυστάλλων μια διαδικασία δοκιμής και λάθους, με το πρώτο παράδειγμα από τον Ho et al. όπου ένα πλήρες 3D χάσμα να έρχεται τρία χρόνια μετά την αρχική ιδέα του, το 1987. Όπως συζητείται από την τελική ενότητα παρακάτω, ένας μικρός αριθμός οικογενειών 3D φωτονικών κρυστάλλων έχουν έκτοτε ταυτοποιηθεί, με πολλές παραλλαγές αυτών να έχουν διερευνηθεί για την παραγωγή. [21]

3.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Επειδή οι φωτονικοί κρύσταλλοι είναι γενικά πολύπλοκοι, με υψηλό δείκτη αντίθεσης, δύο και τριών διαστάσεων διανυσματικά συστήματα, οι αριθμητικοί υπολογισμοί είναι ένα κρίσιμο μέρος των πιο θεωρητικών αναλύσεων. Αυτοί οι υπολογισμοί συνήθως εμπίπτουν σε τρεις κατηγορίες: στο πεδίο των «αριθμητικών πειραμάτων» χρόνου, δηλαδή το μοντέλο της χρονικής εξέλιξης των πεδίων με αυθαίρετες αρχικές συνθήκες σε ένα διακριτό σύστημα (π.χ. πεπερασμένων διαφορών), στις μήτρες σταθερής συχνότητας μεταφοράς, όπου οι μήτρες σκέδασης υπολογίζονται σε κάποια βάση για να εξαχθεί μετάδοση / ανάκλαση μέσω της δομής και στις μεθόδους στο πεδίο συχνοτήτων για να εξαχθούν άμεσα τα πεδία Bloch και οι συχνότητες περνώντας διαγώνια από τον ιδιοχειριστή. Οι δύο πρώτες κατηγορίες ενστικτωδώς αντιστοιχούν σε άμεσα μετρήσιμες ποσότητες, όπως η μετάδοση (αν και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν π.χ. ιδιοτιμές), ενώ η τρίτη είναι πιο αφηρημένη, αποδίδοντας τα διαγράμματα ζώνης που παρέχουν έναν οδηγό για την ερμηνεία των μετρήσεων, καθώς και ένα σημείο εκκίνησης για τον σχεδιασμό διατάξεων και ημι-αναλυτικών μεθόδων. [22]

3.2.4 ΗΜΙ-ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ: ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ

Όπως στην κβαντική μηχανική, οι ιδιαίτερες καταστάσεις μπορεί να είναι το σημείο εκκίνησης για πολλές αναλυτικές και ημι-αναλυτικές μελέτες. Μια συνηθισμένη τεχνική είναι η θεωρία διαταραχών, που εφαρμόζεται σε μικρές αποκλίσεις από ένα ιδανικό σύστημα - στενά συνδεδεμένο με την έκφραση

μεταβολής (3). Η θεωρία διαταραχών μπορεί να αξιοποιηθεί για να εξεταστούν τα αποτελέσματά, όπως μη γραμμικότητες, η απορρόφηση υλικού, διαταραχή κατασκευής και η εξωτερική τονικότητα. Δεν είναι μόνο η θεωρία διαταραχών χρήσιμη από μόνη της, καταδεικνύει επίσης και τις δύο παλαιές και παραδόξως νέες δυνατότητες που προκύπτουν σε αυτές τις αναλύσεις του ηλεκτρομαγνητισμού σε σύγκριση με βαθμιδωτά προβλήματα.

Δίνεται ένα αδιατάρακτο ιδιοπεδίο $\vec{E}_{n,k}$ για μια δομή ϵ , η διόρθωση χαμηλότερης τάξης $\Delta\omega_n^{(1)}$ στην ιδιοσυχνότητα από μια μικρή διαταραχή $\Delta\epsilon$ δίνεται από:

$$\Delta\omega_n^{(1)} = -\frac{\omega_n(\vec{k})}{2} \frac{\int \Delta\epsilon |\vec{E}_{n,k}|^2}{\int \epsilon |\vec{E}_{n,k}|^2}, \quad (5)$$

όπου το ολοκλήρωμα είναι πάνω από την κυψελίδα (cell) του πλέγματος. [23]

4. ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΦΩΤΟΝΙΚΟΙ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ

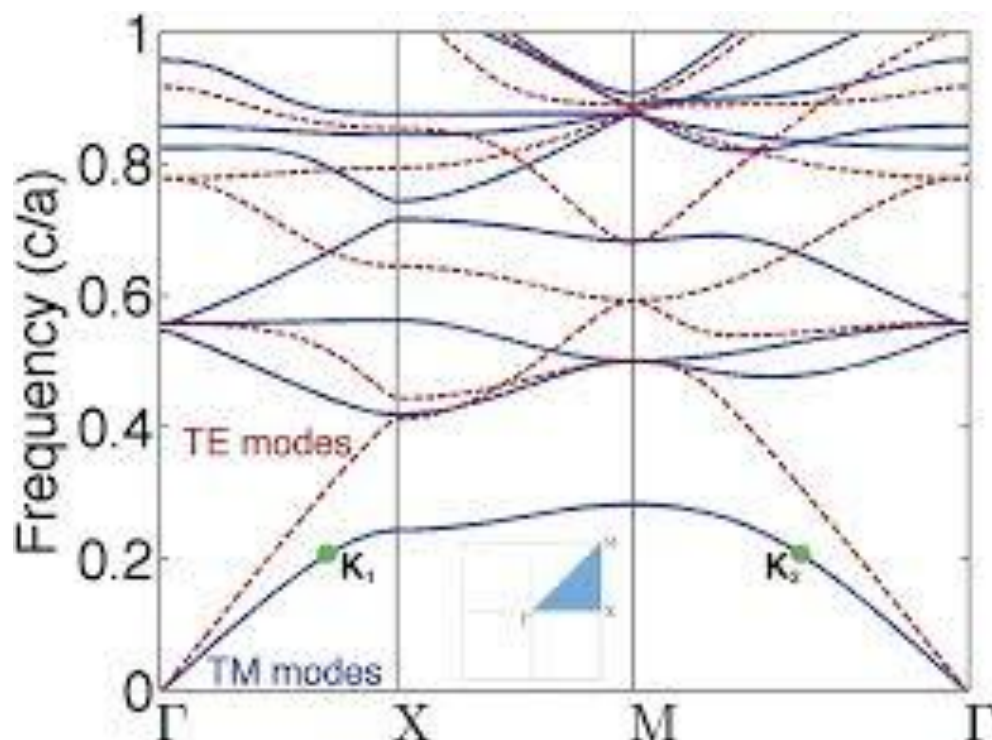
Μετά τον προσδιορισμό των μονοδιάστατων ζωνών χασμάτων, χρειάστηκε ένας πλήρης αιώνας για να προστεθεί μια δεύτερη διάσταση, και τρία χρόνια επιπλέον για να προστεθεί η τρίτη. Θα πρέπει, συνεπώς, να μην αποτελεί έκπληξη ότι τα συστήματα δύο διαστάσεων παρουσιάζουν τα περισσότερα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά των φωτονικών κρυστάλλων, από τις σημαντικές ζώνες Brillouin στην τοπολογική ευαισθησία στο ελάχιστο δείκτη αντίθεσης, και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να παρουσιάσουν προτεινόμενες επινοήσεις φωτονικών κρυστάλλων. Το κλειδί για την κατανόηση των φωτονικών κρυστάλλων σε δύο διαστάσεις είναι να συνειδητοποιήσουμε ότι τα πεδία σε 2D μπορούν να χωριστούν σε δύο πολικότητες με συμμετρία: την TM (εγκάρσια μαγνητική), στην οποία το μαγνητικό πεδίο είναι στο (XY) επίπεδο και το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο σε αυτό (Z), και την TE (εγκάρσια ηλεκτρική), στην οποία το ηλεκτρικό πεδίο είναι στο (XY) επίπεδο και το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο σε αυτό (Z).

Ανταποκρινόμενες στις πολώσεις, υπάρχουν δύο βασικές τοπολογίες για 2D φωτονικούς κρυστάλλους, όπως απεικονίζονται στο σχ. 7 (κορυφή): ράβδοι υψηλού δείκτη που περιβάλλονται από χαμηλό δείκτη (επάνω) και οπές χαμηλού δείκτη σε υψηλό δείκτη (κάτω). Εδώ, χρησιμοποιούμε ένα εξαγωνικό πλέγμα, επειδή, όπως προαναφέρθηκε, δίνει τα μεγαλύτερα κενά. Υπενθυμίζουμε ότι μια φωτονική ζώνη κενού προϋποθέτει ότι οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου πρέπει να κινούνται κατά μήκος λεπτων φλεβών: ώστε, οι ράβδοι να ταιριάζουν καλύτερα στο φως TM (με το \vec{E} να είναι παράλληλα με τις ράβδους), καθώς και οι οπές να ανταποκρίνονται καλύτερα στο TE φως (με το \vec{E} να τρέχει γύρω από τις οπές). Αυτή η προτίμηση εκφράζεται στα διαγράμματα ζωνών, που εμφανίζονται στο σχ. 7, στα οποία οι ράβδοι / οπές (επάνω / κάτω) έχουν μια ισχυρή TM / TE ζώνης χάσματος. Για αυτά τα διαγράμματα, οι ακτίνες ράβδου / οπής επιλέγονται να είναι 0,2α / 0,3α, όπου α είναι η σταθερά πλέγματος (η περιodicότητα του κοντινότερου) και η υψηλή / χαμηλή ε είναι 12/1. Οι TM/TE ζώνες χασμάτων είναι τότε το 47% / 28% ως κλάσμα της συχνότητας ενός μέσου κενού, αλλά αυτές οι ζώνες χασμάτων απαιτούν ένα ελάχιστο αντίθεσης στο 1,7/1 και 1,9/1, αντίστοιχα. Εξάλλου, είναι σύνηθες να δίνονται οι συχνότητες ω σε μονάδες μέτρησης 2πc/α που ισοδυναμεί με α/λ (όπου λ είναι το μήκος κύματος του κενού) – οι εξισώσεις Maxwell είναι κλίμακας αμετάβλητης και οι ίδιες λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε μήκη κύματος απλά επιλέγοντας το κατάλληλο α. Για παράδειγμα, το TM του μέσου κενού ω στις μονάδες αυτές είναι 0,36, έτσι ώστε αν κάποιος ήθελε αυτό να αντιστοιχεί σε λ = 1.55μm θα χρησιμοποιήσει το α = 0,36 * 1.55μm = 0.56μm.

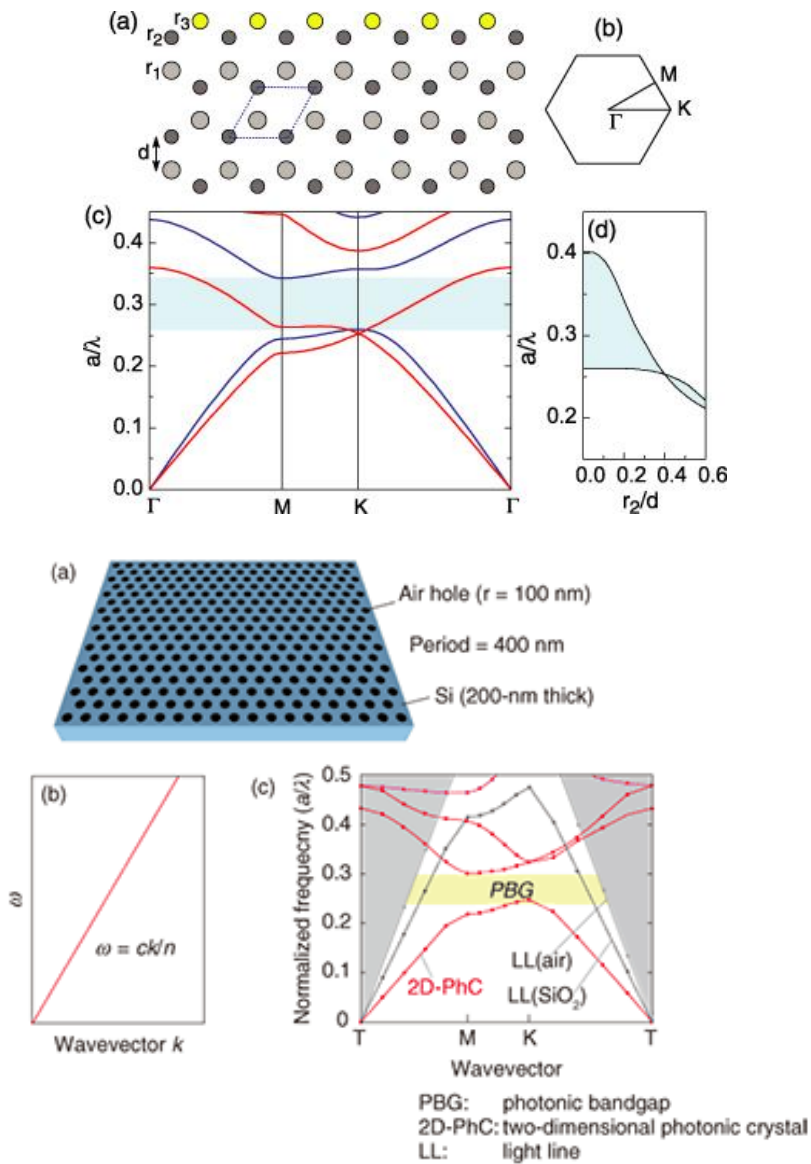
Η περιοχή Brillouin (ένα εξάγωνο), με την ζώνη Brillouin σκιασμένη (μετά την εξαπλάσια συμμετρία του κρυστάλλου), (φαίνεται στο σχ. 8). Στις γωνίες (υψηλά σημεία συμμετρίας) αυτής της ζώνης δίνονται κανονικά ονόματα, όπου το Γ υποδηλώνει πάντα την προέλευση με $\vec{k} = 0$, όπου X είναι η πλησιέστερη γειτονικά κατεύθυνση, και M είναι η επόμενη πλησιέστερη γειτονικά κατεύθυνση (σχ. 7). Η ζώνη Brillouin είναι μια δισδιάστατη περιοχή κυματοφορέων, έτσι ώστε οι ζώνες $\omega_{n \rightarrow}$ να είναι στην πραγματικότητα

επιφάνειες, αλλά στην πράξη τα ακρότατα ζώνης σχεδόν πάντα εμφανίζονται κατά μήκος των ορίων της ζώνης (δηλαδή τις κατευθύνσεις υψηλής συμμετρίας). Έτσι, είναι σύνηθες να σχεδιάζονται οι ζώνες μόνο κατά μήκος των ορίων ζωνών, προκειμένου να προσδιοριστεί το χάσμα ζωνών, όπως γίνεται στο σχ. 8.

Στην πραγματικότητα, το πλέγμα οπών μπορεί να εμφανίσει όχι μόνο ένα κενό TE, αλλά ένα πλήρες χάσμα φωτονικών ζωνών (και για τις δύο πολώσεις) αν οι οπές είναι αρκετά μεγάλες (σχεδόν αγγίζονται). Στην περίπτωση αυτή, οι λεπτές φλέβες μεταξύ των πλησιέστερων γειτονικών οπών επάγουν ένα κενό TE, ενώ τα διάκενα μεταξύ τριάδων οπών σχηματίζουν "ραβδοειδείς" περιοχές που υποστηρίζουν ένα διάκενο TM που επικαλύπτει τη θέση TE. [24]



Σχήμα 7: Τα διαγράμματα ζώνης και οι φωτονικές ζώνες χασμάτων για τα εξαγωνικά πλέγματα υψηλών διηλεκτρικών ράβδων έχουν $\epsilon = 12$, και $r = 0.2a$ στον αέρα (επάνω) και οπές αέρα με $r = 0.3a$ σε διηλεκτρικά (κάτω), όπου a είναι το κέντρο της περιοδικότητας. Οι συχνότητες σχεδιάστηκαν γύρω από το όριο της ζώνης Brillouin (σκιασμένο τρίγωνο, αριστερά κέντρο), με τις συμπαγείς και τις διακεκομμένες γραμμές να δηλώνουν την πόλωση του TE και του TM αντιστοίχα (ηλεκτρικό πεδίο παράλληλο και αντιστοίχα κάθετο προς το επίπεδο της περιοδικότητας). Οι ράβδοι και οι οπές έχουν ένα διάκενο στις ζώνες TM και TE αντιστοίχα. [25]



Σχήμα 8: Προβάλλεται διάγραμμα ζώνης για μια πλάκα πεπερασμένου πάχους ($0.5a$) από οπές αέρα στο διηλεκτρικό, με την ζώνη Brillouin κάτω αριστερά (διατομή όπως στο σχήμα 9 κάτω.). Η λευκή περιοχή είναι ο κώνος φωτός: η προβολή όλων των καταστάσεων που μπορεί να εκπέμψει στην ατμόσφαιρα. Οι συνεχείς και οι διακεκομμένες γραμμές δηλώνουν καθοδηγούμενους τρόπους (περιορίζονται στην πλάκα), που είναι απαραίτητοι ή περιττοί σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο κάτοπτρο της πλάκας, του οποίου η πόλωση μοιάζει με το TE και το TM, αντίστοιχα. Υπάρχει μία "ζώνη διάκενου" (περιοχή χωρίς καθοδηγούμενα μέσα) στο παρόμοιο TE καθοδηγούμενων μέσων μόνο. [26]

5. ΠΛΑΚΕΣ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν δισδιάστατα φαινόμενα φωτονικών κρυστάλλων σε τρεις διαστάσεις, η πιο απλή σχεδίαση είναι να κατασκευάσετε απλώς ένας δισδιάστατος περιοδικός κρύσταλλος με ένα πεπερασμένο ύψος: μια πλάκα φωτονικών κρυστάλλων, όπως απεικονίζεται στο σχ. 8. Μια τέτοια δομή μπορεί να περιορίσει το φως κάθετα στο εσωτερικό της πλάκας μέσω του δείκτη καθοδήγησης, μια γενίκευση της ολικής εσωτερικής ανάκλασης - ο μηχανισμός αυτός είναι η πηγή πολλών νέων εναλλαγών και συμπεριφορών των συστημάτων πλάκας σε σύγκριση με τα δισδιάστατα αντίστοιχά τους.

Το κλειδί είναι το γεγονός ότι η δισδιάστατη περιοδικότητα συνεπάγεται ότι το δισδιάστατο Bloch διάνυσμα κύματος \vec{k}_{\parallel} είναι μια συντηρούμενη ποσότητα, έτσι ώστε η προβαλλόμενη δομή ζώνης όλων των καταστάσεων στον κύριο όγκο του υποστρώματος και του υπερστρώματος έναντι της συνιστώσας του πεδίου του κυματικού διανύσμά τους, να δημιουργεί ένα χάρτη από όπου φαίνεται σε ποιες καταστάσεις μπορεί να γίνει εκπομπή κατακόρυφα. Εάν η πλάκα αιωρείται στον αέρα, για παράδειγμα, τότε οι συναρτήσεις του όγκου αέρα είναι $\omega = c \sqrt{|\vec{k}_{\parallel}|^2 + k_{\perp}^2}$, οι οποίες παρίστανται γραφικώς έναντι των μορφών \vec{k}_{\parallel} του συνεχούς φωτεινού κώνου όταν

$\omega \geq c|\vec{k}_{\parallel}|$, όπως δείχνεται ως σκιασμένη περιοχή στο σχ. 8. Επειδή η πλάκα έχει υψηλότερο ϵ (12) από τον αέρα (1), μπορεί να τραβήξει προς τα κάτω διακριτές καθοδηγούμενες ζώνες από αυτό το συνεχές. Αυτές οι ζώνες, βρίσκονται κάτω από τον κώνο φωτός, δεν μπορούν να ζευγαρωθούν με καμία κάθετη ακτινοβολούσα λειτουργία από το νόμο διατήρησης και έτσι περιορίζονται στην πλάκα (εκθετικά φθίνοντας μακριά από αυτό). Εάν το οριζόντιο μεσαίο επίπεδο της πλάκας είναι ένα κατοπτρικής συμμετρίας επίπεδο, τότε ακριβώς όπως υπήρχαν TM και TE καταστάσεις σε 2D, εδώ υπάρχουν δύο κατηγορίες λειτουργιών: ομαλές (παρόμοιες των TE) και ανώμαλες (παρόμοιες των TM) τρόποι μετακίνησης κάτω από αντανάκλασεις μέσα από το κατοπτρικό επίπεδο (που είναι καθαρά TE / TM, στο ίδιο το επίπεδο κάτοπτρο). Επειδή η πλάκα εδώ βασίζεται στην 2D κρυσταλλική οπή, η οποία είχε ένα χάσμα TE, εδώ υπάρχει ένα 26% «ζώνης διακένου» των άρτιων λειτουργιών: ένα φάσμα συχνοτήτων στο οποίο δεν υπάρχουν καθοδηγούμενες λειτουργίες. Αυτό δεν είναι μια πλήρης ζώνη φωτονικού χάσματος, όχι μόνο λόγω των μονών λειτουργιών, αλλά και επειδή υπάρχουν ακτινοβόλες (κώνος φωτός) λειτουργίες σε κάθε ω . Οι παρουσίες αυτών των ακτινοβόλων λειτουργιών σημαίνουν ότι αν η μεταφραστική συμμετρία είναι εντελώς κατεστραμμένη, με μια κάμψη του κυματοδηγού ή μία συντονισμένη κοιλότητα, τότε οι κάθετες απώλειες ακτινοβολίας είναι αναπόφευκτες· ωστόσο, υπάρχουν διάφορες στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση των απωλειών σε ανεκτά επίπεδα. Από την άλλη πλευρά, αν μία μόνο κατεύθυνση της μεταφραστικής συμμετρίας έχει καταστραφεί, όπως σε ένα γραμμικό ελάττωμα του κυματοδηγού, ιδανικά χωρίς απώλειες μπορεί να διατηρηθεί η καθοδήγηση.

Οι φωτονικές κρυσταλλικές πλάκες έχουν δύο νέες κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την ύπαρξη ενός διακένου. Κατ' αρχάς, θα

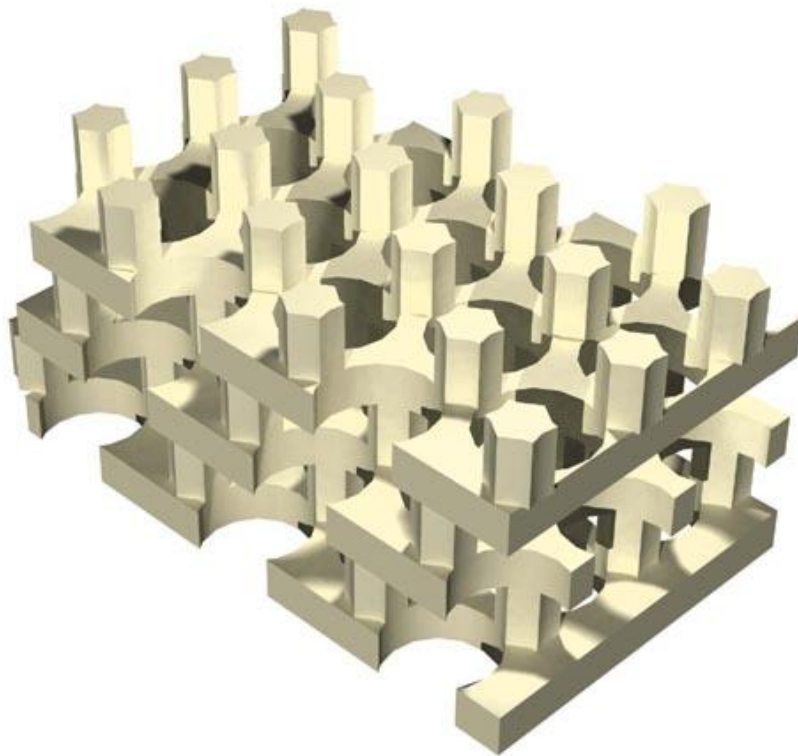
πρέπει να έχει τη συμμετρία κατόπτρου, έτσι ώστε τα κενά στις μονές και τις ζυγές καταστάσεις να μπορούν να θεωρηθούν ξεχωριστά - τέτοια κατοπτρική συμμετρία διακόπτεται από την παρουσία ενός ασύμμετρου υποστρώματος, αλλά στην πράξη το σπάσιμο της συμμετρίας μπορεί να είναι ασθενές, αν η αντίθεση του δείκτη είναι επαρκώς υψηλή (έτσι ώστε διαφορετικές καταστάσεις να περιορίζονται έντονα στην πλάκα). Δεύτερον, το ύψος της πλάκας δεν πρέπει να είναι πάρα πολύ μικρό (διαφορετικά οι διαφορετικές καταστάσεις θα περιορίζονται αδύναμα) ή πολύ μεγάλο (διαφορετικά οι υψηλότερης τάξης καταστάσεις θα καλύψουν το κενό)· το βέλτιστο ύψος είναι περίπου το μισό του μήκους κύματος (σε σχέση με ένα μέσου όρου δείκτη που εξαρτάται από την πόλωση). Στο σχ. 8, χρησιμοποιείται το ύψος $0,5\alpha$, το οποίο είναι κοντά στο βέλτιστο (με οπές ακτίνας 0.3α και $\epsilon = 12$, όπως στην προηγούμενη παράγραφο). [27]

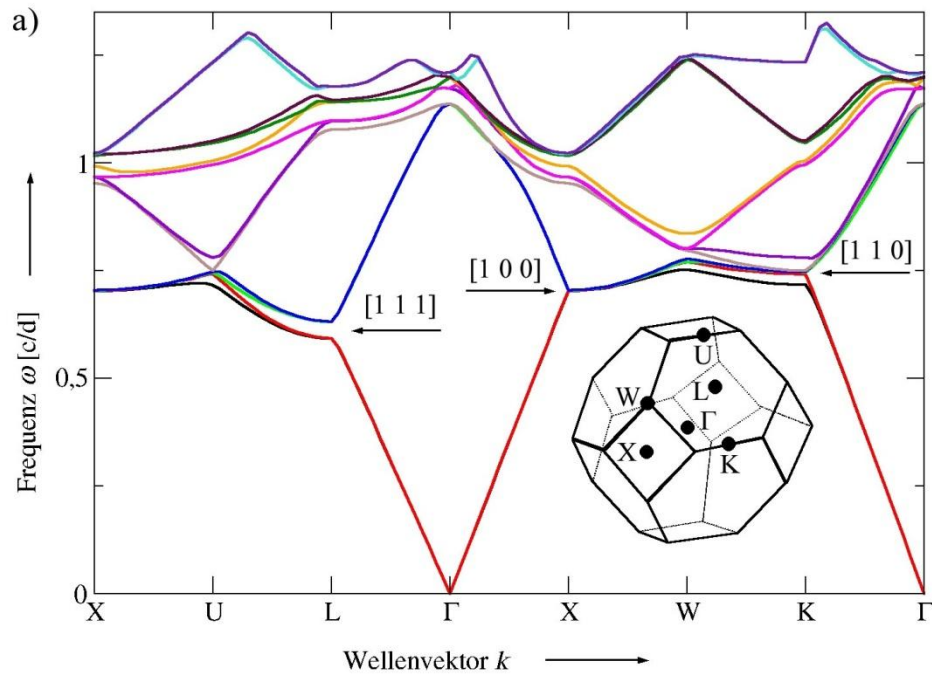
6. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΦΩΤΟΝΙΚΟΙ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ

Οι πλάκες φωτονικών κρυστάλλων είναι ένας τρόπος υλοποίησης των επιδράσεων 2D φωτονικών κρυστάλλων σε τρεις διαστάσεις: ένα παράδειγμα ενός άλλου τρόπου, είναι η αύξηση των απωλειών που επιβάλλονται από τον κώνο φωτός, και απεικονίζεται στο σχ. 9. Αυτός είναι ένα 3D περιοδικός κρύσταλλος, που σχηματίζεται από μια εναλλασσόμενη ακολουθία οπής πλάκας - ράβδου πλάκας σε μια ABC-ABC στοίβαξη των διπλοστοιβάδων - ισοδύναμα, είναι ένα fcc πλέγμα των κυλίνδρων από αέρα στο διηλεκτρικό, στοιβαγμένο και προσανατολισμένο σε κατεύθυνση 111, όπου κάθε επικαλυπτόμενη στρώση κυλίνδρων σχηματίζει μια διπλοστοιβάδα ράβδου - οπής ταυτόχρονα. Το κάθε διάγραμμα ζώνης παρουσιάζεται στο σχ. 9 κατά μήκος των ορίων της αμείωτης ζώνης Brillouin του (από κατατετμημένο οκτάεδρο, ένθετο), και αυτή η δομή έχει ένα +21% πλήρες διάκενο ($\Delta\omega$ ως κλάσμα της συχνότητας του μέσου διακένου) για $\epsilon = 12 / 1$, που απαγορεύει τη διάδοση του φωτός για όλους τους κυματοφορείς (κατευθύνσεις) και όλες τις πολώσεις. Αυτός ο κρύσταλλος όχι μόνο μπορεί να περιορίζει το φως τέλεια σε 3D, αλλά επειδή τα στρώματα του μοιάζουν με 2D κρυστάλλους ράβδου - οπής, αποδεικνύεται ότι οι περιορισμένες λειτουργίες δημιουργούνται από ελαττώματα σε αυτά τα στρώματα που μοιάζουν πολύ με το TM / TE των μελών που έχει δημιουργηθεί από τις αντίστοιχες βλάβες σε δύο διαστάσεις. Ως εκ τούτου, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει αυτόν τον κρύσταλλο για να μεταφέρει άμεσα σχέδια από δύο σε τρεις διαστάσεις διατηρώντας κατευθυντικό περιορισμό. Κάθε κατασκευή, φυσικά, είναι περισσότερο πολύπλοκη από εκείνη των φωτονικών κρυσταλλικών πλακών (με ένα ελάχιστο ϵ αντίθεσης 4/1), αλλά αυτό και άλλες 3D φωτονικές κρυσταλλικές δομές έχουν κατασκευαστεί, ακόμη και σε μικρού (υπέρυθρο) μήκους κλίμακες, όπως περιγράφονται παρακάτω.

Υπάρχουν τρεις γενικές διηλεκτρικές τοπολογίες που έχουν εντοπιστεί να υποστηρίζουν πλήρως τα 3D κενά: άτομα σε διατάξεις τύπου διαμαντιού υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς που περιβάλλονται από χαμηλό διηλεκτρικό, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε +20% κενά ανάμεσα στη 2^η και 3^η ζώνη για $\epsilon = 12/1$ (Si: αέρας) αντίθεσης· πλέγματα fcc "σχήματος αντίστροφου οπάλιου" σχεδόν εφραπτόμενων χαμηλών διηλεκτρικών σφαιρών που περιβάλλονται από υψηλό διηλεκτρικό, δίνοντας κενά γύρω στο 10% μεταξύ της 9^{ης} και της 10^{ης} ζώνης για $\epsilon = 12/1$ και κυβικά πλέγματα "σχήματος σκαλωσιάς" των ράβδων κατά μήκος των άκρων του κύβου, δίνοντας ~ 7% κενά ανάμεσα στη 2^η και 3^η ζώνη για $\epsilon = 12/1$. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι δύο πρώτες τοπολογίες αντιστοιχούν στα fcc πλέγματα, τα οποία έχουν τις περισσότερες σχεδόν σφαιρικές ζώνες Brillouin, σύμφωνα με τους βασικούς κανόνες που δόθηκαν παραπάνω. Πολλές παραλλαγές αυτών των τοπολογιών συνεχίζουν να προτείνονται, για παράδειγμα, η δομή του σχ. 9 είναι όπως του διαμαντιού ή του γραφίτη, κυρίως σε συνδυασμό με διαφορετικές στρατηγικές κατασκευής, από τις οποίες θα αναφέρουμε τρεις επιτυχείς προσεγγίσεις. Πρώτον, η κατασκευή στοιβάδα με στιβάδα, κατά την οποία οι επιμέρους κρυσταλλικές στιβάδες (συνήθως σταθερής διατομής) εναποτίθενται μία προς μία και χαράσσονται με ένα 2D σχέδιο μέσω πρότυπων λιθογραφικών μεθόδων (δίνοντας επαρκή έλεγχο της τοποθέτησης των ελαττωμάτων, κλπ) το σχ. 9 μπορεί να κατασκευασθεί με αυτόν τον τρόπο (καθώς και άλλες δομές τύπου

διαμαντιού με μεγάλα κενά). Δεύτερον, η κολλοειδής αυτο-συναρμολόγηση, στην οποία μικρές διηλεκτρικές σφαίρες σε ένα ρευστό οργανώνονται οι ίδιες αυτόματα σε (fcc) κρυστάλλους με κοντινή διάταξη με δυνάμεις επιφανείας. Αυτοί οι κρύσταλλοι μπορούν να επαναπληρούνται με ένα υλικό υψηλού δείκτη, εκ των οποίων οι αρχικές σφαίρες διαλύονται με σκοπό τον σχηματισμό ενός κρυστάλλου σχήματος αντιστρόφου οπάλιου με ένα πλήρες κενό. Τρίτον, ολογραφική λιθογραφία, όπου μπορεί να σχηματίζεται μια ποικιλία 3D κρυστάλλων από ένα σχέδιο παρεμβολής τεσσάρων ακτίνων laser για να σκληρύνει μια φωτοευαίσθητη ρητίνη (οι κρύσταλλοι στη συνέχεια επαναπληρούνται και διαλύονται, όπως με τα κολλοειδή, για να πετύχουμε τον απαιτούμενο δείκτη αντίθεσης). Η δεύτερη και τρίτη είναι τεχνικές αξιοσημείωτες για την ικανότητά τους να κατασκευάσουν μεγάλης κλίμακας 3D κρυστάλλους (χιλιάδων περιόδων) σε σύντομο χρονικό διάστημα. [28]





Σχήμα 9: Το διάγραμμα ζώνης (κάτω) για 3d περιοδικό φωτονιακό κρύσταλλο (επάνω) αποτελείται από μια εναλλασσόμενη στοιβάδα ράβδου και οπής 2d περιοδικών πλακών (παρόμοια με το σχήμα 7), με τις γωνίες της αμείωτης ζώνης Brillouin να επισημαίνονται στο ένθετο. Η δομή αυτή παρουσιάζει μια 21% κατευθυντική ζώνη χάσματος. [29]

7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

7.1 ΕΥΦΥΗ ΑΥΤΟΦΩΤΙΖΟΜΕΝΑ ΕΝΔΥΜΑΤΑ

Είναι βέβαιο ότι η επιστημονική κοινότητα ενδιαφέρεται να βοηθήσει τη βιομηχανική παραγωγή πραγματικά ευφυών υφασμάτων και ενδυμάτων που θα έχουν την ελάχιστη ανάγκη της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα ρούχα που αλλάζουν χρώμα ανάλογα με τις επιλογές και τις ανάγκες του χρήστη μπορούν να παραχθούν από νέες ίνες που κατασκευάζονται συνδυάζοντας εξαιρετικά λεπτά στρώματα ενός πλαστικού και ενός υαλώδους υλικού και διαχειρίζονται το ορατό τμήμα του φάσματος με μεγάλη ακρίβεια. Όσον αφορά το θεωρητικό μέρος, έχει καλυφθεί ως ένα βαθμό και συνεχίζεται η έρευνα πάνω σ' αυτό, ταυτόχρονα όμως γίνονται προσπάθειες από επιστημονικές ομάδες ώστε να «περάσει» η τεχνολογία αυτή και στον καταναλωτή.

Στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης, στο τμήμα Τεχνολογίας Υλικών (MIT) ο καθηγητής Yoel Fink και οι συνεργάτες του αναπτύσσουν δισδιάστατες κρυσταλλικές ίνες υπό την ονομασία ίνες καθρεπτών.

Έχουν προχωρήσει στην καινοτόμο διαδικασία παραγωγής της ίνας αυτής που σε λίγα χρόνια θα είναι έτοιμη. Οι δισδιάστατες κρυσταλλικές φωτονικές ίνες αποτελούνται από εναλλασσόμενα στρώματα υλικών με ιδιαίτερα αντιπαραβαλλόμενους δείκτες διάθλασης.

Ο Αμερικάνικος Στρατός προγραμματίζει να υφάνει το νέο νήμα του Fink σε στολές για να κάνει ένα οπτικό κώδικα φραγμών, με βάση τη θεωρία των φωτονιακών κρυστάλλων, που θα βοηθήσει τους στρατιώτες να διακρίνουν τον εχθρό από τον φίλο, κατά τη διάρκεια της νύχτας, την ύπαρξη καπνού κατά τη μάχη ή την πυρκαγιά.

Το εμπορικό ενδιαφέρον εστιάζεται και στα ενδύματα μόδας που αποτελούν ευρύ καταναλωτικό αγαθό. Ένα γκριζο ή μπλε σκούρο ένδυμα που χρησιμοποιείται κατά την καθημερινή εργασία μπορεί να «αλλάξει» σε πορφυρό, φούξια κ.α. για την βραδινή έξοδο.

Για να εφαρμόσει την επιλογή του ο χρήστης, το ένδυμα είναι εφοδιασμένο με ένα ελαφρύ πακέτο μπαταριών που λειτουργούν με σκοπό την πρόκληση μιας μικρής κλίμακας ηλεκτρικής διέγερσης, η οποία θα λειτουργήσει με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της ανύψωσης της κεραίας του ραδιοφώνου για την επιλογή συχνότητας.

Αυτή η μικρή ηλεκτρική μετατροπή αλλάζει το πάχος του στρώματος των υλικών στο οποίο προσπίπτει το κύμα του φωτός, και έτσι χρωματίζονται τα εξαρτήματα ένδυσης.

Η τεχνολογία αυτή έχει εκτιμηθεί σε μεγάλο βαθμό από το Parsons School of Design της Νέας Υόρκης όπου οι καθηγητές και οι φοιτητές πιστεύουν ότι μπορεί να αντικατασταθεί ο χρωματισμός παραλλαγής των στρατιωτικών ενδυμάτων πάνω στο χακί μονόχρωμο ύφασμα, τα τυποποιημένα σχέδια πάνω σε υφάσματα επιπλώσεων καθώς και στα ενδύματα υψηλού επιπέδου ραπτικής.

Ο M. Gunph πιστεύει ότι η έξυπνη ιδέα του Fink θα μπει γρήγορα στη βιομηχανία της μόδας και θα αρχίσει από τα πιο μικρά εξαρτήματα όπως καπέλα, τσάντες, μαντίλια.

Ο Fink έχει εξασφαλίσει το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και έχει ονομάσει την ίνα Omni Guide. Συνεργάζεται με το Cambridge για να αναπτύξει αυτή την ίνα που έχει άπειρες δυνατότητες με προοπτική να βγει στο εμπόριο. Το όραμα που είχε ο Gunn πίστευε ότι θα αναπτυσσόταν μέχρι το 2010 για το εμπόριο. [30]

7.2 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ, ΜΕ ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΑ ΧΑΜΗΛΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΚΑΙ ΥΨΗΛΟ ΡΥΘΜΟ ΡΟΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΝ ΦΩΤΟΝΙΚΟ ΧΑΣΜΑ ΖΩΝΩΝ

Οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται για μεγάλης απόστασης επικοινωνία και υψηλό ρυθμό δεδομένων επικοινωνίας και παρουσιάζουν φωτονικό χάσμα ζωνών είναι μεγάλου επιστημονικού ενδιαφέροντος. Όπως προαναφέρθηκε η ανακάλυψη του κριτηρίου της κατευθυντικής ανάκλασης έχει προσφέρει νέες δυνατότητες στον εντοπισμό και την καθοδήγηση του φωτός. Ειδικότερα έχει παρουσιαστεί μια καινοτομία όπου όλες οι διηλεκτρικές κοίλες ίνες έχουν σχεδιαστεί ώστε να καθοδηγούν το φως στον αέρα. Πρόσφατη θεωρητική ανάλυση έχει προβλέψει εξαιρετικά χαμηλά χαρακτηριστικά απώλειας διάδοσης για αυτή την ίνα. Ο στόχος είναι να επεκταθεί η θεωρητική κατανόηση του συστήματος και να βρεθούν οι «σχέσεις» μεταξύ της φυσικής κατασκευής και των ηλεκτρομαγνητικών δομών που υποστηρίζονται από αυτή. Να προσδιοριστούν και να συντεθούν γυαλιά τα οποία έχουν αισθητά διαφορετικούς δείκτες διάθλασης αλλά και παρόμοιες θερμο-μηχανικές ιδιότητες που μπορεί να είναι θερμικά συνεπεξεργάσιμες. Η υλοποίηση του προγράμματος που κάνει χρήση της τελευταίας λέξης της τεχνολογίας και του σχεδιασμού ινών είναι η κορυφή της εξέλιξης και πρόσφατα κατασκευάστηκε στο MIT. Οι ίνες σχεδιάστηκαν ώστε να επιτρέπουν την λειτουργία ενός συστήματος επικοινωνίας μακράς απόστασης με υψηλή ροή δεδομένων. [31]

7.3 ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΝΗΜΑΤΟΣ

Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα είναι κομμάτι μια ολοκληρωμένη προσπάθειας που ως στόχο έχει την ανάπτυξη νέων οπτικών ινών και συσκευών βασισμένων στους κατευθυντικούς ανακλαστήρες.

Εδώ μελετάται η επίδραση των περιοδικών διακυμάνσεων του δείκτη διάθλασης κατά μήκος του άξονα ανάπτυξης της ίνας επί της δομής και της λειτουργίας. Προβλέπεται ότι οι μεγάλες αξονικές διαμορφώσεις θα έχουν ως αποτέλεσμα το σημαντικό άνοιγμα φωτονιακών κενών χάσματος προς την κατεύθυνση της διάδοσης, οι οποίες θα επιτρέψουν με τη σειρά τους, τον έλεγχο του εκπεμπόμενου φωτός. Η εισαγωγή ατελειών στην κατά τα άλλα τέλεια αξονική διαφοροποίηση θα αποτελέσει τη βάση για την κατασκευή οπτικών κοιλοτήτων στην ίνα. Αναμένονται εφαρμογές σε συσκευές παθητικής διάταξης, όπως τα φίλτρα DWDM καθώς και σε συσκευές ενεργητικής διάταξης, όπως υψηλής ταχύτητας καθολικής οπτικής μεταγωγής και αναδιαμορφωτές σήματος.

Η ικανότητα να κατασκευασθούν οπτικά ενεργές συσκευές σε ένα ύφασμα έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως τη μείωση των απωλειών σύζευξης

με γραμμή μεταφοράς η οποία δεν αποτελεί το μοναδικό πλεονέκτημα. Μπορεί επίσης να ανοίξει νέες ευκαιρίες για την αποτελεσματική κατασκευή των οπτικών ινών που βασίζονται σε τεχνικές σχεδιασμού νημάτων. [33]

7.4 ΑΥΤΟΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΟΥΜΕΝΑ ΚΑΤΑ ΣΥΣΤΑΔΕΣ ΣΥΜΠΟΛΥΜΕΡΗ ΩΣ ΥΛΙΚΑ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΧΑΣΜΑΤΩΝ ΖΩΝΩΝ

Έχει διαμορφωθεί ένα εννοιολογικό πλαίσιο για τη δημιουργία φωτονικών κρυστάλλων από αυτοσυγκροτούμενα «block συμπολυμερών». Προκειμένου να σχηματίσουν χρήσιμα χάσματα ζωνών στο ορατό σύστημα, περιοδικές διηλεκτρικές δομές κατασκευασμένες από τυπικά «block συμπολυμερών» πρέπει να τροποποιηθούν για να ληφθούν κατάλληλες χαρακτηριστικές αποστάσεις και διηλεκτρικές σταθερές. Επιπλέον, η απόκλιση στην απορρόφηση και την πυκνότητα πρέπει να ελέγχονται. Αυτό δίνει την ευκαιρία να αξιοποιηθεί η μεγάλη δομική «γκάμα», η ευελιξία και η εγγενής δυνατότητα συντονισμού που προσφέρουν αυτά τα αυτοσυναρμολογούμενα συστήματα κατα συστάδων συμπολυμερών.

Οι στόχοι του προγράμματος αυτού θα είναι η ανιονική μοριακή σύνθεση κατα συστάδων συμπολυμερών υψηλού μοριακού βάρους, για τη διερεύνηση μεθόδων για την αύξηση της διηλεκτρικής αντίθεσης σε αυτά τα συστήματα με την ενσωμάτωση κρυστάλλων - ημιαγωγών νανομετρικού μεγέθους. Θα μελετηθεί επίσης η δυνατότητα χρησιμοποίησης κατα συστάδων συμπολυμερών ως ένα υλικό πυρήνα σε οπτικές ίνες. [34]

7.5 ΒΙΟΣΥΜΒΑΤΟΙ ΦΩΤΟΝΙΚΟΙ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ

Ο στόχος αυτού του προγράμματος είναι η ανάπτυξη μεθόδων για τη δημιουργία φωτονικών κρυστάλλων κατασκευασμένων από βιοσυμβατά υλικά. [35]

8. ΕΡΕΥΝΕΣ ΣΕ ΕΞΕΛΙΞΗ

Υπάρχουν πολλά προγράμματα σε εξέλιξη που ασχολούνται με τη σχεδίαση και κατασκευή διηλεκτρικών κοίλων ινών που χρησιμοποιούνται στην ανάκλαση προς όλες τις κατευθύνσεις και καθοδηγούν το φως. Με βάση τα θεωρητικά πρότυπα οι ίνες αυτές παρουσιάζουν χαρακτηριστικά χαμηλές απώλειες κατά την διάδοση. Ένα τέτοιο πρόγραμμα εκπονείται στο MIT (DARPA/ARO/MRSEC/NSF).

Στόχος είναι να επεκτείνει την θεωρητική κατανόηση του συστήματος, και τις σχέσεις μεταξύ φυσικής δομής και ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων, που υποστηρίζονται από αυτή. Άλλος στόχος του ίδιου προγράμματος είναι να συνδυάσει και να αναμείξει τα υαλώδη υλικά που θα έχουν ανόμοιους δείκτες διάθλασης αλλά παρόμοιες θερμομηχανικές ιδιότητες, ώστε να επιτρέπεται να υποβληθούν σε θερμική κατεργασία μαζί. Αυτό το πρόγραμμα θα αναπτυχθεί για να ενισχύσει την ίνα που έχει κατασκευαστεί στο MIT (Omni guide).

Άλλο ερευνητικό πρόγραμμα μελετά τη χρησιμοποίηση των νέων ινών ως κατευθυντήριους ανακλαστήρες (αισθητήρες-ενεργοποιητές). Με την κατάλληλη σχεδίαση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενίσχυση των επικοινωνιών μεγάλης απόστασης χωρίς απώλειες ενέργειας.

Στο πρόγραμμα γίνεται μελέτη της επίδρασης των περιοδικών διαμορφώσεων των δεικτών διάθλασης στη δομή, κατά μήκος του άξονα ανάπτυξης της ίνας. Η διαμόρφωση της ίνας σε μια μόνο διάσταση (1D – μήκος) θα επιτρέψει τον έλεγχο των ιδιοτήτων του διαβιβασθέντος φωτός. Η παρεμβολή των ατελειών δομής (αστοχία δομής) στην κατά τα άλλα τέλεια αξονική διαμόρφωση αποτελεί πεδίο της επιστημονικής έρευνας.

Θα μετρηθούν θεωρητικά και πειραματικά οι παράμετροι που διαμορφώνονται από τις ατέλειες της δομής και της μορφολογίας της ίνας. Θα γίνει εφαρμογή σε πειραματικές συσκευές όπως τα φίλτρα DWDM και σε ενεργούς επαναδιαμορφωτές ταχύτητας μετατροπής σημάτων. Η περίπτωση κατασκευής μιας οπτικής ίνας που να συγκεντρώνει πολλές δράσεις εξασφαλίζει μείωση απωλειών σύζευξης στην γραμμή μετάδοσης.

Ένα άλλο πρόγραμμα έχει ως στόχο την σύνθεση ανιοντικών συμπολυμερών υψηλού μοριακού βάρους για να ερευνηθούν οι μέθοδοι που θα αυξήσουν τη διηλεκτρική αντίθεση σε αυτά τα συστήματα, με την ενσωμάτωση κρυστάλλων ημιαγωγών νανομετρικού μεγέθους. Για να υλοποιηθούν οι στόχοι αυτού του προγράμματος πρέπει να διαμορφωθούν τα χρήσιμα χάσματα ζωνών στο ορατό φάσμα, να τροποποιηθούν σε περιοδικές δομές των συμπολυμερών για να λάβουν κατάλληλες χαρακτηριστικές αποστάσεις ελέγχοντας συγχρόνως τις συγκεντρώσεις της ατέλειας. Θα μελετηθεί επιπλέον και η δυνατότητα χρήσης των συμπολυμερών φράγματος ως υλικού των πυρήνων των οπτικών ινών (NSF).

Τέλος ένα ακόμη διαφορετικό πρόγραμμα έχει ως στόχο την ανάπτυξη μεθόδου για τη δημιουργία φωτονικών κρυστάλλων από συμβιωτικά υλικά. Οι πιθανές εφαρμογές περιλαμβάνουν τον ακίνδυνο χρωματισμό τροφίμων, την παρακολούθηση της απορρόφησης των φαρμάκων και άλλα. [36]

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑ

Η ευφυής διαχείριση του φωτός αποτελεί κοινή προσπάθεια της επιστημονικής κοινότητας που προσπαθεί να μετατρέψει τα έξυπνα υλικά για ενδύματα και κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα διαφόρων χρήσεων σε εύχρηστα και ικανά να δεχθούν την καθημερινή καταπόνηση της καθαριότητας και να δοκιμαστεί σε αυτή η αντοχή τους.

Γίνεται προσπάθεια αντικατάστασης της διαχείρισης του φωτός από ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά μέσα όπως μπαταρίες, μεταλλικά στοιχεία και στοιχεία καλωδίωσης, όπως μεταλλικές ίνες και κουμπιά που συνδέουν το όλο σύστημα. Τα παραπάνω πρέπει να αφαιρούνται για να πλυθεί το ένδυμα, αποτελούν εμπόδιο στην καθημερινή φροντίδα του ενδύματος (πλύσιμο – στέγνωμα) ώστε να διατηρεί τις ιδιότητές του για υγιεινή και ασφαλή χρήση.

Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστεί η εφαρμογή της τεχνολογίας των φωτονικών κρυστάλλων σε ενδύσιμα προϊόντα τα οποία δεν απευθύνονται μόνο σε ενδύματα μόδας και αλλάζουν χρώμα ανάλογα με τη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, αλλά και σε στρατιωτικά ενδύματα, ενδύματα που χρησιμοποιούνται από ειδικές ομάδες χρηστών (ασθενείς) και επιτρέπουν σε αυτούς που τα φορούν να διαχειρίζονται τις χρωματικές αποχρώσεις ανάλογα με τις ανάγκες τους.

Έτσι για μια καταδρομική ομάδα μπορεί να μετατρέπεται η στολή από πράσινη σε ένα δασώδη τόπο σε καφέ σε ένα βραχώδη. Μπορεί επίσης ανάλογα με τη θέση ενός ασθενούς που δέχεται το φως της ημέρας εάν είναι όρθιος η ενδυμασία του να φαίνεται λευκή, ενώ αν βρεθεί σε οριζόντια θέση εξ' αιτίας του προβλήματός του να μετατραπεί σε κόκκινη ή πορτοκαλί, ενώ αν έχει πέσει σε πλάγια θέση να χρωματίζεται πράσινη.

Η θεωρία των φωτονικών κρυστάλλων αντιστοιχεί στις νεότερες προσπάθειες διαχείρισης του φωτός και βασίζεται στην επιλογή υλικών που παρουσιάζουν διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Οι δείκτες διάθλασης επιλέγονται έτσι ώστε να παρέχουν τη δυνατότητα να εμφανίζεται κάθε φορά ποιο μήκος κύματος ακτινοβολίας θα περάσει μέσα από το ένδυμα, πιο θα ανακλαστεί και ποιο δεν θα επιτρέπεται να περάσει (ενεργειακό χάσμα των υποστρωμάτων PBG).

Η επιλεγμένη παραλλαγή στο δείκτη διάθλασης μεταξύ των δικτυακών πλεγμάτων των υποστρωμάτων μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε υλικά με πολυεστερικές ίνες ή άλλες συνθετικές ίνες. Η κρυσταλλικότητα αυτών των συνθετικών ινών θα μπορεί να κατευθυνθεί με τρόπο με τον οποίο θα παρουσιάσουν επιλεγμένους εκ των προτέρων δείκτες διάθλασης έτσι ώστε κατά τη δημιουργία των υφασμάτων να έχουν τις ιδιότητες των φωτονικών κρυστάλλων (πλέγματος). Στη δημιουργία του κατάλληλου πλέγματος συμμετέχουν και οι οπές αέρα που στα υφάσματα έχουν περιοδική τοποθέτηση όπως φαίνεται από την εργασία δίνοντας τη δυνατότητα πολλών επιλογών.

Στην αρχή της εργασίας έγινε εισαγωγή στην θεωρία των φωτονικών κρυστάλλων βάση του αξιώματος του De Broglie που δέχτηκε ότι το φωτόνιο όπως και κάθε σωματίδιο έχει και κυματικές και σωματιδιακές ιδιότητες, και της θεωρίας των γωνιών του Bragg, δηλαδή γωνίες για τις οποίες οι ανακλώμενες ακτίνες που προέρχονται από συνεχόμενα επίπεδα διαφόρων κατά ακέραιο αριθμό μηκών κύματος. Από την επεξεργασία των εργασιών επίσης έγινε αντιληπτό ότι υπάρχει αναλογία στη δράση των ηλεκτρονίων σε

μέσα με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά και των φωτονίων σε μέσα με διαφορετικό και επιλεγμένο δείκτη διάθλασης. Οι μελέτες που έχουν εκπονηθεί και παρουσιάστηκαν στην εργασία ασχολούνται με την ανάλυση της θεωρίας των φωτονικών κρυστάλλων και στις 3 διαστάσεις 1D, 2D, και 3D άρα το ενδιαφέρον είναι η εμβάθυνση της θεωρίας αλλά και η γρήγορη εφαρμογή της από μεγάλα πανεπιστήμια (MIT).

Η δυνατότητα της τεχνολογίας της κατασκευής κοίλων κλωστοϋφαντουργικών ινών μπορεί να δώσει επιπλέον δυνατότητες ώστε συμπαγείς και κοίλες ίνες να δώσουν επιλεγμένες θέσεις φωτονικών κρυστάλλων και οπών αέρα. Άρα τα ευφυή υφάσματα που δρουν με βάση τη θεωρία των φωτονικών κρυστάλλων με ελάχιστα έως και καθόλου ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά στοιχεία είναι πεδίο έρευνας για το τμήμα κλωστοϋφαντουργίας σε συνεργασία με τα τμήματα φυσικής – χημείας και πολυμερών, κλωστικής, υφαντικής, και κατασκευής ετοίμου ενδύματος.

ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ

- *** DWDM: Με την τεχνολογία αυτή, πολλά μήκη κύματος συνδέονται (couple) στην ίδια οπτική ίνα, δίνοντας έτσι εύρος ζώνης ίσο με το άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης του κάθε μήκους κύματος. Η εκπομπή γίνεται από lasers και στη συνέχεια τα σήματα πολυπλέκονται πάνω σε μία μόνο οπτική ίνα. Μετά τη διέλευσή τους από την ίνα, τα σήματα πρέπει να διαχωριστούν και πάλι και το καθένα από αυτά να αντιστοιχιστεί σε ένα μόνο μήκος κύματος, Αυτό γίνεται με τη χρήση ρυθμιζόμενων οπτικών φίλτρων (tunable optical filters). Στην τεχνολογία DWDM τα μήκη κύματος που συνδυάζονται πάνω στην οπτική ίνα είναι πάνω από 40, ενώ μπορούν να φτάσουν τα 128. Το κάθε μήκος κύματος μπορεί να εκπέμψει δεδομένα σε ταχύτητα 2,5 Gbps. Προέρχεται από την βιβλιογραφία : Wavelength Division Multiplexing και Dense Wavelength Division Multiplexing (WDM και DWDM) <http://conta.uom.gr/conta/ekpaideysh/seminaria/thlematikes/Optical/wdm%20topologies.htm>
- *** PX, ή PC, ή PXs: οι ορισμοί αυτοί που συναντώνται μέσα στο κείμενο έχουν την έννοια του φωτονιακού κρυστάλλου.
- *** PBG: ο ορισμός αυτός που συναντάται στο κείμενο έχει την έννοια της ζώνης χάσματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1], [8] <http://www.jsps.go.jp/english/e-iafos/abstract/abst08.pdf> Photonic Crystals - An Introduction, Toshihiko Baba. Yokohama National University
- [2] Joannopoulos JD, Meade RD, and Winn JN (1995) Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton: Princeton University Press
- [3], [4], [5] Kenneth W. Ford (1974) «Κλασσική και Σύγχρονη Φυσική» Μετάφραση Γ. Θεοδώρου – Α. Θεοδώρου, Εκδόσεις Γ. Πνευματικού, Αθήνα 1980
- [6], [7] Igor A. Sukhoivanov, Igor V. Guryev, "Photonic Crystals"
- [9], [10], [12] <http://www.icmm.csic.es/cefe/pbqs.htm> (An introduction to photonic band gaps) (Fig 2)
- [11] <http://www.icmm.csic.es/cefe/pbqs.htm> (An introduction to photonic band gaps) (ερευνητές οι Οικονόμου και Σιγάλας)
- [13], [36] ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ Α.Δ. ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗ-ΕΦΕΝΤΑΚΗ : Σχεδίαση Και Παραγωγή Ευφυών Διαδραστικών Ενδυμάτων Ως Σύγχρονη Εξέλιξη Του Κλωστοϋφαντουργικού Εξειευτισμού
- [14] <http://ab-initio.mit.edu/photons/tutorial/photonic-intro.pdf> Introduction to Photonic Crystals: Bloch's Theorem, Band Diagrams, and Gaps (But No Defects), Steven G. Johnson and J. D. Joannopoulos, MIT, 3rd February 2003. (ερευνητές οι Yablonovitch και John)
- [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [27], [28] <http://ab-initio.mit.edu/photons/tutorial/photonic-intro.pdf> Introduction to Photonic Crystals: Bloch's Theorem, Band Diagrams, and Gaps (But No Defects), Steven G. Johnson and J. D. Joannopoulos, MIT, 3rd February 2003
- [25], [26], [29] (Google Pictures : Photonic crystals)
https://www.google.gr/search?q=photonic+crystals&biw=1024&bih=653&source=lnms&tbn=isch&sa=X&sqi=2&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMlpqXL3ZaayAIVRXEUCh22Ewu0
- [30], [31], [33], [34], [35]
Science Central News: Clothes That Change Color 30/08/2006
Chair of Parsons School of Design Department
Ibanescu M., Johnson S., Skorobogatiy M., Weisberg O., Engeness T., Soljacic M., Jacobs S., Joannopoulos J.D., Fink Y., "The Electro-Magnetic Mode Structure in OmniGuide Fiber: Comparison to Modes in Metal Waveguides" (submitted).
Fink Y., Winn J.N., Fan S., Michel J., Chen C., Joannopoulos J.D., Thomas E.L., "A Dielectric Omnidirectional Reflector" Science 282, 1679-1682, (1998)