



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**π. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Βιομηχανικού Σχεδιασμού**  
**Εισ.Κατ.: Βιομηχανικού Σχεδιασμού Τ.Ε.**

Πτυχιακή Εργασία με τίτλο:

**“Οπτικές ίνες: Η νέα τεχνολογία μεταφοράς δεδομένων”**

Του: **Κρασιά Ευάγγελου**

Επιβλέπων Καθηγητής: Δινοπούλου Βάγια

Κοζάνη 2023



## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	5
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή .....	6
Κεφάλαιο 2 - Εφαρμογές και Τεχνολογία .....	8
2.1. Εφαρμογές.....	8
2.2. Τεχνολογία.....	9
2.2.1. Πομποί .....	9
2.2.2. Δέκτες .....	12
2.2.3. Ψηφιακή προπαραβολή (Digital predistortion) .....	12
2.2.4. Τύποι καλωδίων ινών.....	13
2.2.5. Ενίσχυση .....	16
2.2.6. Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος .....	17
2.3. Παράμετροι.....	18
2.3.1. Προϊόν εύρους ζώνης - απόσταση .....	18
2.3.2. Ταχύτητες εγγραφής .....	18
2.3.3. Standard ινών .....	18
2.3.4. Εξειδικευμένα καλώδια .....	20
2.3.5. Νέες τεχνικές .....	22
2.4. Διασπορά.....	23
2.5. Εξασθένηση .....	24
2.6. Παράθυρα μετάδοσης .....	24
2.7. Αναγέννηση .....	25
2.8. Last mile.....	26
2.9. Σύγκριση με ηλεκτρική μετάδοση .....	27
2.10. Κυβερνητικά πρότυπα.....	30

Κεφάλαιο 3 - Τάσεις υλικών και τεχνολογίας στις οπτικές ίνες.....	32
3.1. Τεχνολογίες προδιαμόρφωσης.....	32
3.1.1. Προετοιμασία προδιαμόρφωσης μέσω μεθόδων εναπόθεσης ατμών.	32
3.1.2. Η διαδικασία MCVD .....	33
3.1.3. Επικάλυψη διαλύματος για ενσωμάτωση σπάνιων γαιών και αλουμινίου	36
3.1.4. Επικάλυψη φάσης αερίου για ενσωμάτωση RE και αλουμινίου .....	38
3.1.5. Μέθοδοι πυροσυσσωμάτωσης σε σκόνη για την παρασκευή προδιαμορφωμένων υλικών οπτικών ινών.....	42
3.2. Προετοιμασία προδιαμόρφωσης με τεχνολογία χωνευτή τήξης .....	48
3.3. Τεχνολογίες κατασκευής και επίστρωσης ινών .....	52
3.3.1. Η διαδικασία σχεδίασης ινών .....	52
3.4. Επιστρώσεις οπτικών ινών.....	57
3.4.1. Μικρές δομές ινών που παρασκευάζονται με τεχνική stack and draw	63
3.4.2. Ίνες μη πυριτίου και υβριδικές με βάση γυαλιά τήξης και τεχνολογία ράβδου σε σωλήνα .....	69
Συμπεράσματα .....	772

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τις οπτικές ίνες ως μία νέα τεχνολογία μεταφοράς δεδομένων.

Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στις εφαρμογές και την τεχνολογία των οπτικών ινών. Πιο αναλυτικά, γίνεται αναφορά στους πομπούς και τους δέκτες, στην ψηφιακή προπαραβολή (digital predistortion), στους τύπους καλωδίων ινών και στην πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος. Έπειτα γίνεται αναφορά στις έννοιες της διασποράς, της εξασθένισης και της αναγέννησης του οπτικού σήματος καθώς και γίνεται αναφορά στην κάλυψη δικτύων οπτικής ίνας σε μεγάλες χώρες ανά τον κόσμο. Στη συνέχεια γίνεται η σύγκριση με τις εγκαταστάσεις χαλκού, γίνεται λόγος για τα κυβερνητικά πρότυπα που έχουν τεθεί για να είναι όλα τα εξαρτήματα των κατασκευαστών συμβατά με τα συστήματα οπτικών ινών.

Στην συνέχεια της εργασίας μελετώνται οι τάσεις υλικών και οι τεχνολογίες στις οπτικές ίνες. Το κεφάλαιο 3 πραγματεύεται στην διαδικασία παραγωγής και σχεδίασης των οπτικών ινών. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες προδιαμόρφωσης, στην προετοιμασία προδιαμόρφωσης με τεχνολογία χωνευτή τήξης, στην διαδικασία σχεδίασης των οπτικών ινών και στις επιστρώσεις αυτών.

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε μια επισκόπηση των τρεχουσών κατευθύνσεων της έρευνας που στοχεύουν στην παροχή μιας πιο εκτεταμένης γκάμας υλικών και συνδυασμών υλικών για χρήση σε καθοδηγούμενα οπτικά. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν διάφορες προσεγγίσεις στην προετοιμασία υλικών και προδιαμορφωμάτων, νέες μέθοδοι επικάλυψης φάσης αερίου, η έννοια των μικροδομημένων ινών, η διαδικασία σχεδίασης ινών και οι τρέχουσες εξελίξεις στις επικαλύψεις ινών.

## 1. Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Μια οπτική ίνα είναι μια εύκαμπτη, διαφανής ίνα κατασκευασμένη με σχεδίαση γυαλιού (σίλικα) ή πλαστικού σε διάμετρο ελαφρώς παχύτερη από εκείνη των ανθρώπινων μαλλιών. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται συχνότερα ως μέσο για τη μετάδοση φωτός μεταξύ των δύο άκρων της ίνας και για ευρεία χρήση σε επικοινωνίες οπτικών ινών, όπου επιτρέπουν τη μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερα εύρη ζώνης (ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων) από τα ηλεκτρικά καλώδια [1].

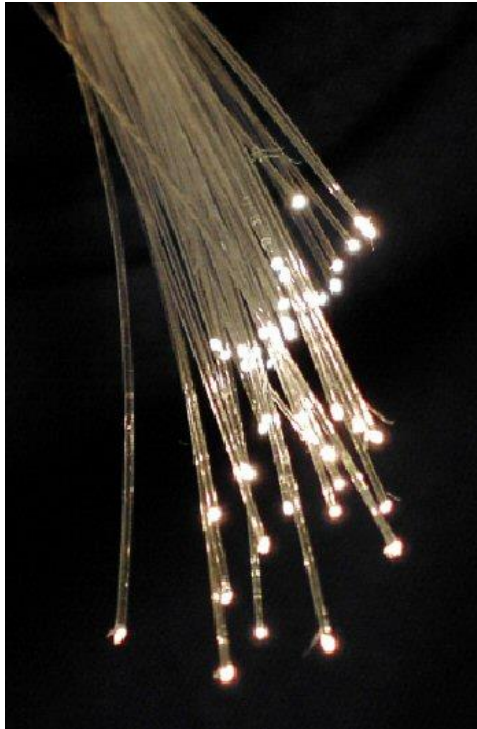
Οι ίνες χρησιμοποιούνται αντί για μεταλλικά καλώδια επειδή τα σήματα ταξιδεύουν μαζί τους με λιγότερη απώλεια. Επιπλέον, οι ίνες είναι ανθεκτικές στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ένα πρόβλημα από το οποίο υποφέρουν τα μεταλλικά σύρματα. Οι ίνες χρησιμοποιούνται επίσης για φωτισμό και απεικόνιση, και συχνά τυλίγονται σε δέσμες, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά φωτός σε ή από εικόνες από περιορισμένους χώρους, όπως στην περίπτωση ενός ινώδους πεδίου[2]. Οι ειδικά σχεδιασμένες ίνες χρησιμοποιούνται επίσης για μια ποικιλία άλλων εφαρμογών, μερικές από αυτές είναι αισθητήρες οπτικών ινών και λέιζερ ινών [3].

Οι οπτικές ίνες συνήθως περιλαμβάνουν έναν πυρήνα που περιβάλλεται από ένα διαφανές υλικό επένδυσης με χαμηλότερο δείκτη διάθλασης [4]. Το φως διατηρείται στον πυρήνα από το φαινόμενο της συνολικής εσωτερικής ανάκλασης που αναγκάζει την ίνα να δρα ως κυματοδηγός. Οι ίνες που υποστηρίζουν πολλές διαδρομές διάδοσης ή εγκάρσιες λειτουργίες ονομάζονται ίνες πολλαπλών τρόπων, ενώ εκείνες που υποστηρίζουν μία λειτουργία ονομάζονται ίνες μονής λειτουργίας (SMF) [5]. Οι ίνες πολλαπλών τρόπων έχουν γενικά ευρύτερη διάμετρο πυρήνα και χρησιμοποιούνται για συνδέσεις επικοινωνίας μικρών αποστάσεων και για εφαρμογές όπου πρέπει να μεταδίδεται υψηλή ισχύ [6] [7]. Οι ίνες μονής λειτουργίας χρησιμοποιούνται για τους περισσότερους συνδέσμους επικοινωνίας μήκους άνω των 1.000 μέτρων (3.300 πόδια) [8].

Η δυνατότητα σύνδεσης οπτικών ινών με χαμηλή απώλεια είναι σημαντική στην επικοινωνία οπτικών ινών. Αυτό είναι πιο περίπλοκο από τη σύνδεση ηλεκτρικού καλωδίου ή καλωδίου και περιλαμβάνει προσεκτική διάσπαση των ινών, ακριβή ευθυγράμμιση των πυρήνων ινών και τη σύζευξη αυτών των ευθυγραμμισμένων

πυρήνων [9]. Για εφαρμογές που απαιτούν μόνιμη σύνδεση, είναι συνηθισμένη μια σύνδεση σύντηξης. Σε αυτήν την τεχνική, ένα ηλεκτρικό τόξο χρησιμοποιείται για να λιώσει τα άκρα των ινών μαζί. Μια άλλη κοινή τεχνική είναι μια μηχανική σύνδεση, όπου τα άκρα των ινών συγκρατούνται σε επαφή με μηχανική δύναμη. Οι προσωρινές ή ημι-μόνιμες συνδέσεις γίνονται μέσω εξειδικευμένων συνδετήρων οπτικών ινών [10].

Ο τομέας της εφαρμοσμένης επιστήμης και της μηχανικής που ασχολείται με το σχεδιασμό και την εφαρμογή οπτικών ινών είναι γνωστός ως οπτικές ίνες (fiber optics). Ο όρος επινοήθηκε από τον Ινδό-Αμερικανό φυσικό Narinder Singh Kapany, ο οποίος αναγνωρίζεται ευρέως ως ο πατέρας των οπτικών ινών [11].



**Εικόνα 1.1 Δέσμη οπτικών ινών**

## Κεφάλαιο 2 - Εφαρμογές και Τεχνολογία

### 2.1.Εφαρμογές

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται από εταιρείες τηλεπικοινωνιών για τη μετάδοση τηλεφωνικών σημάτων, επικοινωνιών μέσω Διαδικτύου και σημάτων καλωδιακής τηλεόρασης. Χρησιμοποιείται επίσης σε άλλες βιομηχανίες, όπως ιατρικές, αμυντικές, κυβερνητικές, βιομηχανικές και εμπορικές. Εκτός από την εξυπηρέτηση των σκοπών των τηλεπικοινωνιών, χρησιμοποιείται ως οδηγός φωτός, για εργαλεία απεικόνισης, λέιζερ, SONAR και ως αισθητήρες για τη μέτρηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Λόγω χαμηλότερης εξασθένησης και παρεμβολών, οι οπτικές ίνες έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με το σύρμα χαλκού σε εφαρμογές μεγάλου εύρους ζώνης. Ωστόσο, η ανάπτυξη υποδομών εντός των πόλεων είναι σχετικά δύσκολη και χρονοβόρα και τα συστήματα οπτικών ινών μπορεί να είναι πολύπλοκα και δαπανηρά για εγκατάσταση και λειτουργία.

Λόγω αυτών των δυσκολιών, τα συστήματα επικοινωνίας πρώιμων οπτικών ινών εγκαταστάθηκαν κυρίως σε εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πλήρη χωρητικότητα μετάδοσης, αντισταθμίζοντας το αυξημένο κόστος. Οι τιμές των επικοινωνιών οπτικών ινών έχουν μειωθεί σημαντικά από το 2000 [9].

Η τιμή για την παραγωγή ινών στα σπίτια έχει γίνει σήμερα πιο αποδοτική από την ανάπτυξη ενός δικτύου με βάση το χαλκό. Οι τιμές έχουν μειωθεί στα 850 \$ ανά συνδρομητή στις ΗΠΑ και χαμηλότερες σε χώρες όπως η Ολλανδία, όπου το κόστος εκσκαφής είναι χαμηλό και η πυκνότητα κατοικιών είναι υψηλή [10].

Από το 1990, όταν τα συστήματα οπτικής ενίσχυσης έγιναν διαθέσιμα στο εμπόριο, η βιομηχανία τηλεπικοινωνιών έχει δημιουργήσει ένα τεράστιο δίκτυο γραμμών υπεραστικών ινών. Μέχρι το 2002, ολοκληρώθηκε ένα διηπειρωτικό δίκτυο υποθαλάσσιου καλωδίου υποθαλάσσιων επικοινωνιών με χωρητικότητα 2,56 Tb / s και παρόλο που συγκεκριμένες δυνατότητες δικτύου είναι προνομιακές πληροφορίες, οι αναφορές τηλεπικοινωνιακών επενδύσεων δείχνουν ότι η χωρητικότητα του δικτύου έχει αυξηθεί δραματικά από το 2004 [11].



## 2.2. Τεχνολογία

Τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών περιλαμβάνουν γενικά έναν οπτικό πομπό για τη μετατροπή ενός ηλεκτρικού σήματος σε ένα οπτικό σήμα για αποστολή μέσω της οπτικής ίνας, ένα καλώδιο που περιέχει δέσμες πολλαπλών οπτικών ινών που διοχετεύεται μέσω υπόγειων αγωγών και κτιρίων, πολλαπλών ειδών ενισχυτών και έναν οπτικό δέκτη για την ανάκτηση του σήματος ως ηλεκτρικό σήμα. Οι πληροφορίες που διαβιβάζονται είναι συνήθως ψηφιακές πληροφορίες που παράγονται από υπολογιστές, τηλεφωνικά συστήματα και εταιρείες καλωδιακής τηλεόρασης.

### 2.2.1. Πομποί

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι οπτικοί πομποί είναι συσκευές ημιαγωγών όπως δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) και δίοδοι λέιζερ. Η διαφορά μεταξύ των LED και των δίοδων λέιζερ είναι ότι τα LED παράγουν ασυνάρτητο φως, ενώ οι δίοδοι laser παράγουν συνεκτικό φως. Για χρήση σε οπτικές επικοινωνίες, οι οπτικοί πομποί ημιαγωγών πρέπει να είναι σχεδιασμένοι να είναι συμπαγείς, αποδοτικοί και αξιόπιστοι, ενώ λειτουργούν σε βέλτιστο εύρος μήκους κύματος και διαμορφώνονται απευθείας σε υψηλές συχνότητες.

Στην απλούστερη μορφή του, ένα LED είναι μια διασταύρωση pn, που εκπέμπει φως μέσω αυθόρμητων εκπομπών, ένα φαινόμενο που αναφέρεται ως ηλεκτροφωταύγεια. Το εκπεμπόμενο φως είναι ασυνεπές με σχετικά μεγάλο φασματικό πλάτος 30-60 nm. Η μετάδοση φωτός LED είναι επίσης αναποτελεσματική, με μόνο περίπου 1% [23] ισχύος εισόδου, ή περίπου 100 μικροβατ, τελικά μετατράπηκε σε εκτοξευμένη ισχύ η οποία έχει συνδεθεί με την οπτική ίνα. Ωστόσο, λόγω του σχετικά απλού σχεδιασμού τους, τα LED είναι πολύ χρήσιμα για εφαρμογές χαμηλού κόστους.



**Εικόνα 2.1 Μια μονάδα GBIC, είναι ένας οπτικός και ηλεκτρικός πομποδέκτης. Ο ηλεκτρικός σύνδεσμος είναι επάνω δεξιά και οι οπτικοί σύνδεσμοι βρίσκονται κάτω αριστερά**

Τα LED επικοινωνιών παράγονται συνήθως από φωσφοριούχο ίνδιο αρσενίου (InGaAsP) ή από αρσενίδιο γαλλίου (GaAs). Επειδή τα LED InGaAsP λειτουργούν σε μεγαλύτερο μήκος κύματος από τα LED GaAs (1,3 μικρόμετρα έναντι 0,81-0,87 μικρόμετρα), το φάσμα εξόδου τους, ενώ το ισοδύναμο στην ενέργεια είναι ευρύτερο σε όρους μήκους κύματος με συντελεστή περίπου 1,7 το μεγάλο εύρος φάσματος των LED υπόκειται σε υψηλότερη διασπορά ινών, περιορίζοντας σημαντικά το προϊόν απόστασης ταχύτητας bit (ένα κοινό μέτρο χρησιμότητας). Οι λυχνίες LED είναι κατάλληλες κυρίως για εφαρμογές τοπικού δικτύου με ρυθμούς bit 10–100 Mbit / s και αποστάσεις μετάδοσης μερικών χιλιομέτρων. Έχουν επίσης αναπτυχθεί LED που χρησιμοποιούν πολλά κβαντικά φρεάτια για να εκπέμπει φως σε διαφορετικά μήκη κύματος σε ένα ευρύ φάσμα και χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για δίκτυα τοπικής περιοχής WDM (Πολύπλεξη διαίρεσης μήκους κύματος).

Σήμερα, τα LED αντικαταστάθηκαν σε μεγάλο βαθμό από συσκευές VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser), οι οποίες προσφέρουν βελτιωμένη ταχύτητα, ισχύ και φασματικές ιδιότητες, με παρόμοιο κόστος. Οι συνηθισμένες συσκευές VCSEL συνδυάζονται μεταξύ τους με πολλές ίνες.

Ένα λέιζερ ημιαγωγών εκπέμπει φως μέσω διεγερμένων εκπομπών παρά αυθόρμητων εκπομπών, με αποτέλεσμα υψηλή ισχύ εξόδου ( $\sim 100 \text{ mW}$ ) καθώς και άλλα οφέλη που σχετίζονται με τη φύση του συνεκτικού φωτός. Η έξοδος ενός λέιζερ είναι σχετικά κατευθυντική, επιτρέποντας υψηλή απόδοση ζεύξης ( $\sim 50\%$ ) σε ίνες μονής λειτουργίας. Το στενό φασματικό πλάτος επιτρέπει επίσης υψηλούς ρυθμούς bit αφού μειώνει την επίδραση της χρωματικής διασποράς. Επιπλέον, τα λέιζερ ημιαγωγών μπορούν να διαμορφωθούν απευθείας σε υψηλές συχνότητες λόγω του μικρού χρόνου ανασυνδυασμού.

Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες κατηγορίες πομπών λέιζερ ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται στις οπτικές ίνες περιλαμβάνουν VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser), Fabry – Pérot και DFB (Distributed Feed Back).

Οι δίοδοι λέιζερ συχνά διαμορφώνονται άμεσα, δηλαδή η έξοδος φωτός ελέγχεται από ένα ρεύμα που εφαρμόζεται απευθείας στη συσκευή. Για πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων ή συνδέσεις πολύ μεγάλων αποστάσεων, μια πηγή λέιζερ μπορεί να λειτουργεί συνεχόμενα κύματα και το φως να διαμορφώνεται από μια εξωτερική συσκευή, έναν οπτικό διαμορφωτή, όπως ένας διαμορφωτής ηλεκτροαπορρόφησης ή ένα παρεμβολόμετρο Mach-Zehnder. Η εξωτερική διαμόρφωση αυξάνει την επιτεύξιμη απόσταση συνδέσμου με την εξάλειψη της ανατροπής λέιζερ, η οποία διευρύνει το πλάτος της γραμμής απευθείας διαμορφωμένων λέιζερ, αυξάνοντας τη χρωματική διασπορά στην ίνα. Για πολύ υψηλή απόδοση εύρους ζώνης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνεκτική διαμόρφωση για τη μεταβολή της φάσης του φωτός επιπλέον του πλάτους, επιτρέποντας τη χρήση των QPSK, QAM και OFDM.

Ένας πομποδέκτης είναι μια συσκευή που συνδυάζει έναν πομπό και έναν δέκτη σε ένα μόνο περίβλημα.

Οι οπτικές ίνες έχουν δει πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία. "Η ηλεκτρολόγηση μετατόπισης διπλής πόλωσης τετραγωνικής φάσης είναι μια μορφή διαμόρφωσης που στέλνει αποτελεσματικά τέσσερις φορές περισσότερες πληροφορίες από τις παραδοσιακές οπτικές μεταδόσεις της ίδιας ταχύτητας." [24]

### 2.2.2. Δέκτες

Το κύριο συστατικό ενός οπτικού δέκτη είναι ένας φωτοανιχνευτής που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας φωτοηλεκτρική δράση. Οι κύριοι φωτοανιχνευτές για τηλεπικοινωνίες κατασκευάζονται από αρσενίδιο Indium gallium. Ο φωτοανιχνευτής είναι συνήθως μια φωτοδιόδος που βασίζεται σε ημιαγωγούς. Διάφοροι τύποι φωτοδιοδών περιλαμβάνουν φωτοδιόδους pn, φωτοδιόδους καρφίτσας και φωτοδιόδους χιονοστιβάδας. Οι φωτοανιχνευτές μετάλλων-ημιαγωγών-μετάλλων (MSM) χρησιμοποιούνται επίσης λόγω της καταλληλότητάς τους για ενσωμάτωση κυκλώματος σε αναγεννητές και πολυπλέκτες διαίρεσης μήκους κύματος.

Οι οπτικοί-ηλεκτρικοί μετατροπείς συνήθως συνδέονται με έναν ενισχυτή transimpedance και έναν περιοριστικό ενισχυτή για να παράγουν ένα ψηφιακό σήμα στην ηλεκτρική περιοχή από το εισερχόμενο οπτικό σήμα, το οποίο μπορεί να εξασθενεί και να παραμορφώνεται κατά τη διέλευση από το κανάλι. Περαιτέρω επεξεργασία σήματος όπως ανάκτηση ρολογιού από δεδομένα (CDR) που εκτελείται από έναν βρόχο κλειδώματος φάσης μπορεί επίσης να εφαρμοστεί προτού μεταδοθούν τα δεδομένα.

Οι συνεκτικοί δέκτες χρησιμοποιούν ένα τοπικό ταλαντωτή λείζερ σε συνδυασμό με ένα ζεύγος υβριδικών συζευκτών και τεσσάρων φωτοανιχνευτών ανά πόλωση, ακολουθούμενο από ADC υψηλής ταχύτητας και επεξεργασία ψηφιακού σήματος για την ανάκτηση δεδομένων διαμορφωμένων με QPSK, QAM ή OFDM.

### 2.2.3. Ψηφιακή προπαραβολή (Digital predistortion)

Ένας πομπός συστήματος οπτικής επικοινωνίας αποτελείται από έναν ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα (DAC), έναν ενισχυτή προγράμματος οδήγησης και έναν Mach-Zehnder-Modulator. Η ανάπτυξη υψηλότερων μορφών διαμόρφωσης ( $> 4$  QAM) ή υψηλότερων ρυθμών Baud ( $> 32$  GBaud) μειώνει την απόδοση του συστήματος λόγω γραμμικών και μη γραμμικών επιδράσεων πομπού. Αυτές οι επιδράσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε γραμμικές παραμορφώσεις λόγω DAC περιορισμό του εύρους ζώνης και του πομπού I / Q παραποιήσει καθώς και μη-γραμμικές επιδράσεις που προκαλούνται από τον κορεσμό απολαβή στον ενισχυτή οδηγού και του διαμορφωτή

Mach-Zehnder. Η Ψηφιακή προπαραβολή εξουδετερώνει τις υποβαθμιστικές επιδράσεις και επιτρέπει ρυθμούς Baud έως 56 GBaud και μορφές διαμόρφωσης όπως 64 QAM και 128 QAM με τα διαθέσιμα στο εμπόριο στοιχεία. Ο επεξεργαστής ψηφιακού σήματος πομπού εκτελεί ψηφιακή προπαραγωγή στα σήματα εισόδου χρησιμοποιώντας το αντίστροφο μοντέλο πομπού πριν ανεβάσετε τα δείγματα στο DAC.

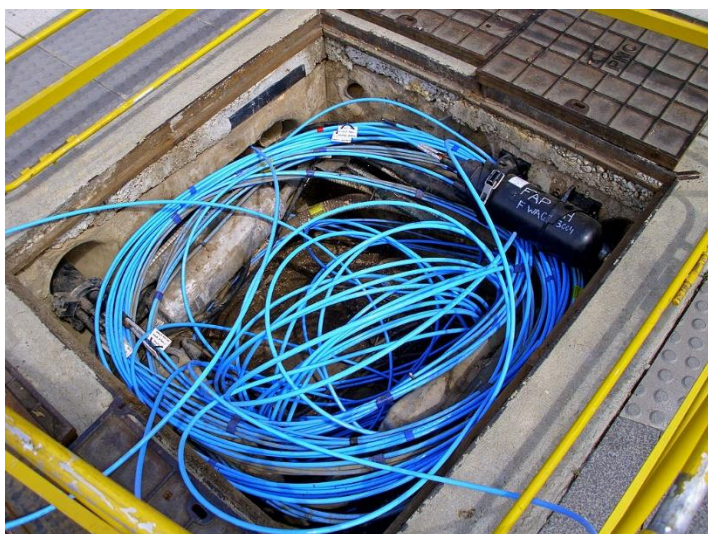
Οι παλαιότερες μέθοδοι ψηφιακής προπαραγωγής αφορούσαν μόνο γραμμικές επιδράσεις. Οι πρόσφατες δημοσιεύσεις αντιστάθμισαν επίσης τις μη γραμμικές παραμορφώσεις. Οι Berenguer et al μοντελοποιούν τον διαμορφωτή Mach – Zehnder ως ανεξάρτητο σύστημα Wiener και το DAC και ο ενισχυτής προγράμματος οδήγησης διαμορφώνονται από μια περικομμένη, αμετάβλητη σειρά Volterra [20]. Οι Khanna et al χρησιμοποίησαν ένα πολυώνυμο μνήμης για τη μοντελοποίηση των στοιχείων του πομπού από κοινού [22]. Και στις δύο προσεγγίσεις οι σειρές Volterra ή οι συντελεστές πολυωνυμικής μνήμης βρίσκονται χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική έμμεσης μάθησης. Οι Duthel et al καταγράφει για κάθε κλάδο του διαμορφωτή Mach-Zehnder διάφορα σήματα σε διαφορετική πολικότητα και φάσεις. Τα σήματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του οπτικού πεδίου. Τα πεδία αλληλοσυσχέτισης σε φάση και τετράγωνο προσδιορίζουν την παράκαμψη χρονισμού. Η απόκριση συχνότητας και οι μη γραμμικά επιδράσεις καθορίζονται από την αρχιτεκτονική έμμεσης μάθησης [24].

#### **2.2.4. Τύποι καλωδίων ινών**

Ένα καλώδιο οπτικών ινών αποτελείται από έναν πυρήνα, επένδυση και ένα ρυθμιστικό (ένα προστατευτικό εξωτερικό επίχρισμα), στο οποίο η επένδυση καθοδηγεί το φως κατά μήκος του πυρήνα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Ο πυρήνας και η επένδυση (που έχει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης) είναι συνήθως κατασκευασμένα από γυαλί πυριτίας υψηλής ποιότητας, αν και μπορούν και τα δύο να είναι κατασκευασμένα από πλαστικό. Η σύνδεση δύο οπτικών ινών γίνεται με σύντηξη σύντηξης ή μηχανικό μάτισμα και απαιτεί ειδικές δεξιότητες και τεχνολογία διασύνδεσης λόγω της μικροσκοπικής ακρίβειας που απαιτείται για την ευθυγράμμιση των πυρήνων των ινών [22].



**Εικόνα 2.2 Ένα ρυμουλκό καλωδίου με αγωγό που μπορεί να μεταφέρει οπτικές ίνες**



**Εικόνα 2.3 Οπτική ίνα πολλαπλών τρόπων σε ένα υπόγειο λάκκο συντήρησης**

Δύο κύριοι τύποι οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται σε οπτικές επικοινωνίες περιλαμβάνουν multi-mode οπτικές ίνες και single-mode οπτικές ίνες. Μια οπτική ίνα πολλαπλών λειτουργιών έχει μεγαλύτερο πυρήνα ( $\geq 50$  μικρόμετρα), επιτρέποντας λιγότερο ακριβείς, φθηνότερους πομπούς και δέκτες να συνδεθούν σε αυτήν καθώς και φθηνότερες συνδέσεις. Ωστόσο, μια ίνα πολλαπλών τρόπων εισάγει παραμόρφωση πολλαπλών τρόπων, η οποία συχνά περιορίζει το εύρος ζώνης και το μήκος του

συνδέσμων. Επιπλέον, λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητάς του σε προσμίξεις, οι ίνες πολλαπλών τρόπων λειτουργίας είναι συνήθως ακριβές και παρουσιάζουν μεγαλύτερη εξασθένηση. Ο πυρήνας μιας ίνας μονής λειτουργίας είναι μικρότερος (<10 μικρόμετρα) και απαιτεί πιο ακριβή εξαρτήματα και μεθόδους διασύνδεσης, αλλά επιτρέπει πολύ μεγαλύτερες συνδέσεις υψηλότερης απόδοσης. Και οι ίνες μονής και πολλαπλής λειτουργίας προσφέρονται σε διαφορετικές ποιότητες.

MMF FDDI	MMF OM1	MMF OM2	MMF OM3	MMF OM4	MMF OM5	SMF OS1	SMF OS2
62,5 / 125 $\mu\text{m}$ (1987)	62,5 / 125 $\mu\text{m}$ (1989)	50/125 $\mu\text{m}$ (1998)	50/125 $\mu\text{m}$ (2003)	50/125 $\mu\text{m}$ (2008)	50/125 $\mu\text{m}$ (2016)	9/125 $\mu\text{m}$ (1998)	9/125 $\mu\text{m}$ (2000)
160 MHz · km @ 850 nm	200 MHz · km @ 850 nm	500 MHz · km @ 850 nm	1500 MHz · km @ 850 nm	3500 MHz · km @ 850 nm	3500 MHz · km @ 850 nm & 1850 MHz · km @ 950 nm	1 dB / km @ 1300/1550 nm	0,4 dB / km @ 1300/1550 nm

**Πίνακας 2.1 Σύγκριση βαθμών ινών**

Προκειμένου να συσκευαστεί η ίνα σε ένα εμπορικά βιώσιμο προϊόν, τυπικά επικαλύπτεται προστατευτικά χρησιμοποιώντας υπεριώδη (UV), ακρυλικά πολυμερή με ελαφριά σκλήρυνση, στη συνέχεια τερματίζεται με συνδετήρες οπτικών ινών και τελικά συναρμολογείται σε καλώδιο. Μετά από αυτό, μπορεί να τοποθετηθεί στο έδαφος και στη συνέχεια να περάσει μέσα από τα τοιχώματα ενός κτηρίου και να αναπτυχθεί air claded με τρόπο παρόμοιο με τα καλώδια χαλκού. Αυτές οι ίνες απαιτούν λιγότερη συντήρηση από τα συνηθισμένα σύρματα συνεστραμμένου ζεύγους μόλις αναπτυχθούν [20].

Τα εξειδικευμένα καλώδια χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων υποθαλάσσιων υπεραστικών, π.χ. διατλαντικό καλώδιο επικοινωνίας. Τα νέα καλώδια που λειτουργούν από εμπορικές επιχειρήσεις (Emerald Atlantis, Hibernia Atlantic) έχουν συνήθως τέσσερα σκέλη ινών και διασχίζουν τον Ατλαντικό (NYC-Λονδίνο) σε

60-70ms. Το κόστος κάθε τέτοιου καλωδίου ήταν περίπου 300 εκατομμύρια δολάρια το 2011.

Μια άλλη συνήθης πρακτική είναι να συσσωρεύονται πολλοί κλώνοι οπτικών ινών σε καλώδιο μετάδοσης ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό εκμεταλλεύεται αποτελεσματικά τα δικαιώματα μετάδοσης ισχύος, διασφαλίζει ότι μια εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να κατέχει και να ελέγχει τις ίνες που απαιτούνται για την παρακολούθηση των δικών της συσκευών και γραμμών, είναι αποτελεσματικά απρόσβλητη από παραβιάσεις και απλοποιεί την ανάπτυξη τεχνολογίας έξυπνου δικτύου.

### **2.2.5. Ενίσχυση**

Η απόσταση μετάδοσης ενός συστήματος επικοινωνίας οπτικών ινών περιορίζεται παραδοσιακά από εξασθένηση των ινών και από παραμόρφωση των ινών. Χρησιμοποιώντας οπτικο-ηλεκτρονικούς επαναλήπτες (repeaters), αυτά τα προβλήματα έχουν εξαλειφθεί. Αυτοί οι επαναλήπτες μετατρέπουν το σήμα σε ηλεκτρικό σήμα και, στη συνέχεια, χρησιμοποιούν έναν πομπό για να στείλουν ξανά το σήμα σε υψηλότερη ένταση από την ληφθείσα, αντισταθμίζοντας έτσι την απώλεια που προκλήθηκε στο προηγούμενο τμήμα. Λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας με τα σύγχρονα πολυπλεξικά σήματα διαίρεσης μήκους κύματος, συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι έπρεπε να εγκατασταθούν περίπου μία φορά κάθε 20 χλμ. (12 μίλια), το κόστος αυτών των επαναληπτών είναι πολύ υψηλό.

Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση οπτικών ενισχυτών που ενισχύουν το οπτικό σήμα απευθείας χωρίς να χρειάζεται να μετατρέψετε το σήμα σε ηλεκτρικό πεδίο. Ένας κοινός τύπος οπτικού ενισχυτή ονομάζεται ενισχυτής ινών με προσθήκη Erbium ή EDFA. Αυτά κατασκευάζονται με επικάλυψη μήκους ινών με το ορυκτό erbium σπάνιων γαιών και άντληση με φως από λέιζερ με μικρότερο μήκος κύματος από το σήμα επικοινωνίας (συνήθως 980 nm). Τα EDFA παρέχουν κέρδος στη ζώνη ITU C στα 1550 nm, που είναι κοντά στο ελάχιστο απώλειας για οπτικές ίνες.

Οι οπτικοί ενισχυτές έχουν αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των ηλεκτρικών επαναληπτών. Πρώτον, ένας οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει μια πολύ ευρεία



ζώνη ταυτόχρονα, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει εκατοντάδες μεμονωμένα κανάλια, εξαλείφοντας την ανάγκη αποπολυπλέγματος σημάτων DWDM σε κάθε ενισχυτή.

Δεύτερον, οι οπτικοί ενισχυτές λειτουργούν ανεξάρτητα από τον ρυθμό δεδομένων και τη μορφή διαμόρφωσης, επιτρέποντας τη συνύπαρξη πολλαπλών ταχυτήτων δεδομένων και μορφών διαμόρφωσης και επιτρέποντας την αναβάθμιση του ρυθμού δεδομένων ενός συστήματος χωρίς να χρειάζεται να αντικατασταθούν όλοι οι επαναλήπτες. Τρίτον, οι οπτικοί ενισχυτές είναι πολύ απλούστεροι από έναν επαναλήπτη με τις ίδιες δυνατότητες και επομένως είναι πολύ πιο αξιόπιστοι. Οι οπτικοί ενισχυτές έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τους επαναλήπτες σε νέες εγκαταστάσεις, αν και οι ηλεκτρονικοί επαναλήπτες εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως ως αναμεταδότες για μετατροπή μήκους κύματος.

#### **2.2.6. Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος**

Η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) είναι η τεχνική μετάδοσης πολλαπλών καναλιών πληροφοριών μέσω μιας μοναδικής οπτικής ίνας με την αποστολή πολλαπλών ακτίνων φωτός διαφορετικών μηκών κύματος μέσω της ίνας, κάθε μία διαμορφωμένη με ένα ξεχωριστό κανάλι πληροφοριών. Αυτό επιτρέπει τον πολλαπλασιασμό της διαθέσιμης χωρητικότητας των οπτικών ινών. Αυτό απαιτεί έναν πολυπλέκτη διαίρεσης μήκους κύματος στον εξοπλισμό μετάδοσης και έναν αποπολυπλέκτη (ουσιαστικά ένα φασματόμετρο) στον εξοπλισμό λήψης.

Οι σχάρες Arrayed Waveguide χρησιμοποιούνται συνήθως για πολυπλεξία και αποπολυπλεξία στο WDM Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία WDM που διατίθεται πλέον στο εμπόριο, το εύρος ζώνης μιας ίνας μπορεί να χωριστεί σε έως και 160 κανάλια [21] για να υποστηρίξει ένα συνδυασμένο ρυθμό μετάδοσης bit στο εύρος 1,6.Tbit / s.

## **2.3.Παράμετροι**

### **2.3.1. Προϊόν εύρους ζώνης - απόσταση**

Επειδή η επίδραση της διασποράς αυξάνεται με το μήκος της ίνας, ένα σύστημα μετάδοσης ινών χαρακτηρίζεται συχνά από το προϊόν της απόστασης εύρους ζώνης, που εκφράζεται συνήθως σε μονάδες MHz · km. Αυτή η τιμή είναι προϊόν εύρους ζώνης και απόστασης, επειδή υπάρχει αντιστάθμιση μεταξύ του εύρους ζώνης του σήματος και της απόστασης από την οποία μπορεί να μεταφερθεί. Για παράδειγμα, μια κοινή ίνα πολλαπλών τρόπων με προϊόν εύρους ζώνης απόστασης 500 MHz · km θα μπορούσε να μεταφέρει σήμα 500 MHz για 1 km ή σήμα 1000 MHz για 0,5 km.

### **2.3.2. Ταχύτητες εγγραφής**

Κάθε ίνα μπορεί να μεταφέρει πολλά ανεξάρτητα κανάλια, το καθένα χρησιμοποιώντας διαφορετικό μήκος κύματος φωτός (πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος). Ο καθαρός ρυθμός δεδομένων (ρυθμός δεδομένων χωρίς overhead bytes) ανά ίνα είναι ο ρυθμός δεδομένων ανά κανάλι που μειώνεται από την επιβάρυνση διόρθωσης σφαλμάτων προς τα εμπρός (FEC), πολλαπλασιασμένος με τον αριθμό καναλιών (συνήθως έως ογδόντα σε εμπορικά πυκνά συστήματα WDM από το 2008).

### **2.3.3. Standard ινών**

Στον πίνακα 2.2 συνοψίζεται η τρέχουσα έρευνα τελευταίας τεχνολογίας.

Έτος		Εταιρεία	Αποτελεσματική ταχύτητα	Κανάλια WDM channels	Ταχύτητα ανά κανάλι	Απόσταση
2009		Alcatel-Lucent	15.5 Tbit/s	155	100 Gbit/s	7000 km
2010		NTT	69.1 Tbit/s	<b>432</b>	171 Gbit/s	240 km
2011		NEC	<b>101.7 Tbit/s</b>	370	273 Gbit/s	165 km
2011		KIT	26 Tbit/s	336	77 Gbit/s	50 km
2016		BT & Huawei	5.6 Tbit/s	28	200 Gbit/s	about 140 km?
2016		<u>Nokia</u> <u>Bell</u> <u>Labs</u> , Deutsche Telekom & Technical University of Munich	1 Tbit/s	1	<b>1 Tbit/s</b>	
2016		Nokia-Alcatel- Lucent <sup>[39]</sup>	65 Tbit/s			6600 km
2017		BT & Huawei	11.2 Tbit/s	28	400 Gbit/s	250 km
2020		RMIT, Monash & Swinburne Universities	39.0 Tbit/s	160	244 Gbit/s	76.6km

**Πίνακας 1.2 Τρέχουσα έρευνα τελευταίας τεχνολογίας χρησιμοποιώντας τηλεπικοινωνιών.**

Το αποτέλεσμα Nokia / DT / TUM του 2016 είναι αξιοσημείωτο, καθώς είναι το πρώτο αποτέλεσμα που πλησιάζει το θεωρητικό όριο του Shannon.

Τα αποτελέσματα του 2011 KIT και 2020 RMIT / Monash / Swinburne είναι αξιοσημείωτα επειδή χρησιμοποίησαν μία μόνο πηγή για την οδήγηση όλων των καναλιών.

#### **2.3.4. Εξειδικευμένα καλώδια**

Στον ακόλουθο πίνακα 2.3 συνοψίζεται η τρέχουσα έρευνα τελευταίας τεχνολογίας με τη χρήση εξειδικευμένων καλωδίων που επιτρέπουν την εμφάνιση χωρικής πολυπλεξίας, τη χρήση εξειδικευμένων καλωδίων ινών τριών τρόπων ή παρόμοιων εξειδικευμένων καλωδίων οπτικών ινών.

Το αποτέλεσμα NICT του 2018 είναι αξιοσημείωτο για το σπάσιμο του ρεκόρ για την απόδοση χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο ενός πυρήνα, δηλαδή, χωρίς τη χρήση χωρικής πολυπλεξίας.

Έτος	Εταιρεία	Αποτελεσματική ταχύτητα	Αριθμός propagation modes	Αριθμός πυρήνων	WDM κανάλια (ανά πυρήνα)	Ταχύτητα ανά κανάλι	Απόσταση
2011	NICT	109.2 Tbit/s		7			
2012	NEC, Corning	1.05 Pbit/s		12			52.4 km
2013	University of Southampton	73.7 Tbit/s		1 (hollow)	3x96 (mode DM)	256 Gbit/s	310 m
2014	Technical University of Denmark	43 Tbit/s		7			1045 km
2014	Eindhoven University of Technology (TU/e) and University of Central Florida (CREOL)	255 Tbit/s		7	50	<b>~728 Gbit/s</b>	1 km
2015	NICT, Sumitomo Electric , and RAM Photonics	2.15 Pbit/s		22	402 (C+L bands)	243 Gbit/s	31 km
2017	NTT	1 Pbit/s	single-mode	<b>32</b>	46	680 Gbit/s	205.6 km
2017	KDDI Research and Sumitomo Electric	<b>10.16 Pbit/s</b>	<b>6-mode</b>	19	<b>739 (C+L bands)</b>	120 Gbit/s	11.3 km
2018	NICT	159 Tbit/s	tri-mode	1	348	414 Gbit/s	<b>1045 km</b>

**Πίνακας 2.3 Τρέχουσα έρευνα τελευταίας τεχνολογίας με τη χρήση εξειδικευμένων καλωδίων που επιτρέπουν την εμφάνιση χωρικής πολυπλεξίας**

### 2.3.5. Νέες τεχνικές

Η έρευνα από την DTU, την Fujikura & NTT είναι αξιοσημείωτη στο ότι η ομάδα μπόρεσε να μειώσει την κατανάλωση ισχύος των οπτικών σε περίπου 5% σε σύγκριση με τις πιο γενικές τεχνικές, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μια νέα γενιά οπτικών εξαρτημάτων υψηλής απόδοσης.

Ετος	Οργάνωση	Αποτελεσματική ταχύτητα	Αριθμός τρόπων διάδοσης	Αριθμός πυρήνων	Κανάλια WDM (ανά πυρήνα)	Ανά ταχύτητα καναλιού
2018	Hao Hu, et al. (DTU, Fujikura & NTT)	768 Tbit / s (661 Tbit / s)	Ενιαία λειτουργία	30	80	320 Gbit / s

**Πίνακας 2.4 Νέες τεχνικές**

Έρευνα που διεξήχθη από το Πανεπιστήμιο RMIT στη Μελβούρνη της Αυστραλίας, ανέπτυξε μια νανοφωτονική συσκευή που έχει επιτύχει 100 φορές αύξηση στις τρέχουσες εφικτές ταχύτητες οπτικών ινών χρησιμοποιώντας μια τεχνική στριφτού φωτός [23].

Αυτή η τεχνική μεταφέρει δεδομένα σχετικά με τα κύματα φωτός που έχουν στριφθεί σε σπειροειδή μορφή, για να αυξηθεί περαιτέρω η χωρητικότητα του οπτικού καλωδίου, η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως τροχιακή γωνιακή ορμή (OAM). Η νανοφωτονική συσκευή χρησιμοποιεί εξαιρετικά λεπτά τοπολογικά nanosheets για τη μέτρηση ενός κλάσματος ενός χιλιοστού στριμμένου φωτός, η νανο-ηλεκτρονική συσκευή είναι ενσωματωμένη σε μια υποδοχή μικρότερη από το μέγεθος μιας σύνδεσης USB, ταιριάζει εύκολα στο τέλος ενός καλωδίου οπτικών ινών. Η συσκευή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη κβαντικών πληροφοριών που αποστέλλονται μέσω στριμμένου φωτός, είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί σε ένα νέο εύρος έρευνας κβαντικής επικοινωνίας και κβαντικής πληροφορικής [24].

## 2.4.Διασπορά

Για τις σύγχρονες γυάλινες οπτικές ίνες, η μέγιστη απόσταση μετάδοσης περιορίζεται όχι από την άμεση απορρόφηση υλικού αλλά από διάφορους τύπους διασποράς ή διάδοσης οπτικών παλμών καθώς ταξιδεύουν κατά μήκος της ίνας. Η διασπορά στις οπτικές ίνες προκαλείται από διάφορους παράγοντες. Η διατροπική διασπορά, που προκαλείται από τις διαφορετικές αξονικές ταχύτητες διαφορετικών εγκάρσιων τρόπων, περιορίζει την απόδοση των ινών πολλαπλών τρόπων. Επειδή η ίνα μονής λειτουργίας υποστηρίζει μόνο έναν εγκάρσιο τρόπο, εξαλείφεται η διασπορά διατροπικών.

Η απόδοση των ινών μονής λειτουργίας περιορίζεται κυρίως από τη χρωματική διασπορά (που ονομάζεται επίσης διασπορά ταχύτητας ομάδας), η οποία συμβαίνει επειδή ο δείκτης του γυαλιού διαφέρει ελαφρώς ανάλογα με το μήκος κύματος του φωτός και το φως από πραγματικούς οπτικούς πομπούς έχει απαραίτητα μη μηδενικό φασματικό πλάτος (λόγω διαμόρφωσης). Η διασπορά του τρόπου πόλωσης, μια άλλη πηγή περιορισμού, συμβαίνει επειδή παρόλο που η ίνα μονής λειτουργίας μπορεί να διατηρήσει μόνο έναν εγκάρσιο τρόπο, μπορεί να μεταφέρει αυτόν τον τρόπο λειτουργίας με δύο διαφορετικές πόλωση και οι μικρές ατέλειες ή παραμορφώσεις σε μια ίνα μπορούν να αλλάξουν τις ταχύτητες διάδοσης για τα δύο πόλωση. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διάφραγμα ινών και μπορεί να αντισταθμιστεί από οπτικές ίνες που διατηρούν πόλωση.

Η διασπορά περιορίζει το εύρος ζώνης της ίνας επειδή ο οπτικός παλμός εξάπλωσης περιορίζει τον ρυθμό που οι παλμοί μπορούν να ακολουθούν ο ένας τον άλλον στην ίνα και να είναι ακόμη διακριτοί στον δέκτη.

Κάποια διασπορά, ιδίως χρωματική διασπορά, μπορεί να αφαιρεθεί από έναν «αντισταθμιστή διασποράς». Αυτό λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα ειδικά προετοιμασμένο μήκος ινών που έχει την αντίθετη διασπορά από αυτό που προκαλείται από την ίνα μετάδοσης και αυτό οξύνει τον παλμό έτσι ώστε να μπορεί να αποκωδικοποιηθεί σωστά από τα ηλεκτρονικά.

## 2.5.Εξασθένηση

Η εξασθένηση της ίνας, η οποία απαιτεί τη χρήση των συστημάτων ενίσχυσης, προκαλείται από ένα συνδυασμό υλικού απορρόφησης τη σκέδαση Rayleigh, τη σκέδαση Mie και τις απώλειες σύνδεσης. Αν και η απορρόφηση υλικών για καθαρή síλικά είναι μόνο περίπου 0,03 dB / km (η σύγχρονη ίνα έχει εξασθένηση περίπου 0,3 dB / km), οι έλλειψη καθαρότητας στις αρχικές οπτικές ίνες προκάλεσαν εξασθένηση περίπου 1000 dB / km. Άλλες μορφές εξασθένησης προκαλούνται από φυσικές καταπονήσεις στις ίνες, μικροσκοπικές διακυμάνσεις στην πυκνότητα και ατελείς τεχνικές ματίσματος [15].

## 2.6.Παράθυρα μετάδοσης

Κάθε δράση που συμβάλλει στην εξασθένηση και τη διασπορά εξαρτάται από το οπτικό μήκος κύματος. Υπάρχουν ζώνες μήκους κύματος (ή παράθυρα) όπου είναι πιο αδύναμες και άλλες που είναι πιο ευνοϊκές για μετάδοση. Αυτά τα παράθυρα έχουν τυποποιηθεί και οι ζώνες που έχουν καθοριστεί είναι οι εξής:

Ζώνη	Περιγραφή	Εύρος μήκους κύματος
<b>O band</b>	πρωτότυπο	1260 to 1360 nm
<b>E band</b>	επεκτάθηκε	1360 to 1460 nm
<b>S band</b>	μικρά μήκη κύματος	1460 to 1530 nm
<b>C band</b>	συμβατικό ("παράθυρο erbium")	1530 to 1565 nm
<b>L band</b>	μεγάλα μήκη κύματος	1565 to 1625 nm
<b>band U</b>	εξαιρετικά μεγάλα μήκη κύματος	1625 to 1675 nm

**Πίνακας 2.5 Ζώνες μήκους κύματος (ή παράθυρα) όπου οι δράσεις είναι πιο αδύναμες**



Σημειώστε ότι αυτός ο πίνακας δείχνει ότι η τρέχουσα τεχνολογία κατάφερε να γεφυρώσει το δεύτερο και το τρίτο παράθυρο που ήταν αρχικά αποσυνδεδεμένα.

Ιστορικά, υπήρχε ένα παράθυρο που χρησιμοποιείται κάτω από τη ζώνη O, που ονομάζεται πρώτο παράθυρο, στα 800-900 nm. Ωστόσο, οι απώλειες είναι υψηλές σε αυτήν την περιοχή, επομένως αυτό το παράθυρο χρησιμοποιείται κυρίως για επικοινωνίες μικρών αποστάσεων.

Τα τρέχοντα χαμηλότερα παράθυρα (O και E) περίπου 1300 nm έχουν πολύ χαμηλότερες απώλειες. Αυτή η περιοχή έχει μηδενική διασπορά. Τα μεσαία παράθυρα (S και C) περίπου 1500 nm χρησιμοποιούνται ευρύτερα. Αυτή η περιοχή έχει τις χαμηλότερες απώλειες εξασθένησης και επιτυγχάνει το μεγαλύτερο εύρος. Έχει κάποια διασπορά, οπότε χρησιμοποιούνται συσκευές αντιστάθμισης διασποράς για να το αφαιρέσουν.

## 2.7.Αναγέννηση

Όταν ένας σύνδεσμος επικοινωνίας πρέπει να εκτείνεται σε μεγαλύτερη απόσταση από την υπάρχουσα τεχνολογία οπτικών ινών, το σήμα πρέπει να αναγεννάται σε ενδιάμεσα σημεία της ζεύξης από επαναλήπτες οπτικών επικοινωνιών. Οι επαναλήπτες προσθέτουν σημαντικό κόστος σε ένα σύστημα επικοινωνίας, και έτσι οι σχεδιαστές συστημάτων προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν τη χρήση τους.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία οπτικών ινών και οπτικών επικοινωνιών έχουν μειώσει την υποβάθμιση του σήματος μέχρι στιγμής που απαιτείται αναγέννηση του οπτικού σήματος μόνο σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων. Αυτό έχει μειώσει σημαντικά το κόστος της οπτικής δικτύωσης, ιδιαίτερα σε υποθαλάσσιες εκτάσεις όπου το κόστος και η αξιοπιστία των επαναληπτών είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση ολόκληρου του καλωδιακού συστήματος.

Οι κύριες πρόοδοι που συμβάλλουν σε αυτές τις βελτιώσεις απόδοσης είναι η διαχείριση διασποράς, η οποία επιδιώκει να εξισορροπήσει τα αποτελέσματα της διασποράς έναντι της μη γραμμικότητας και τα solitons, τα οποία χρησιμοποιούν μη γραμμικές επιδράσεις στην ίνα για να επιτρέψουν τη διασπορά χωρίς διασπορά σε μεγάλες αποστάσεις.

## 2.8.Last mile

Αν και τα συστήματα οπτικών ινών υπερέχουν σε εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, οι οπτικές ίνες καθυστέρησαν να επιτύχουν τον στόχο τους για ίνες στις εγκαταστάσεις ή για την επίλυση του προβλήματος των τελευταίων μιλίων. Ωστόσο, η ανάπτυξη του FTTH αυξήθηκε σημαντικά την τελευταία δεκαετία και προβλέπεται να εξυπηρετήσει εκατομμύρια περισσότερους συνδρομητές στο εγγύς μέλλον. Στην Ιαπωνία, για παράδειγμα, η EPON αντικατέστησε σε μεγάλο βαθμό το DSL ως πηγή ευρυζωνικού Διαδικτύου.

Το ΚΤ της Νότιας Κορέας παρέχει επίσης μια υπηρεσία που ονομάζεται FTTH( Fiber To The Home ), το οποίο παρέχει συνδέσεις οπτικών ινών με το σπίτι του συνδρομητή. Οι μεγαλύτερες εφαρμογές FTTH είναι στην Ιαπωνία, τη Νότια Κορέα και την Κίνα. Η Σιγκαπούρη ξεκίνησε την υλοποίηση του ολοκαίνουργιου ευρυζωνικού δικτύου Next Generation (Next Gen NBN) και εγκαθίσταται από το OpenNet. Από τότε που άρχισαν να κυκλοφορούν υπηρεσίες τον Σεπτέμβριο του 2010, η κάλυψη δικτύου στη Σιγκαπούρη έχει φτάσει το 85% σε εθνικό επίπεδο.

Στις ΗΠΑ, η Verizon Communications παρέχει μια υπηρεσία FTTH που ονομάζεται FiOS για την επιλογή αγορών υψηλού ARPU (Μέσο εισόδημα ανά χρήστη) εντός της υπάρχουσας επικράτειάς του. Η άλλη μεγάλη επιζών ILEC (ή Incumbent Local Exchange Carrier), η AT&T, χρησιμοποιεί μια υπηρεσία FTTN (Fiber To The Node) που ονομάζεται U-ayat με συνεστραμμένο ζεύγος στο σπίτι. Οι ανταγωνιστές τους MSO χρησιμοποιούν FTTN με ομοαξονική χρήση HFC. Όλα τα μεγάλα δίκτυα πρόσβασης χρησιμοποιούν ίνες για το μεγαλύτερο μέρος της απόστασης από το δίκτυο του παρόχου υπηρεσιών προς τον πελάτη.

Η παγκόσμια κυρίαρχη τεχνολογία δικτύου πρόσβασης είναι το EPON (Ethernet Passive Optical Network). Στην Ευρώπη και μεταξύ των τηλεπικοινωνιών στις Ηνωμένες Πολιτείες, η BPON (ευρυζωνική PON με βάση το ATM) και η GPON (Gigabit PON) είχαν τις ρίζες τους στους οργανισμούς τυποποίησης FSAN (Δίκτυο πρόσβασης πλήρους υπηρεσίας) και ITU-T.

## 2.9. Σύγκριση με ηλεκτρική μετάδοση

Η επιλογή μεταξύ οπτικών ινών και ηλεκτρικής μετάδοσης (ή χαλκού) για ένα συγκεκριμένο σύστημα γίνεται βάσει ορισμένων ανταλλαγών. Η οπτική ίνα επιλέγεται γενικά για συστήματα που απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης ή εκτείνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις από ό, τι μπορεί να φιλοξενήσει η ηλεκτρική καλωδίωση.

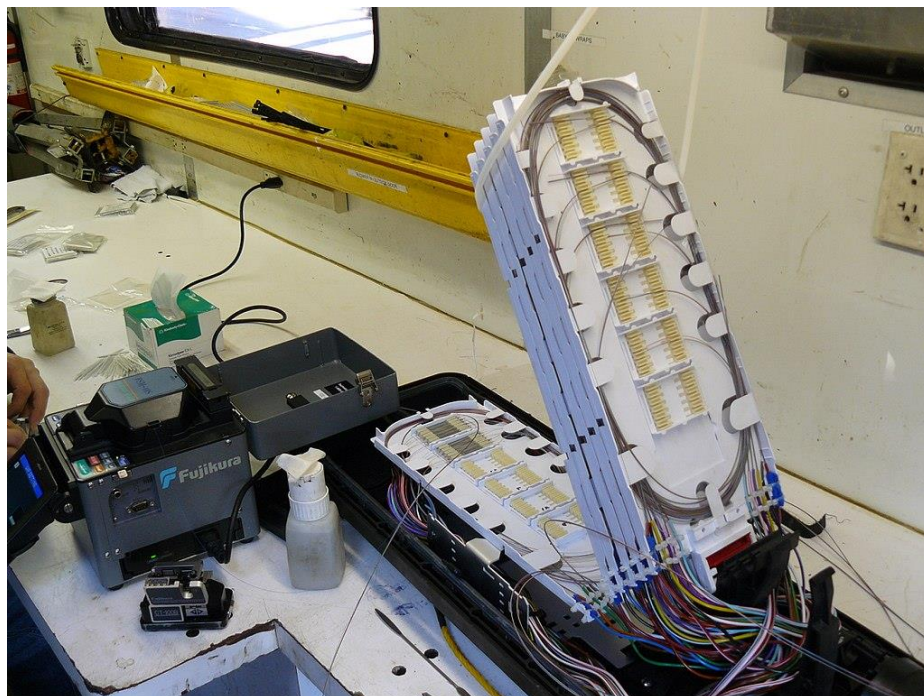


**Εικόνα 2.4 Ένα κινητό εργαστήριο συναρμογών οπτικών ινών που χρησιμοποιείται για την πρόσβαση και τη σύνδεση υπόγειων καλωδίων**

Τα κύρια πλεονεκτήματα της ίνας είναι η εξαιρετικά χαμηλή απώλεια (που επιτρέπει μεγάλες αποστάσεις μεταξύ ενισχυτών / επαναληπτών), η απουσία ρεύματος γείωσης και άλλων παρασιτικών σημάτων και ζητημάτων ισχύος που είναι κοινά στις μακρές παράλληλες διαδρομές ηλεκτρικού αγωγού (λόγω της εξάρτησής της από το φως παρά από την ηλεκτρική ενέργεια για μετάδοση, και η διηλεκτρική φύση των οπτικών ινών), και η εγγενώς υψηλή ικανότητα μεταφοράς δεδομένων.

Απαιτούνται χιλιάδες ηλεκτρικοί σύνδεσμοι για την αντικατάσταση ενός μόνο καλωδίου ινών υψηλού εύρους ζώνης. Ένα άλλο πλεονέκτημα των ινών είναι ότι ακόμη

και όταν κινούνται το ένα δίπλα στο άλλο για μεγάλες αποστάσεις, τα καλώδια των ινών δεν έχουν ουσιαστικά κανένα crosstalk, σε αντίθεση με ορισμένους τύπους ηλεκτρικών γραμμών μεταφοράς. Οι ίνες μπορούν να εγκατασταθούν σε περιοχές με υψηλές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI), όπως παράλληλα με γραμμές χρησιμότητας, ηλεκτροφόρα καλώδια και σιδηροδρομικές γραμμές. Τα μη μεταλλικά, όλα τα διηλεκτρικά καλώδια είναι επίσης ιδανικά για περιοχές με υψηλή συχνότητα αστραπής.



**Εικόνα 2.5 περίβλημα υπόγειων οπτικών ινών**

Συγκριτικά, ενώ τα συστήματα χαλκού μονής γραμμής, ομιλίας υψηλής διάρκειας άνω των δύο χιλιομέτρων απαιτούν επαναλήπτες σήματος γραμμής για ικανοποιητική απόδοση, δεν είναι ασυνήθιστο τα οπτικά συστήματα να ξεπερνούν τα 100 χιλιόμετρα (62 μίλια), χωρίς ενεργή ή παθητική επεξεργασία. Τα καλώδια ινών μονής λειτουργίας διατίθενται συνήθως σε μήκη 12 km (7,5 mi), ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των συνδέσεων που απαιτούνται σε μια μακρά λειτουργία καλωδίων. Οι ίνες πολλαπλών λειτουργιών διατίθενται σε μήκη έως 4 χλμ., Αν και τα βιομηχανικά πρότυπα απαιτούν μόνο 2 χιλιόμετρα διαδρομές χωρίς διακοπή.

Σε εφαρμογές μικρής απόστασης και σχετικά χαμηλού εύρους ζώνης, η ηλεκτρική μετάδοση προτιμάται συχνά για τους παρακάτω λόγους:

- Χαμηλότερο κόστος υλικού, όπου δεν απαιτούνται μεγάλες ποσότητες
- Χαμηλότερο κόστος πομπών και δεκτών
- Δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος καθώς και σημάτων (σε κατάλληλα σχεδιασμένα καλώδια)
- Ευκολία λειτουργίας μετατροπών σε γραμμική λειτουργία

Οι οπτικές ίνες είναι πιο δύσκολο και δαπανηρό να συνδεθούν από τους ηλεκτρικούς αγωγούς. Και σε υψηλότερες δυνάμεις, οι οπτικές ίνες είναι επιρρεπείς σε ασφάλεια ινών με αποτέλεσμα καταστροφή του πυρήνα των ινών και ζημιά στα εξαρτήματα μετάδοσης [17].

Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων της ηλεκτρικής μετάδοσης, η οπτική επικοινωνία δεν είναι συνηθισμένη σε κοντές εφαρμογές box-to-box, backplane ή chip-to-chip. Ωστόσο, τα οπτικά συστήματα σε αυτές τις κλίμακες έχουν αποδειχθεί στο εργαστήριο.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και για εφαρμογές μικρής απόστασης ή χαμηλού εύρους ζώνης, λόγω άλλων σημαντικών χαρακτηριστικών:

- Μη προσβολή στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, συμπεριλαμβανομένων των πυρηνικών ηλεκτρομαγνητικών παλμών.
- Υψηλή ηλεκτρική αντίσταση, καθιστώντας ασφαλή τη χρήση κοντά σε εξοπλισμό υψηλής τάσης ή μεταξύ περιοχών με διαφορετικά δυναμικά γείωσης.
- Ελαφρύτερες βάρος - σημαντικό, για παράδειγμα, στα αεροσκάφη.
- Χωρίς σπινθήρες - σημαντικοί σε εύφλεκτα ή εκρηκτικά περιβάλλοντα αερίων [18].
- Δεν ακτινοβολούν ηλεκτρομαγνητικά.
- Πολύ μικρότερο μέγεθος καλωδίου - σημαντικό όταν η διαδρομή είναι περιορισμένη, όπως η δικτύωση ενός υπάρχοντος κτιρίου, όπου μπορούν να τρυπηθούν μικρότερα κανάλια και να εξοικονομηθεί χώρος σε υπάρχοντες αγωγούς και δίσκους καλωδίων.

- Αντοχή στη διάβρωση λόγω μη μεταλλικού μέσου μετάδοσης

Τα καλώδια οπτικών ινών μπορούν να εγκατασταθούν σε κτίρια με τον ίδιο εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση καλωδίων χαλκού και ομοαξονικών, με ορισμένες τροποποιήσεις λόγω του μικρού μεγέθους και της περιορισμένης τάσης έλξης και της ακτίνας κάμψης των οπτικών καλωδίων. Τα οπτικά καλώδια μπορούν συνήθως να εγκατασταθούν σε συστήματα αγωγών σε έκταση 6000 μέτρων ή περισσότερο, ανάλογα με την κατάσταση του αγωγού, τη διάταξη του συστήματος αγωγών και την τεχνική εγκατάστασης. Μεγαλύτερα καλώδια μπορούν να τυλιχτούν σε ενδιάμεσο σημείο και να τραβηχτούν πιο μακριά στο σύστημα αγωγών, όπως απαιτείται.

## **2.10. Κυβερνητικά πρότυπα**

Προκειμένου διάφοροι κατασκευαστές να είναι σε θέση να αναπτύξουν εξαρτήματα που λειτουργούν συμβατά σε συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών, έχουν αναπτυχθεί ορισμένα πρότυπα. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών δημοσιεύει διάφορα πρότυπα σχετικά με τα χαρακτηριστικά και την απόδοση των ίδιων των ινών, συμπεριλαμβανομένων

- ITU-T G.651, "Χαρακτηριστικά πολλαπλού καλωδίου οπτικής ίνας διαβαθμισμένου δείκτη 50/125  $\mu\text{m}$ "
- ITU-T G.652 , "Χαρακτηριστικά ενός καλωδίου οπτικών ινών μίας λειτουργίας"

Άλλα πρότυπα καθορίζουν τα κριτήρια απόδοσης για τις ίνες, τους πομπούς και τους δέκτες που πρέπει να χρησιμοποιηθούν μαζί σε συστήματα συμμόρφωσης. Μερικά από αυτά τα πρότυπα είναι:

- 100 Gigabit Ethernet
- 10 Gigabit Ethernet

- Κανάλιων
- Gigabit Ethernet
- HIPPIE
- Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία
- Σύγχρονη οπτική δικτύωση
- Δίκτυο Οπτικών Μεταφορών (OTN)

Το TOSLINK είναι η πιο κοινή μορφή για ψηφιακό καλώδιο ήχου χρησιμοποιώντας πλαστική οπτική ίνα για σύνδεση ψηφιακών πηγών σε ψηφιακούς δέκτες.

## **Κεφάλαιο 3 - Τάσεις υλικών και τεχνολογίας στις οπτικές ίνες**

### **3.1.Τεχνολογίες προδιαμόρφωσης**

Η ποιότητα μιας οπτικής ίνας καθορίζεται ως επί το πλείστον από τη προδιαμόρφωσή ή προμόρφωμά (preform) της. Οι μέθοδοι κατασκευής προμορφωμάτων μπορούν να ταξινομηθούν σε καθιερωμένες μεθόδους κυρίως για εφαρμογές τηλεπικοινωνιών (όπως η μέθοδος εναπόθεσης ατμών και η τεχνική ράβδου σε σωλήνα) και σε πιο μη συμβατικές μεθόδους για ειδικές ίνες όπως στοίβα-και-έλξη, σκόνη σκόνης και γυαλί τήξης μεθόδους. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε με περισσότερες λεπτομέρειες τρεις διαφορετικές μεθόδους που ισχύουν για τους σύγχρονους τύπους ειδικών ινών. Στο τέλος οι ιδιότητες αυτών των μεθόδων συνοψίζονται και συγκρίνονται στον Πίνακα 8.

#### **3.1.1. Προετοιμασία προδιαμόρφωσης μέσω μεθόδων εναπόθεσης ατμών**

Οι μέθοδοι εναπόθεσης ατμών έχουν αποδειχθεί ότι παρέχουν πολυεπίπεδες κατασκευές με εξαιρετική ποιότητα υλικού και εξαιρετικά χαμηλή εξασθένηση (π.χ., τόσο χαμηλά όσο 0,2 dB / km). Για την προετοιμασία προμορφωμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε ίνες πυριτίας έχουν αναπτυχθεί οι ακόλουθες μέθοδοι [12–15]:

- τροποποιημένη εναπόθεση χημικών ατμών (MCVD)
- χημική εναπόθεση ατμών με ενεργοποίηση πλάσματος (PCVD)
- εξωτερική εναπόθεση ατμών (OVD)
- αξονική εναπόθεση ατμών (VAD)

Οι διεργασίες MCVD και PCVD είναι μέθοδοι εσωτερικής εναπόθεσης ατμών. Εδώ, τα στρώματα εναποτίθενται στο εσωτερικό ενός σωλήνα διοξειδίου του πυριτίου εκμεταλλευόμενοι μια διαδικασία οξείδωσης. Η χημική αντίδραση ξεκινά με έναν

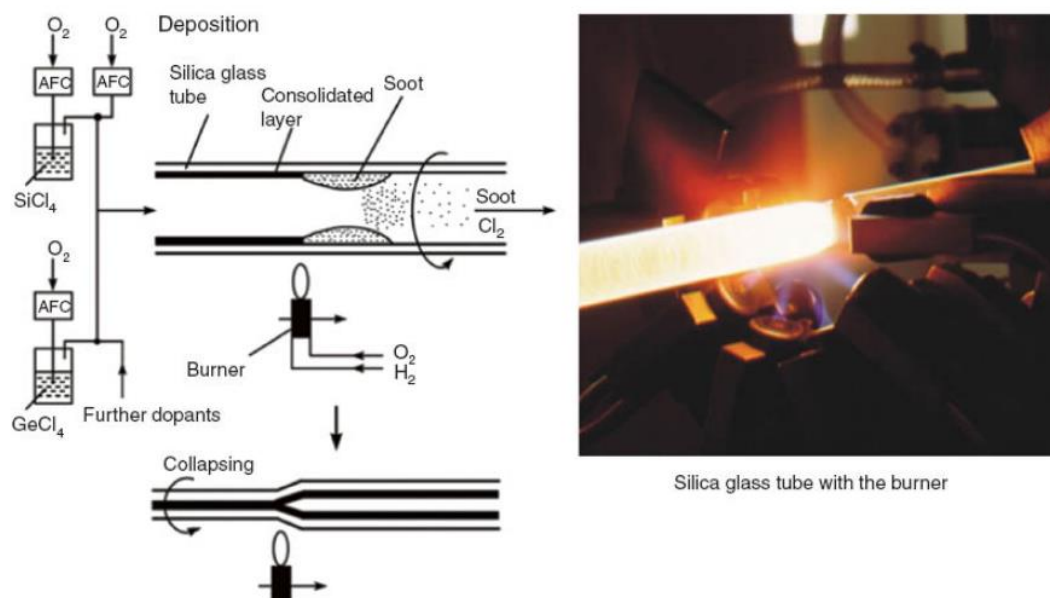


καυστήρα, ή έναν κλίβανο, στη διαδικασία MCVD και από ένα πλάσμα μικροκυμάτων στη διαδικασία PCVD. Αντιθέτως, στις διεργασίες OVD και VAD, η εναπόθεση στρώματος πραγματοποιείται στο εξωτερικό ενός περιστρεφόμενου άξονα χρησιμοποιώντας την τεχνική υδρόλυσης φλόγας. Αυτές οι μέθοδοι εναπόθεσης ατμών διαφέρουν ως προς τον ρυθμό εναπόθεσης και την απόδοση, στην ακρίβεια των προφίλ διαθλαστικού δείκτη και στην πιθανή διάσταση του προμορφώματος. Οι διαδικασίες OVD και VAD επιτρέπουν την κατασκευή πολύ μεγάλων προδιαμορφωμάτων. Στη διαδικασία PCVD, ο ρυθμός εναπόθεσης είναι χαμηλός, αλλά η εναπόθεση είναι πολύ πιο αποτελεσματική από ό, τι στις άλλες διαδικασίες.

Στην επόμενη ενότητα θα επικεντρωθούμε στην περιγραφή της τεχνολογίας MCVD ως τυπικό παράδειγμα για αυτές τις μεθόδους εναπόθεσης ατμών.

### 3.1.2. Η διαδικασία MCVD

Η τεχνολογία MCVD είναι η πιο κοινή μέθοδος κατασκευής για παθητικά και ενεργά προμορφώματα οπτικών ινών [15]. Αυτή η διαδικασία φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 7 και χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες λεπτομέρειες.



Εικόνα 3.1 Σχηματική διαδικασία MCVD [25].

Τα αλογονίδια παρασύρονται σε ένα ρεύμα αερίου σε ελεγχόμενες ποσότητες είτε με πέρασμα ενός αερίου φορέα όπως το οξυγόνο ( $O_2$ ) μέσω υγρών πηγών προσμίξεως είτε χρησιμοποιώντας αέριες ενώσεις.

Αυτές οι ενώσεις αλογονιδίου υψηλής καθαρότητας (όπως  $SiCl_4$ ,  $GeCl_4$ ,  $POCl_3$ ,  $BBR_3$ ,  $bcl_3$ ,  $SIF_4$ ,  $SF_6$ ) έχουν υψηλές πιέσεις ατμών σε θερμοκρασία δωματίου. Το αέριο μίγμα διέρχεται μέσω ενός περιστρεφόμενου σωλήνα από γυαλί χαλαζία και οξειδώνεται στη θερμή ζώνη ενός υδρογόνου / οξυγόνου ( $H_2 / O_2$ ) του καυστήρα από το εξωτερικό σε μία θερμοκρασία περίπου  $1800^\circ C$ .

Τα (ενισχυμένα)  $SiO_2$  σωματίδια εναποτίθενται με τη μορφή λεπτής αιθάλης στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα ακριβώς μπροστά από τον καυστήρα (θερμοφορητική εναπόθεση). Αυτή η αιθάλη στη συνέχεια ενοποιείται σε ένα διαυγές γυάλινο στρώμα χρησιμοποιώντας έναν κινούμενο καυστήρα. Ο καυστήρας συνεχώς μετατοπίζεται μπρος πίσω κατά μήκος του μήκους του σωλήνα, και οι στιβάδες σταδιακά εναποτίθενται, οι πρώτες στρώσεις επένδυσης σε ένα δείκτη διαθλάσεως  $SiO_2$  ή χαμηλότερα και τα ακόλουθα στρώματα πυρήνα σε ένα δείκτη διαθλάσεως υψηλότερο.

Τέλος, ο σωλήνας συμπύσσεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες άνω των  $2000^\circ C$  σε διάφορα βήματα κάτω ατμόσφαιρα χλώριου ( $Cl_2$ ) σε μία κυλινδρική ράβδο (προδιαμόρφωσης). Εάν είναι απαραίτητο, αυτό το πρωτεύον προσχηματισμένο κάλυμμα διαθέτει έναν επιπλέον γυάλινο σωλήνα χαλαζία για να επιτευχθεί καθορισμένη αναλογία πυρήνα προς επένδυση και στη συνέχεια να τραβηχτεί σε μια ίνα.

Το πάχος των αποτιθέμενων στρωμάτων μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ  $5\ \mu m$  και  $100\ \mu m$  ως συνάρτηση του ρυθμού ροής  $SiCl_4$ . Η ποσότητα των προσμείξεων και η αντίστοιχη μεταβολή του δείκτη διάθλασης ( $\Delta n$ ) προσδιορίζονται από τον ρυθμό ροής των αλογονιδίων προσβολής. Οι προσμείξεις όπως το γερμάνιο (Ge) και ο φώσφορος (P) αυξάνονται, ενώ οι προσμείξεις όπως το βόριο (B) και το φθόριο (F) μειώνονται, ο δείκτης διάθλασης του πυριτίου.

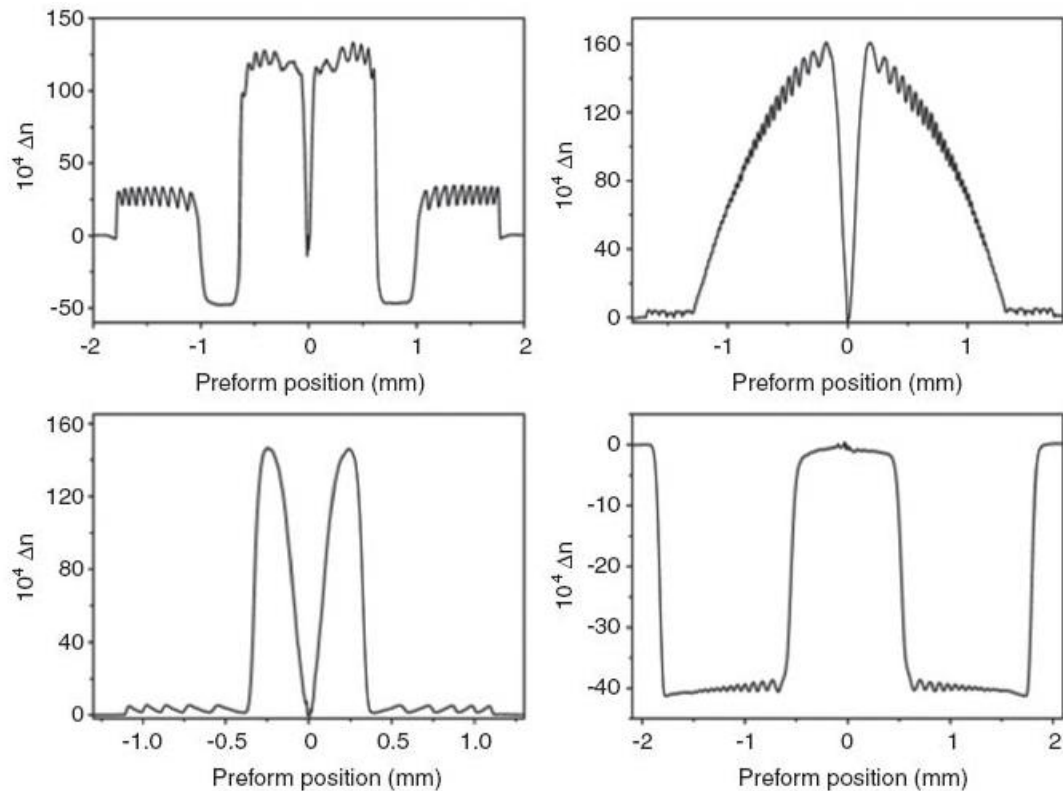
Μεταβάλλοντας τα μέσα πρόσμιξης και τις συγκεντρώσεις τους, είναι δυνατό να ληφθούν καλά καθορισμένα προφίλ διαθλαστικού δείκτη (δείκτης βημάτων ή βαθμολογημένος δείκτης) για ιδιότητες πολλαπλασιασμού μονής ή πολλαπλής λειτουργίας.

Κατά τη διαδικασία υψηλής θερμοκρασίας, η ενσωμάτωση προσμείξεων διοξειδίου του πυριτίου προσδιορίζεται και επηρεάζεται σημαντικά από:

- θερμοδυναμική ισορροπίας (όπως για την ενσωμάτωση Ge, F και P [15, 16])
- εξάτμιση των προσμείξεων μέσω σχηματισμού κατώτερου οξειδίου ( $\text{GeO}$ ,  $\text{PO}_2$ ,  $\text{BO}_2$  ...) και στην περίπτωση επικάλυψης φθορίου σε μεγάλο βαθμό μέσω σχηματισμού  $\text{SiF}_4$  κατά τη διαδικασία εναπόθεσης και κατάρρευσης
- ισχυρή αλληλεπίδραση των προσμείξεων με φθόριο υπό σχηματισμό πτητικών συστατικών φθορίου (όπως  $\text{GeF}_4$ ,  $\text{BF}_3$  ... [17])
- διαδικασίες διάχυσης

Τα προφίλ του πραγματικού δείκτη συγκέντρωσης και διάθλασης στις προδιαμορφώσεις και τις ίνες είναι πάντα προφίλ επηρεασμένα από τη διάχυση. Επομένως, υπό την επίδραση της διαδικασίας κατάρρευσης υψηλής θερμοκρασίας ( $2000^\circ\text{C}$  -  $2300^\circ\text{C}$ ), η εξάτμιση υποστηρίζεται από έναν υψηλό ρυθμό διάχυσης που λαμβάνει χώρα ακόμη και σε ενοποιημένα στρώματα, οδηγώντας στο γνωστό "βουτιά" στο κέντρο του προμορφώματος. Η γνώση των συντελεστών διάχυσης των προσμείξεων είναι σημαντική για την κατανόηση και βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Επομένως, σε διάστημα αρκετών ετών η συμπεριφορά διάχυσης διαφορετικών προσμείξεων (όπως OH, Cl, F [18], P [19], Ge [20], B [21]) σε διοξείδιο του πυριτίου ανάλογα με τη θερμοκρασία ( $1600^\circ\text{C}$  Εξετάστηκε η συγκέντρωση  $\text{C-}2000^\circ\text{C}$ ) και η συγκέντρωση προσμείξεων.

Η διαδικασία MCVD είναι μια εξαιρετικά ευέλικτη τεχνική για την εφαρμογή ποικίλων ινών δομών και συνθέσεων, αλλά προκαλεί διαταραχές λόγω της φύσης της διαδικασίας. Η Εικόνα 3.2 δείχνει τυπικά προφίλ διαθλαστικού δείκτη για διαφορετικά είδη παθητικών προμορφωμάτων.



**Εικόνα 3.2 Τυπικά προφίλ διαθλαστικών δεικτών παρασκευασμένων παθητικών προμορφωμάτων μέσω της διαδικασίας MCVD [25].**

### 3.1.3. Επικάλυψη διαλύματος για ενσωμάτωση σπάνιων γαιών και αλουμινίου

Οι δομές παθητικών ινών που αναφέρονται παραπάνω χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές επικοινωνίας ινών και αισθητήρων ινών [13]. Για συσκευές ενεργών ινών όπως λέιζερ ινών και ενισχυτές ινών, απαιτούνται ίνες με σπάνια γαία (RE). Εδώ, ο πυρήνας των ινών είναι καλυμένος με ιόντα RE [όπως το νεοδύμιο (Nd), το υττέρβιο (Yb), το erbium (Er) ή το thulium (Tm)]. Ωστόσο, η επιλογή ενσωμάτωσης αυτών των ιόντων RE στο διοξείδιο του πυριτίου είναι περιορισμένη και είναι δύσκολο να επιτευχθεί υψηλό επίπεδο επικάλυψης τέτοιων ιόντων. Προσθέτοντας κωδικοποιητές όπως αλουμίνιο (Al) ή / και φωσφόρο (P), η διαλυτότητα των ιόντων RE στο διοξείδιο του πυριτίου μπορεί να βελτιωθεί και έτσι η περιεκτικότητα σε RE αυξάνεται χωρίς διαχωρισμό φάσεων και κρυστάλλωση.

Σε αντίθεση με το διοξείδιο του πυριτίου και τα κοινά προσμείγματα Ge, P, B, και F, δεν υπάρχουν πτητικές πρόδρομες ενώσεις για RE προσμίξεις και το πιο σημαντικό

κωδικοποιητικό Al μπορεί να εξατμιστεί σε ή λίγο πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου. Επομένως, ως μία επιλογή, παρέχονται μέσω υγρής φάσης. Αυτή η μέθοδος, η λεγόμενη λύση επικάλυψης, σε συνδυασμό με την κοινή διαδικασία MCVD, είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και επιτυχημένη τεχνική [22]. Η ενεργή απόθεση πυρήνα επιτυγχάνεται με τον ακόλουθο τρόπο.

Μετά την προετοιμασία ενός εσωτερικού στρώματος σωλήνα, το οποίο δεν είναι πλήρως ενοποιημένο κατά τη διάρκεια της διόδου καυστήρα MCVD, το πορώδες στρώμα εμποτίζεται με ένα υδατικό ή αλκοολικό διάλυμα αλάτων RE και Al (καλά διαλυτά χλωρίδια ή νιτρικά) και ξηραίνεται. Τα στερεά άλατα παραμένουν στην πορώδη δομή διοξειδίου του πυριτίου. Κατά τις επόμενες κατεργασίες υψηλής θερμοκρασίας, το διοξείδιο του πυριτίου ενοποιείται σε ένα συντηγμένο υαλώδες στρώμα και τα άλατα μετατρέπονται σε οξείδια RE και Al και ενσωματώνονται στη μήτρα πυριτίας. Η ποσότητα των ενσωματωμένων Al και RE προσδιορίζεται από τη σχετική πυκνότητα του πορώδους στρώματος και τη συγκέντρωση του διαλύματος των Al και REs [23]. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ ευέλικτη και επιτρέπει την ενσωμάτωση όλων των στοιχείων RE.

Οι κωδικοποιητές επηρεάζουν τόσο τη διαδικασία παρασκευής όσο και τις ιδιότητες των ινών με πολλαπλό και περίπλοκο τρόπο. Έτσι, οι κωδικοποιητές επηρεάζουν την ενσωμάτωση και διάχυση του RE, το προφίλ διαθλαστικού δείκτη και την απολύμανση γυαλιού, τις ιδιότητες λείζερ και τις απώλειες οπτικού υποβάθρου των ινών. Οι διαδικασίες διάχυσης κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας καθορίζουν την κατανομή του δείκτη διάθλασης, τη γεωμετρία και το αριθμητικό άνοιγμα του πυρήνα του προμορφώματος. Η γνώση αυτών των ισχυρών αλληλεπιδράσεων μεταξύ RE και codopants είναι πολύ σημαντική για την επιτυχή κατασκευή καθορισμένων συνθέσεων πυρήνα ινών για ίνες λείζερ υψηλής απόδοσης. Εδώ και χρόνια, η επίδραση των κωδικοποιητών σε διάφορες πτυχές όπως τα ακόλουθα έχει διερευνηθεί εντατικά:

- συμπεριφορά διάχυσης των ιόντων RE [24]
- διανομές συγκέντρωσης και διαθλαστικού δείκτη [9]
- ιδιότητες απορρόφησης και εκπομπής από υπεριώδη ακτινοβολία έως NIR [5]
- φωτοπροσαρμογή [3]

Με βάση αυτές τις έρευνες, η διαδικασία εναπόθεσης και η σύνθεση του πυρήνα έχουν βελτιστοποιηθεί για την κατασκευή ενεργών ινών μονής ή χαμηλής λειτουργίας με χαμηλή απώλεια φόντου, υψηλή απόδοση, αξιοπιστία και ποιότητα δέσμης που θα χρησιμοποιηθεί στο εύρος μήκους κύματος 1  $\mu\text{m}$  – 2  $\mu\text{m}$ . Στον Πίνακα 5 συνοψίζονται διάφοροι τύποι ινών με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο RE (με ιόντα RE, κωδικοποιητές, μήκος κύματος εκπομπής) που παρασκευάζονται χρησιμοποιώντας την τεχνική επικάλυψης MCVD / διαλύματος.

Ιόντα RE	Κωδικοποιητές	Μήκος κύματος εκπομπών ( $\mu\text{m}$ )
Nd <sup>3+</sup>	Στο	1.0–1.1
Yb <sup>3+</sup>	Στο	
	Al, P	1.0–1.1
	Al, Tσε	
Er <sup>3+</sup>	Al, Ge	1.5–1.6
Er <sup>3+</sup> / Yb <sup>3+</sup>	P, Al	1.5–1.6
Tm <sup>3+</sup>		
Xo <sup>3+</sup>	Στο	1.7–2.1
Tm <sup>3+</sup> / Ho <sup>3+</sup>		

**Πίνακας 3.1 Τύποι ινών με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο RE-doped.**

Οι ίνες αργιλοπυριτικού υττέρβιο, Ce-doped διακρίνονται από τη χαμηλή φωτοπροστασία και την υψηλή σταθερότητα ισχύος Η ισχύς εξόδου στην περιοχή πολλαπλών kW έχει ήδη αποδειχθεί με επιτυχία [2].

### **3.1.4. Επικάλυψη φάσης αερίου για ενσωμάτωση RE και αλουμινίου**

Η τεχνολογία επικάλυψης MCVD / διαλύματος έχει αρκετούς περιορισμούς σχετικά με τη γεωμετρία, την ομοιογένεια της επικάλυψης και του δείκτη διάθλασης και την ενσωμάτωση πολύ υψηλών συγκεντρώσεων RE και Al (άνω των 2 mol% RE 2 O 3 και 7 mol% Al 2 O 3).

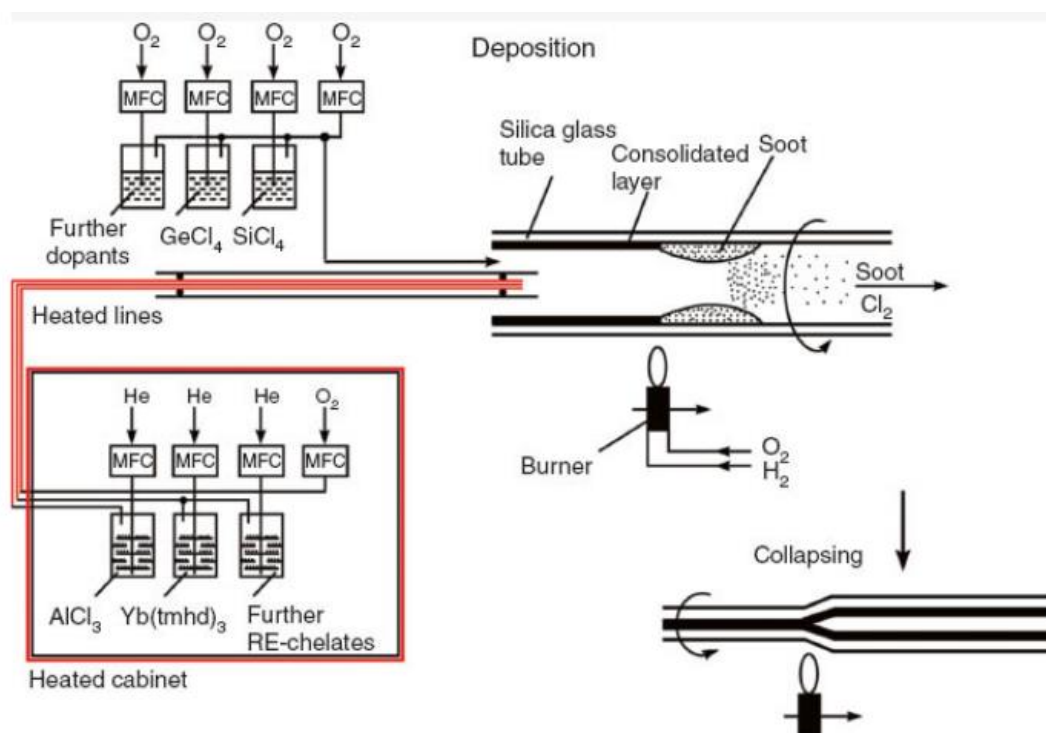
Για παράδειγμα, αυτή η τεχνική επιτρέπει μόνο την απόθεση πυρήνων που έχουν εξαιρετική οπτική ποιότητα έως και διάμετρο περίπου 1,5-2 mm. Η εφαρμογή μεγάλων λόγων πυρήνα / επένδυσης είναι επίσης περιορισμένη. Επομένως, αναπτύσσονται νέες τεχνικές για να καταστεί δυνατή η εναπόθεση RE και Al στη φάση αερίου της διαδικασίας MCVD και τελικά να ξεπεραστούν οι περιορισμοί στη γεωμετρία και την ομοιογένεια. Για το σκοπό αυτό, στερεά πρόδρομα μεταλλικών οργανικών συμπλοκών του RE [όπως RE- (τετραμεθυλοεπτανοδιονικό) και Al (όπως Al- (acetylacetonate)  $3$ ] ή χλωριούχο Al (AlO  $3$ ) μετατρέπονται σε αέρια φάση μέσω εξάτμισης υψηλής θερμοκρασίας, όπως αναφέρεται για πρώτη φορά το 1990 από τους Tumminelli et al. [16]. Η λεγόμενη MCVD / χημική σε χωνευτή τεχνική αναπτύχθηκε στο Κέντρο Ερευνών Οπτικοηλεκτρονικής (Πανεπιστήμιο του Southampton) [7].

Εδώ, η εξάτμιση των προδρόμων διεξάγεται σε ένα ηλεκτρικά θερμαινόμενο χωνευτήριο απευθείας μέσα στον σωλήνα επεξεργασίας υάλου χαλαζία μετά από εναπόθεση μαζί με σίλικά και κοινά μέσα. Το πλεονέκτημα αυτής της ρύθμισης είναι η στενή απόσταση της εξάτμισης του προδρόμου RE και της ζώνης αντίδρασης: οι γραμμές παροχής προδρόμων δεν είναι απαραίτητες, ούτε παρουσιάζονται προβλήματα με τη συμπύκνωση των προδρόμων μέσα στις γραμμές. Ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να παραχθούν καθορισμένα μίγματα ατμών πολλών προδρόμων (π.χ. ο συνδυασμός Al και Yb) λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιών εξάτμισης. Αντί αυτής της μεθόδου, η παράδοση των αερίων προδρόμων γίνεται από εξωτερικές χημικές πηγές. Αυτό το σύστημα ατμών διατίθεται στο εμπόριο και χρησιμοποιείται επιτυχώς σε ορισμένες εγκαταστάσεις [8] για την προετοιμασία προμορφωμάτων ενεργών ιόνων.

Η τελευταία περιγραφείσα διαδικασία επικάλυψης αερίου φάσης για τα στρώματα ενεργού πυρήνα (περιγράφεται εδώ για επικάλυψη Yb και Al) φαίνεται στο Σχήμα 9 και χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα στάδια: Τα στερεά υλικά έναρξης, τα οποία τοποθετούνται σε διάφορες πλάκες σε ξεχωριστούς εξατμιστές, είναι εξατμισμένο (διεξάγεται σε ένα ντουλάπι) σε θερμοκρασίες από 130 έως 14 ° C για AlO  $3$  και 190-200 ° C για Yb- (tetramethylheptanedionate)  $3$  [Yb (TMHD)  $3$ ], αντίστοιχα, για να επιτευχθεί μια αποδεκτή τάση ατμών.

Οι πρόδρομοι αέριας ουσίας παραδίδεται μαζί με το ήλιο φέρον αέριο (He) και επιπλέον οξυγόνο (O  $2$ ) χωριστά διαμέσου θερμαινόμενων γραμμών στο εσωτερικό του σωλήνα επεξεργασίας γυαλιού χαλαζία και αναμιγνύεται εκεί με τα άλλα κοινά αέρια αλογονίδια (όπως SiCl $4$ , GeCl $4$ , POCl $3$ ...). Για να αποφευχθεί η συμπύκνωση των

προδρόμων μέσα στις γραμμές, το περίβλημα και όλες οι γραμμές (από την εξάτμιση έως την έγχυση στον γυάλινο σωλήνα χαλαζία) πρέπει να θερμανθούν πάνω από τις θερμοκρασίες εξάτμισης περίπου 200 ° C. Η εναπόθεση, η ενοποίηση και η κατάρρευση στο προσχηματισμό πραγματοποιούνται με τον συνήθη τρόπο όπως περιγράφεται λεπτομερώς στην παρακάτω.

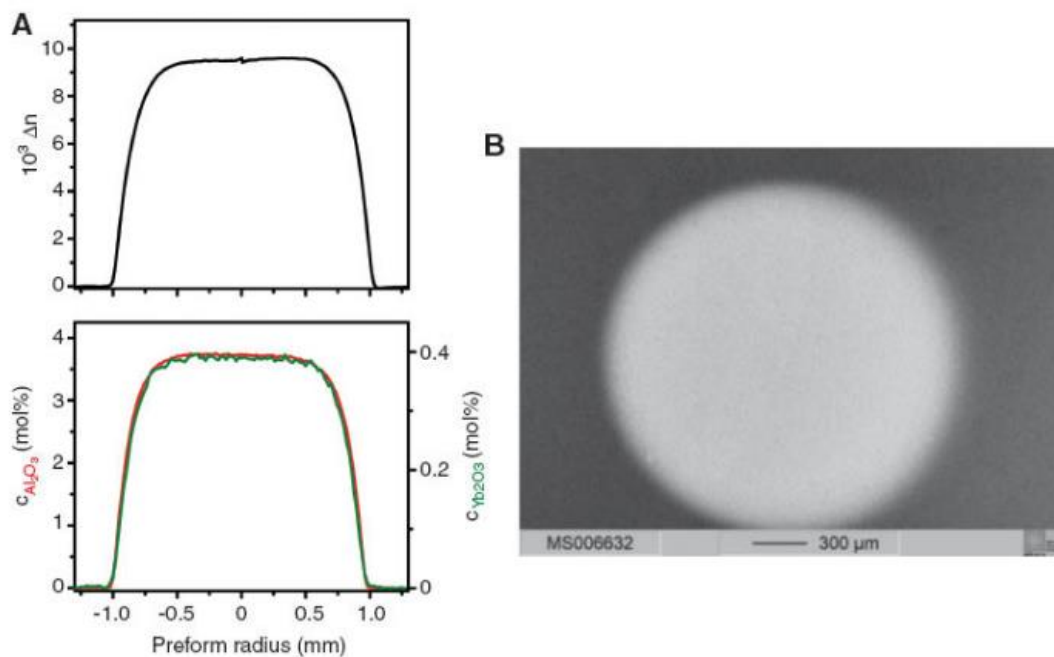


**Εικόνα 3.3 Σχηματικό της διαδικασίας MCVD σε συνδυασμό με επικάλυψη φάσης αερίου για RE και Al [25].**

Η ενσωμάτωση των προσμείξεων Yb και Al εξαρτάται από τις παραμέτρους της διαδικασίας (όπως θερμοκρασίες εξάτμισης, ροές αερίων, συνθήκες κατάρρευσης). Σε σύγκριση με τη μέθοδο επικάλυψης MCVD / διαλύματος, είναι δυνατό να παρασκευαστούν αποτελεσματικά μεγάλοι πυρήνες μέσω της συνεχούς εναπόθεσης πολλών στρωμάτων. Ωστόσο, προς το παρόν είναι δύσκολο να ενσωματωθούν όλα τα στοιχεία RE με επαρκή συγκέντρωση λόγω της απουσίας κατάλληλων προδρόμων (όπως για το Ce). Επιπλέον, αυτές οι τεχνικές αέριας φάσης είναι λιγότερο καθιερωμένες και διερευνημένες σε σύγκριση με τη μέθοδο επικάλυψης MCVD / διαλύματος λόγω του κρίσιμου ελέγχου της διαδικασίας.



Στην διεθνή βιβλιογραφία έχουν γίνει έρευνες για την ενσωμάτωση των Yb και Al. Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, παρασκευάστηκαν προσχηματισμοί και ίνες σύμφωνα με τις παραμέτρους της διαδικασίας (όπως θερμοκρασίες εξάτμισης, ροές αερίου, συνθήκες κατάρρευσης) σε ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων Yb και Al με αποτέλεσμα διάμετρο πυρήνα προμορφώματος περίπου 2 mm. Τα παρασκευασμένα δείγματα δείχνουν μια εξαιρετική ακτινωτή ομοιομορφία σχετικά με τον δείκτη διάθλασης και την κατανομή της συγκέντρωσης προσμείξεων (βλέπε σχήμα 10α). Η διατομή του πυρήνα προμορφώματος απεικονίζεται στην εικόνα 3.4. Η εικόνα λήφθηκε χρησιμοποιώντας ηλεκτρόνια backscatter, στην οποία η φωτεινότερη περιοχή δίνει μια οπτική εντύπωση του Yb, Al-doped πυρήνα. Σε αντίθεση με τη διαδικασία επικάλυψης MCVD / διάλυμα, ένα πολύ υψηλό επίπεδο επικάλυψης Al έως περίπου 16 mol% Al 2 O 3 είχε ήδη επιτευχθεί με καλή ομοιομορφία του δείκτη διάθλασης και ρυπαίνουσας κατανομή συγκέντρωσης [38, 40].



**Εικόνα 3.4** Ακτινικός διαθλαστικός δείκτης και προφίλ συγκέντρωσης ενός Yb, Al-doped silica preform (A) και διατομής ενός προμορφωμένου πυρήνα που φαίνεται από οπίσθια διάσπαρτα ηλεκτρόνια (B) [25].

Οι ιδιότητες απορρόφησης και εκπομπής που διερευνήθηκαν στην περιοχή UV / VIS / NIR είναι συγκρίσιμες με τις προδιαμορφώσεις και τις ίνες που κατασκευάζονται

χρησιμοποιώντας την τεχνική επικάλυψης MCVD / διαλύματος. Τα πειράματα με λέιζερ έχουν δείξει ιδιότητες λέιζερ ινών με εξαιρετική απόδοση κλίσης 80% και ισχύ εξόδου περίπου 200 W συγκρίσιμη με τις ίνες που παρασκευάζονται με χρήση επικάλυψης MCVD / διαλύματος και την τεχνική REPUSIL [21].

Οι παρασκευασμένες ίνες Yb, Al-doped δεν έχουν ακόμη βελτιστοποιηθεί όσον αφορά την ελαχιστοποίηση των απωλειών που προκαλούνται από την αντλία (δράση φωτοπροβολής). Επομένως, διερευνάται η ενσωμάτωση του Yb μαζί με τα P και Al προκειμένου να παραχθούν ίνες χαμηλού NA με χαμηλή φωτοπροσαρμογή συγκρίσιμη με τις ίνες που παρασκευάζονται χρησιμοποιώντας επικάλυψη MCVD / διαλύματος [21]. Εντατικές έρευνες, σχετικά με την κωδικοποίηση Al / P, είχαν ήδη πραγματοποιηθεί από τους Bubnov et al. [18]. Άλλα ερευνητικά έργα επικεντρώνονται επίσης στην εναπόθεση μεγαλύτερων πυρήνων προμορφώματος (διάμετρος > 3 mm) που έχουν ήδη επιτευχθεί [1].

### **3.1.5. Μέθοδοι πυροσυσσωμάτωσης σε σκόνη για την παρασκευή προδιαμορφωμένων υλικών οπτικών ινών**

Οι διεργασίες MCVD και άλλες φάσεις αερίου μπορούν να παράγουν ενισχυμένα γυαλιά διοξειδίου του πυριτίου με εξαιρετικές ιδιότητες σε σχέση με την καθαρότητα, τον τύπο προσμίξεων και το επίπεδο προσμίξεων. Τέτοιες τεχνολογίες προετοιμασίας με βάση το στρώμα υποφέρουν, ωστόσο, από θεμελιώδεις περιορισμούς στην εφαρμογή ομοιογενών υλικών όγκου. Πρόσφατα, αναπτύχθηκε μια νέα τεχνολογία για την παρασκευή αναμειγμένων γυαλιών με βάση τη μέθοδο σύντηξης σκόνης σε συνεργασία με την εταιρεία Heraeus Quarzglas [4].

Αυτή η μέθοδος παρασκευής, η λεγόμενη διαδικασία REPUSIL, μπορεί να θεωρηθεί ως τροποποίηση της διαδικασίας επικάλυψης διαλύματος για την παραγωγή της στιβάδας πυριτίας με πρόσμιξη Al / RE για προμορφώματα ινών. Ωστόσο, η διαδικασία επικάλυψης και καθαρισμού επιτυγχάνεται έξω από το σωλήνα πυριτίας χρησιμοποιώντας ένα στάδιο εναιώρησης- επικάλυψης.

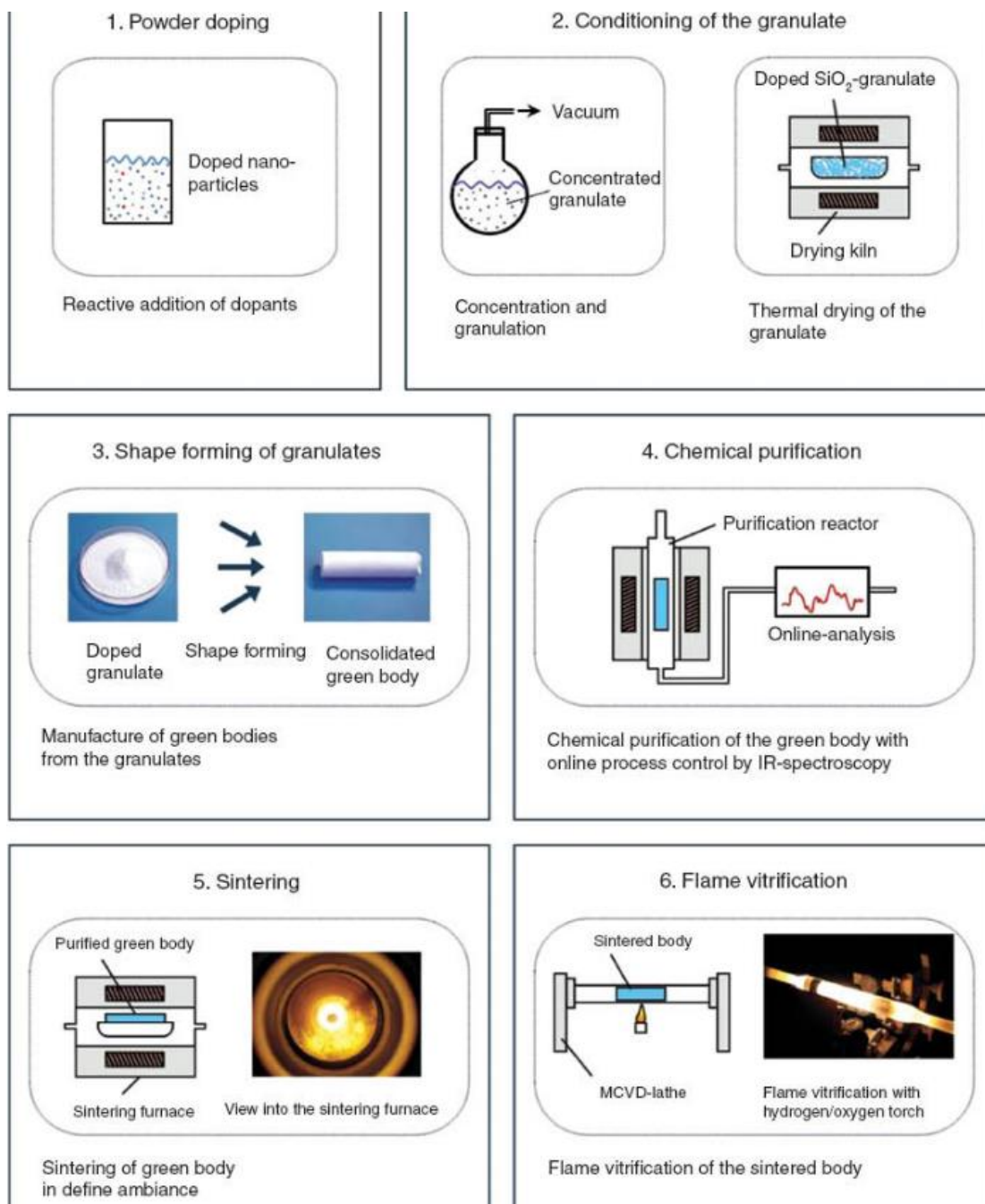
Λόγω αυτού του εξωτερικού βήματος, μπορούν να παραχθούν μεγαλύτερες ποσότητες διοξειδίου του πυριτίου ομοιόμορφα. Τα αρχικά υλικά για τη διαδικασία REPUSIL είναι νανοσωματίδια διοξειδίου του πυριτίου που σχηματίζονται με αέριο υψηλής

καθαρότητας και υδατοδιαλυτές ενώσεις των συστατικών επικάλυψης, π.χ.  $\text{AlCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ , RE χλωρίδια και τετρα βορικό αμμώνιο. Οι καθορισμένες ποσότητες του διαλύματος επικάλυψης αναμιγνύονται σε ένα εναιώρημα διοξειδίου του πυριτίου υπό ελεγχόμενη ρύθμιση της τιμής του pH.

Ως αποτέλεσμα, τα ιόντα επικάλυψης καταβυθίζονται ως καθαρά μεταλλικά μίγματα υδροξειδίων στην επιφάνεια και στους πόρους που συνδέονται εγγενώς με τα αιωρούμενα σωματίδια διοξειδίου του πυριτίου. Μετά την ξήρανση του επικαλυμμένου διαλύματος, παράγεται ένα χυτεύσιμο κοκκώδες υλικό με τη βοήθεια ισοστατικής πίεσης κυρίως σε κυλινδρικά σχήματα. Στη συνέχεια, αυτό το πορώδες πράσινο σώμα καθαρίζεται με χλώριο σε υψηλές θερμοκρασίες για την απομάκρυνση ακαθαρσιών από πρώτες ύλες όπως σίδηρος, άλλα τρισιδιάστατα στοιχεία και, το πιο σημαντικό, κολλημένο νερό.

Αυτοί οι πρόδρομοι καθαρισμένου γυαλιού τροφοδοτούνται σε έναν κατάλληλο συντηγμένο σωλήνα πυριτίας.

Η διαδικασία σύντηξης και υαλοποίησης πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες έως  $2200^\circ\text{C}$  και ελέγχεται από διαφορετικές προσαρμοσμένες διαδρομές ενός καυστήρα οξυγόνου. Ένας ηλεκτρικός φούρνος με πολύ μικρή ζώνη θέρμανσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για αυτό το βήμα της διαδικασίας. Η εικόνα 3.5 δείχνει ένα σχήμα της περιγραφόμενης διαδικασίας.



**Εικόνα 3.5 Σχηματικό της διαδικασίας REPUSIL [25].**

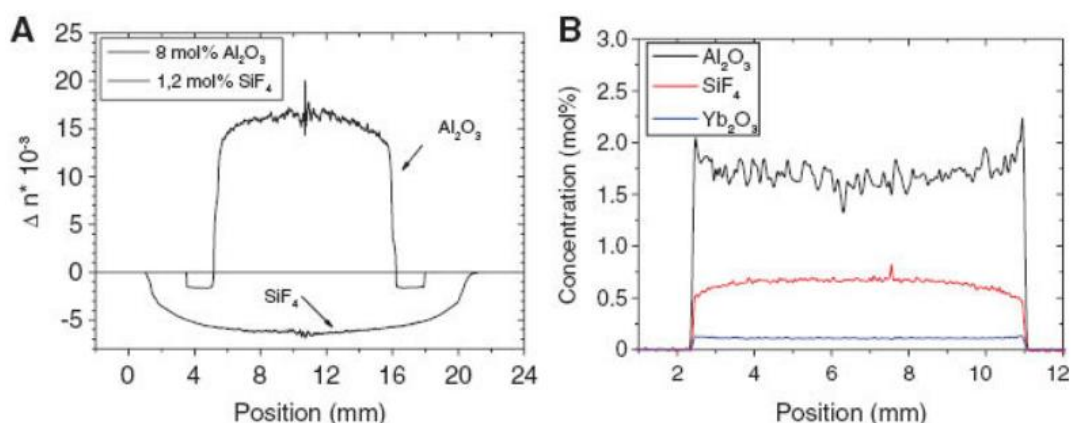
Πολλές τροποποιήσεις είναι διαθέσιμες για αυτήν τη διαδικασία. Το παρασκευασμένο γυαλί μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την παραγωγή ινών, ή ο αγωγός πυρίτου που δεν έχει υποστεί επικάλυψη μπορεί να αφαιρεθεί με άλεση. Επίσης, το καθαρό γυαλί με επικάλυψη διατίθεται ως ράβδοι για τεχνολογία στοίβας και σχεδίασης για προδιαμορφωμένες ίνες μικροδομής. Η ιδέα της τεχνολογίας σύντηξης σκόνης έχει επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παροχή γυαλιών με φθόριο (μειωμένος δείκτης

διάθλασης) καθώς είναι δύσκολο να ενσωματωθούν μεγαλύτερες ποσότητες φθορίου ομοιογενώς μέσω της κλασικής διαδικασίας επικάλυψης διαλύματος MCVD.

Εδώ, παρατηρήθηκαν μεγάλες απώλειες στο φθόριο με διάχυση και εξάτμιση κατά τη διάρκεια του σταδίου υψηλής θερμοκρασίας. Ο έλεγχος της ενσωμάτωσης φθορίου σε γυαλιά αλουμίνας και κωδικοποίησης RE επιτρέπει νέες εφαρμογές οπτικών ινών, ειδικά στην ανάπτυξη λέιζερ ινών μεγάλου πυρήνα με την υψηλότερη φωτεινότητα.

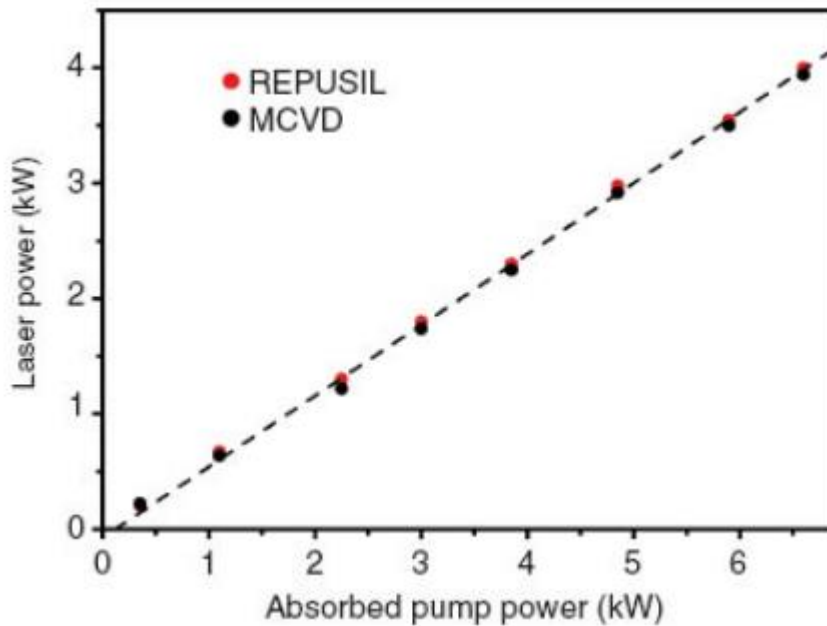
Η εικόνα 3.6Α δείχνει το προφίλ του δείκτη διάθλασης ενός καθαρού Al και SiF<sub>4</sub> γυαλί χύμα, ενώ η εικόνα 3.6B απεικονίζει, ως παράδειγμα, τα προφίλ συγκέντρωσης της Al / Yb χύμα γυαλί με φθόριο ενσωματώνεται. Προς το παρόν, μπορούν να επιτευχθούν οι ακόλουθες παράμετροι για γυαλιά πυριτίας με επικάλυψη υψηλής καθαρότητας μετά τη διαδικασία REPUSIL:

- περιεκτικότητα σε αλουμίνη: 0-8 mol%
- περιεκτικότητα σε οξείδιο RE σε συνδυασμό με οξείδιο αργιλίου: 0-0,6 mol%
- περιεκτικότητα σε οξείδιο του βορίου σε συνδυασμό με οξείδιο του αργιλίου και οξείδιο του RE: 0-10 mol%
- καλύτερη εξασθένηση (απώλεια ινών) στο Al-Yb με πρόσμιξη στα 1200 nm: 15 dB / km.
- περιεκτικότητα σε φθόριο (ως mol% SiF<sub>4</sub>): 2,0 mol% SiF<sub>4</sub> σε καθαρή síλικά, 1,8 mol% SiF<sub>4</sub> σε Al / RE
- διοξείδιο του πυριτίου



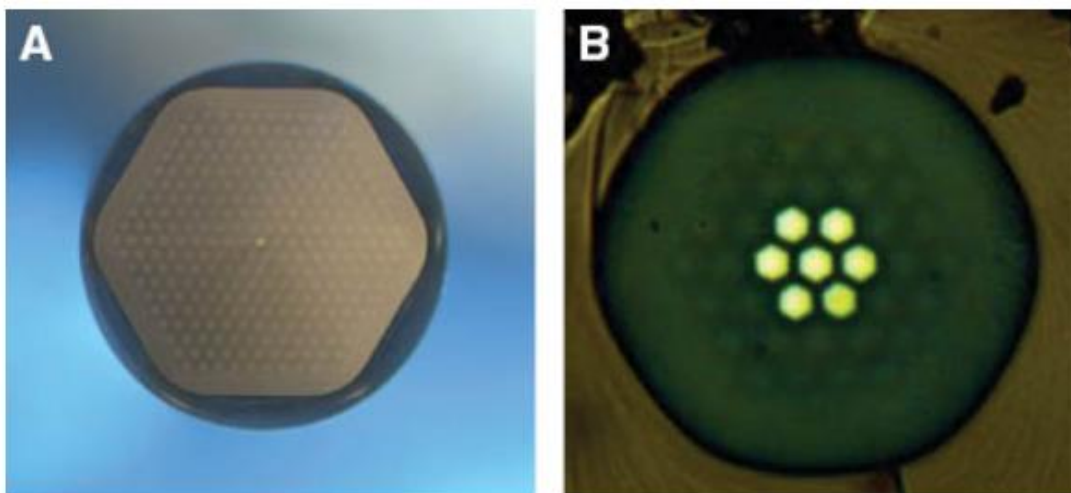
**Εικόνα 3.6** Εμφανίζεται το προφίλ δεικτών δύο διαφορετικών επικαλυμμένων χύδην υλικών: τα τρέχοντα όρια στα υλικά υψηλού δείκτη REPUSIL ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  doped) και τα χαμηλού δείκτη υλικά REPUSIL (φθοριούχος επικάλυψη) εμφανίζονται (A), το προφίλ συγκέντρωσης (WDX) του επικαλυμμένου υλικού (B) [25].

Η διαδικασία REPUSIL έχει αποδειχθεί ότι παρέχει παρόμοια αποτελεσματικότητα λείξερ ινών με ίνες που παράγονται από την τεχνολογία επικάλυψης MCVD / διαλύματος (εικόνα 3.7). Η δυνατότητα παραγωγής μεγαλύτερων πυρήνων ινών με τη διαδικασία REPUSIL σε συνδυασμό με πολύ ομοιόμορφα προφίλ δείκτη διάθλασης θα επιτρέψει περαιτέρω κλιμάκωση ισχύος.



**Εικόνα 3.7** Χαρακτηριστικό λέιζερ ινών Yb, αλουμινοπυριτικές ίνες με Ce-doped που παρασκευάζονται με χρήση επικάλυψης MCVD / διαλύματος και της τεχνικής REPUSIL. (Μετρήθηκε από τον G. Rahmann, Laserline GmbH) [25].

Για μελλοντικές έρευνες, η ενσωμάτωση του οξειδίου του φωσφόρου σε συνδυασμό με τα οξείδια αλουμίνας και RE είναι ενδιαφέρουσα. Το διοξείδιο του πυριτίου με φώσφορο είναι ένα πολύ κατάλληλο βασικό υλικό για εφαρμογές λέιζερ ινών υψηλής ισχύος. Αυτοί οι τύποι γυαλιών δείχνουν τις χαμηλότερες τιμές φωτοπροώθησης στα λέιζερ ινών με προσθήκη Yb. Στην περίπτωση γραμμομοριακής αναλογίας A / P 1, δεν μπορεί να παρατηρηθεί αλλαγή στον δείκτη διάθλασης για διαφορετικές ποσότητες AI / P. Οι εξαιρετικές ιδιότητες αυτού του συνδυασμού προσμείξεων καθιστούν δυνατή την εφαρμογή σχεδίων ινών LMA με ένα εξαιρετικά χαμηλό δείκτη για την καλύτερη απόδοση σε λέιζερ ινών.



**Εικόνα 3.8** Ίνες εξαιρετικά μεγάλης περιοχής λειτουργίας (X-LMA) με πυρήνα 50  $\mu\text{m}$  και εξωτερική διάμετρο 1,2 mm (A), πολυπύρηνες ίνες για βελτιστοποίηση απορρόφησης αντλίας (B) [25].

### 3.2. Προετοιμασία προδιαμόρφωσης με τεχνολογία χωνευτή τήξης

Για να παρέχεται μια μεγάλη ποικιλία υάλινων υλικών με διαφορετικές ιδιότητες, πρέπει επίσης να εφαρμοστούν κλασικές τεχνολογίες τήξης. Οι τεχνολογίες σύντηξης MCVD και σκόνης που αναφέρονται παραπάνω δεν ισχύουν για όλους τους τύπους γυαλιών.

Εκτός από την απλή κατασκευή, τα σημαντικά πλεονεκτήματα μιας τεχνολογίας χωνευτή τήξης έναντι των διεργασιών MCVD και REPUSIL περιλαμβάνουν την εφαρμογή υψηλού περιεχομένου προσμείξεων σε λιωμένο γυαλί, μια εύκολη κλίμακα όγκου και την καλή ποιότητα οπτικού γυαλιού ως συνέπεια της υψηλής ομοιογένειας τήξης. Με βάση την τεχνολογία χωνευτή τήξης, οι πιθανές συνθέσεις από γυαλιά υψηλής πυριτίας μπορούν να επεκταθούν σημαντικά. Προσθέτοντας πρόσθετα συστατικά πρόσμιξης όπως φθόριο και άλλα στοιχεία RE (π.χ. Yb, Tm και Er), οι θερμικές και οπτικές ιδιότητες αυτών των γυαλιών μπορούν να ρυθμιστούν σε ένα ευρύ φάσμα.

Τα γυαλιά μπορούν να υποστούν επεξεργασία σε προμορφωμένες ίνες, σωλήνες, ράβδους και πλάκες εφαρμόζοντας συγκεκριμένες τεχνικές τήξης και χύτευσης. Αυτά



τα λιωμένα γυαλιά έχουν μεγάλο ενδιαφέρον για μια σειρά εφαρμογών, όπως για χρήση ως χύμα, ράβδοι και ίνες σε λέιζερ [15] και μη γραμμικές συσκευές [16].

Μια σημαντική πρόκληση στην κατασκευή ενεργών και παθητικών οπτικών ινών που βασίζονται σε λιωμένο γυαλί είναι ο συνδυασμός διαφορετικών τύπων υάλου στο προσχηματισμένο ινώδες, π.χ., πυριτικό γυαλί υψηλής πρόσμιξης ως υλικό πυρήνα καθοδήγησης φωτός με εξαιρετικά καθαρή επένδυση πυριτικού τήγματος. Το συνδυασμένο σχέδιο του διοξειδίου του πυριτίου και πυριτικού γυαλιού ( $\text{SiO}_2$  περιεκτικότητα  $<70 \text{ mol}\%$ ), ή άλλα υλικά, απαιτεί μια βελτιστοποιημένη σύνθεση υάλου σε σχέση με τη θερμοκρασία μετασχηματισμού, συντελεστή διαστολής, και φαινόμενα διαχύσεως.

Ένα κατάλληλο υποψήφιο για αυτό το υλικό συνδυασμών είναι το  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{La}_2\text{O}_3$  (SAL) γυάλινο σύστημα που βασίζεται σε διάφορες έρευνες [17]. Η καλή συμπεριφορά τήξης, η υψηλή ευστάθεια redox και η επαρκής διαλυτότητα των στοιχείων RE σε γυαλί καθιστούν αυτά τα γυαλιά SAL πολύ κατάλληλα για εφαρμογές σε ίνες.

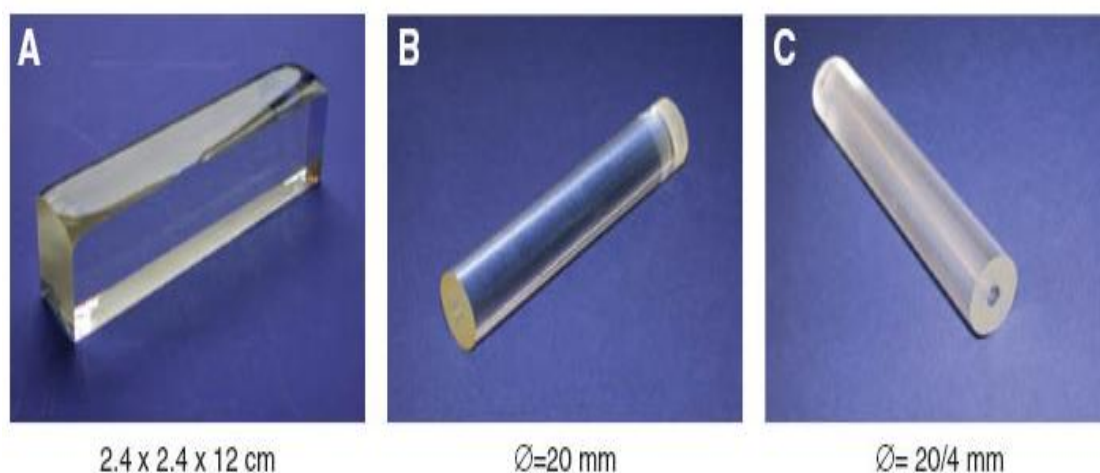
Το δυναμικό αυτών των γυάλινων υλικών για συνδυασμό με ένα  $\text{SiO}_2$  επένδυση επιτρέπει μια διαφορά δείκτη διάθλασης μεταξύ του πυρήνα και της επενδύσεως έως 0,1. Μπορούν να επιτευχθούν αριθμητικά ανοίγματα έως 0,55. Οι έρευνες για τα γυαλιά SAL, όπως η παρασκευή γυαλιού και ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων του υλικού, περιγράφονται στο [5].

Οι τύποι γυαλιού με υψηλή περιεκτικότητα  $\text{SiO}_2$  χρησιμοποιούνται (γυαλιά υψηλής πυριτίας, 65-70  $\text{mol}\%$   $\text{SiO}_2$ ) δεδομένου ότι επιτρέπουν σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις ενεργού RE (π.χ. Yb) και κωδικοποιητών.

Το Lanthanum και το αλουμίνιο είναι οι κωδικοποιητές σε αυτήν την περίπτωση και ένα υψηλό κλάσμα αλουμινίου (π.χ. 20  $\text{mol}\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) επιτρέπει μια πολύ καλή διαλυτότητα για τα ιόντα RE. Η εύκολη αντικατάσταση του λανθανίου με άλλα στοιχεία RE επιτρέπει μεγάλη μεταβλητότητα στις ιδιότητες του γυαλιού [23]. Μία πρόκληση είναι η προετοιμασία συνθέσεων γυαλιού για ίνες με χαμηλή εξασθένιση και η σκοπιμότητα μιας διαδικασίας σχεδίασης ινών χωρίς υποβάθμιση των οπτικών ιδιοτήτων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν κατασκευαστεί δείγματα των γυαλιών  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3$  χρησιμοποιώντας υψηλής ποιότητας (3N-5N) πρώτες ύλες οξειδίου ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ) και υδροξείδιο  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ .

Για ομογενοποίηση, τα υγρά ποτήρια τοποθετήθηκαν σε άφθονο καθαρό νερό, ξηράνθηκαν και στη συνέχεια επανα-τήχθηκαν στους  $1650^\circ\text{C}$  υπό ανάδευση. Μετά από αρκετές ώρες τήξης, το υγρό γυαλί χύθηκε σε ένα καλούπι από ανοξείδωτο χάλυβα για να σχηματίσει υαλότουβλα (glass blocks) (Εικόνα 3.9Α). Τα μπλοκ ψύχεται βραδέως κάτω από την  $T_g$  σε θερμοκρασία δωματίου στα  $100\text{K/h}$ . Ακολουθώντας αυτήν τη λεπτή διαδικασία ψύξης, τα ομοιογενή μπλοκ χωρίς φυσαλίδες αλέστηκαν και γυαλίστηκαν σε κυλινδρικό σχήμα (Εικόνα 3.9Β και Γ) για να χρησιμοποιηθούν ως προσχηματισμοί για ίνες και ως ράβδοι σε μικροδομημένες προδιαμορφώσεις.

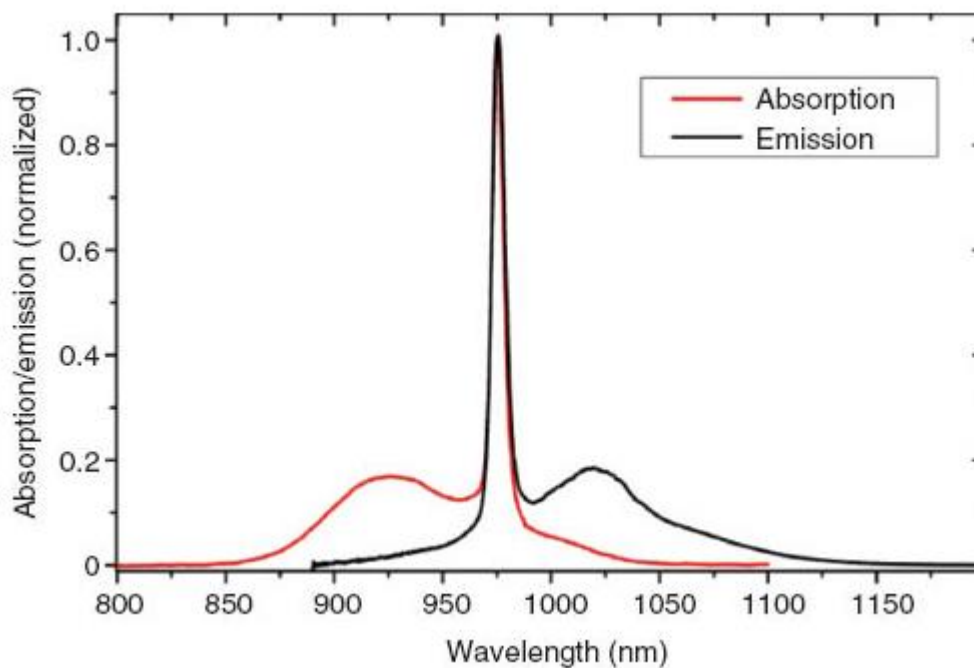


**Εικόνα 3.9** Γυάλινο μπλοκ SAL μετά από λεπτή ψύξη (Α), άλεση και στιλβωμένο προμόρφωμα SAL (Β) και σωλήνα SAL (C) [25].

Οι συνθέσεις γυαλιού SAL μπορούν να βελτιστοποιηθούν ως προς τις θερμικές και οπτικές απαιτήσεις τόσο για υψηλή συγκέντρωση λανθανίου και αλουμινίου όσο και για καλή συμβατότητα με επένδυση πυριτιάς. Η περιοχή σχηματισμού γυαλιού και η σταθερότητα γυαλιού του συστήματος SAL επηρεάζονται και περιορίζονται από τη συγκέντρωση  $\text{RE}_2\text{O}_3$  (π.χ.  $\text{RE} = \text{La}, \text{Yb}$ ). Τα γυαλιά SAL εμφανίζουν υψηλή θερμοκρασία μετάβασης, που είναι ένα μεγάλο θερμοχημικό πλεονέκτημα σε σχέση με

τον συνδυασμό τους με καθαρό γυαλί πυριτίας. Τα γυαλιά SAL με υψηλή περιεκτικότητα σε λανθάνιο εμφανίζουν υψηλό δείκτη διάθλασης και μη γραμμικό συντελεστή διπλάσιο από αυτόν του  $\text{SiO}_2$  και είναι κατάλληλα για μη γραμμικές εφαρμογές (π.χ. παραγωγή υπερκειμένου κενού).

Η μερική αντικατάσταση του λανθανίου με το υττέρβιο ως ενεργή επικάλυψη επιτρέπει την κατασκευή γυαλιών και ινών για εφαρμογή με λέιζερ (π.χ., για λειτουργία υψηλής ισχύος). Στην εικόνα 3.10, φαίνονται τα τυπικά φάσματα απορρόφησης και εκπομπής  $\text{Yb}^{3+}$  των λιωμένων γυαλιών SAL. Τα φάσματα απορρόφησης και εκπομπής, καθώς και η διάρκεια ζωής των  $\text{Yb}$  με πρόσμιξη γυαλιά SAL, είναι πολύ παρόμοια με εκείνες που είναι γνωστές από  $\text{Yb}^{3+}$  σε  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$  ποτήρια παράγεται μέσω MCVD.

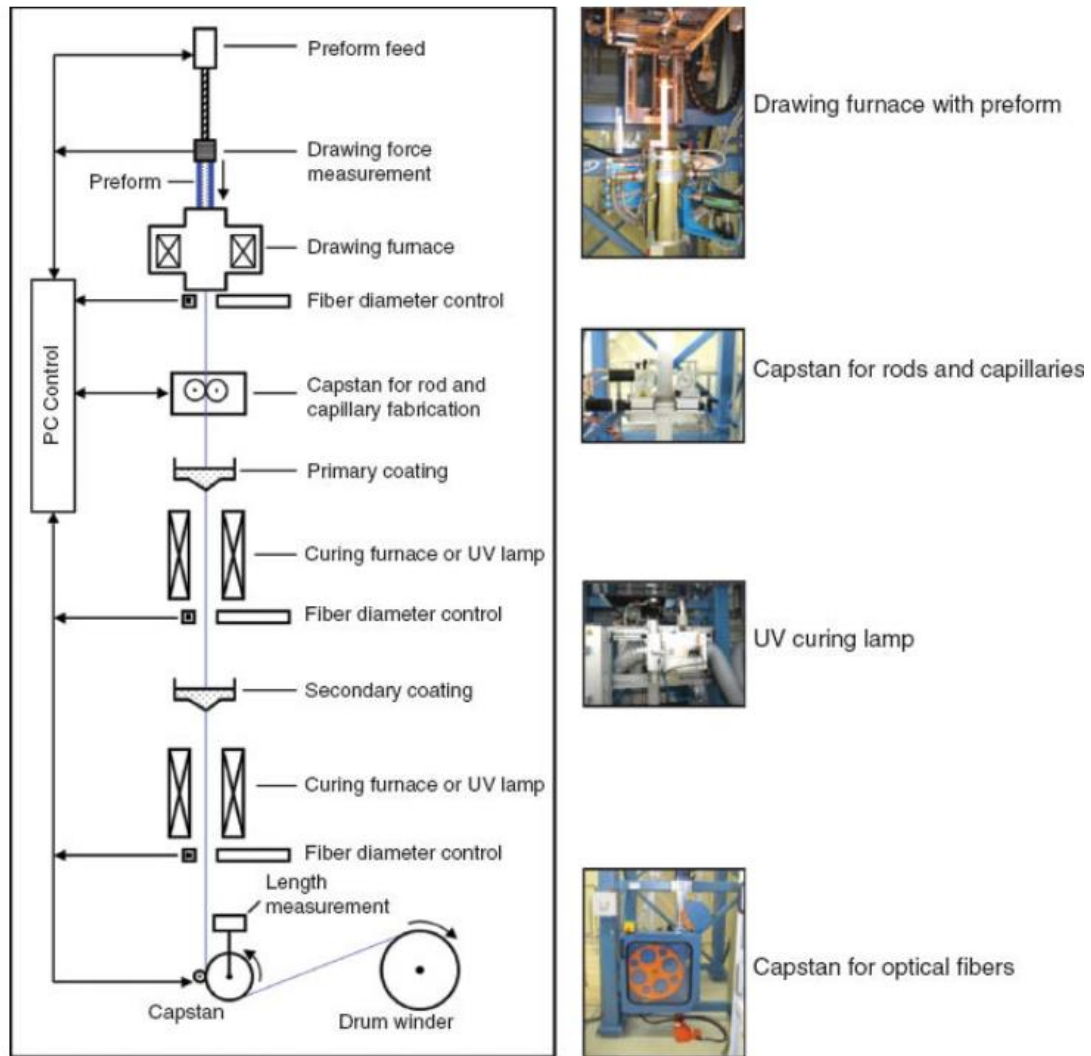


**Εικόνα 3.10** Φάσματα απορρόφησης και εκπομπής γυαλιού SAL με προσθήκη  $\text{Yb}$  [25].

### **3.3.Τεχνολογίες κατασκευής και επίστρωσης ινών**

#### **3.3.1. Η διαδικασία σχεδίασης ινών**

Οι οπτικές ίνες γυαλιού παρασκευάζονται από προσχηματισμούς με μια διαδικασία σχεδιασμού ινών σε θερμοκρασίες προσαρμοσμένες κοντά στο σημείο μαλακώματος των γυαλιών που χρησιμοποιούνται. Η διαδικασία σχεδίασης μπορεί βασικά να διεξαχθεί σύμφωνα με δύο διαφορετικές μεθόδους: είτε αντλώντας απευθείας τις ίνες γυαλιού από τηγμένο γυαλί είτε τραβώντας συνεχώς από την περιοχή του λαιμού προς τα κάτω ενός μερικώς μαλακωμένου προδιαμορφωμένων ινών [2]. Κατά τη διαδικασία άμεσης τήξης, κομμάτια γυαλιού πολλαπλών συστατικών τοποθετούνται σε δύο ομόκεντρα χωνευτήρια (μέθοδος διπλού χωνευτηρίου [3]) και συνδυάζονται σε λιωμένη κατάσταση για να σχηματίσουν τον πυρήνα ινών και το στρώμα επένδυσης. Το συνεχές σχέδιο περιγράφεται σε αυτήν την ενότητα. Μια σχηματική επισκόπηση αυτής της διαδικασίας φαίνεται στην εικόνα 3.11.



**Εικόνα 3.11 Σχηματική σχεδίαση για οπτικές ίνες [25].**

Σήμερα, οι οπτικές ίνες κατασκευάζονται συνήθως σε μια διαδικασία κατακόρυφης σχεδίασης από ένα στερεό μη δομημένο ή δομημένο γυάλινο προσχηματισμό (δηλαδή, δομή επένδυσης πυρήνα), το οποίο προσφέρει ένα ευρύτερο φάσμα εναλλακτικών σχεδιασμού ινών [4]. Ο εξελιγμένος αρθρωτός εξοπλισμός σχεδίασης ινών αποτελείται κυρίως από διαφορετικά λειτουργικά εξαρτήματα, όπως μια μονάδα στερέωσης και τροφοδοσίας προσχηματισμού και έναν κλίβανο υψηλής θερμοκρασίας στο πάνω μέρος του συστήματος, ακολουθούμενο από εφαρμογείς επίστρωσης, μονάδες σκλήρυνσης επίστρωσης και μια συσκευή περιέλιξης με ένα πηνίο που διασχίζει για να αναλαμβάνει συνεχώς την ίνα στο κάτω άκρο της γραμμής σχεδίασης. Ένας κατάλληλος αριθμός κεφαλών μέτρησης διαμέτρου λέιζερ χωρίς επαφή (κεφαλές 2 αξόνων ή 3 αξόνων) παρακολουθεί τη θέση κάθετης ίνας και τη διάμετρο των

παρθένων γυάλινων ινών μετά την έξοδο από τον κλίβανο, και η διάμετρος της επικαλυμμένης ίνας. Αυτή η μέτρηση διαμέτρου επιτρέπει τον συνεχή inline έλεγχο και ρύθμιση της διαμέτρου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδίασης ινών. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος ινών, οι μετρημένες τιμές διαμέτρου τροφοδοτούνται σε κλειστό βρόχο ελέγχου που ρυθμίζει στιγμιαία την απαραίτητη ταχύτητα σχεδίασης.

Προαιρετικά, μπορεί να εγκατασταθεί αρθρωτή ερπύστρια σύμφωνα με το σύστημα σχεδίασης, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να τραβάει γυάλινες ράβδους, τριχοειδή λεπτού τοιχώματος ή υποδομημένους καλάμους με ελάχιστη επιφανειακή πίεση. Όλες αυτές οι συσκευές ευθυγραμμίζονται κατακόρυφα κατά μήκος της γραμμής σχεδίασης σε έναν μηχανικά σταθερό πύργο που είναι συνήθως υψηλότερος από 4 m. Απαιτούνται μεγαλύτερα ύψη (π.χ. > 20 m) για το σχεδιασμό ινών υψηλής ταχύτητας [5] σε ταχύτητες σχεδίασης > 1000 m / min για να παρέχεται επαρκής ψύξη ινών σε όλη την απόσταση μεταξύ της εξόδου του κλιβάνου και των εφαρμογών επίστρωσης. Απαιτείται κατάλληλη ψύξη ινών για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του υλικού επικάλυψης από την επαφή του υλικού επικάλυψης με ίνες υψηλής θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ακατάλληλη διαβροχή.

Ένας μετρητής τάσης έλξης μπορεί επίσης να εγκατασταθεί στον τροφοδότη προσχηματισμού ή στην τάπα ινών για παρακολούθηση της τάσης έλξης ινών. Η τάση έλξης επηρεάζεται από διαφορετικές συνθήκες σχεδίασης, όπως η θερμοκρασία του φούρνου και η προδιαμόρφωση και η διάμετρος των ινών, και σχετίζεται γραμμικά με την ταχύτητα έλξης των ινών [6]. Η υψηλή τάση έλξης οδηγεί σε αύξηση της απώλειας οπτικών ινών και σε υποβάθμιση της αντοχής των ινών λόγω του φαινομένου της κόπωσης [7]. Προκειμένου να αποφευχθεί η θραύση των ινών γυαλιού κατά τη διάρκεια της σχεδίασης και να αποφευχθεί η κατασκευή εξαιρετικά ασθενών ινών γυαλιού, η δύναμη έλξης σε μια συμβατική διάμετρο ινών 125 μm σε χαμηλές ταχύτητες έλξης περίπου 5 m / min έως 50 m / min δεν πρέπει υπερβαίνει τα 1,2 N (αντιστοιχεί σε τάση σχεδίασης  $1,47 \times 10^{-8}$  N / m<sup>2</sup> για ίνες διαμέτρου 125 μm) ανεξάρτητα από τη διάσταση του προμορφώματος.

Το θεωρητικό μήκος μιας ίνας που μπορεί να αντληθεί από μια δεδομένη μορφή, καθώς και η απαιτούμενη ταχύτητα σχεδίασης, μπορεί να προέλθει από το νόμο της διατήρησης της ροής μάζας. Σε μια δεδομένη προδιαμόρφωση με διάμετρο  $d_p$  και ρυθμό τροφοδοσίας προμορφώματος  $v_p$ , το σχέδιο που απαιτείται με ταχύτητα  $v_f$  για

να επιτευχθεί μια επιθυμητή ίνα με διάμετρο  $d_f$  μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:  $v_f/v_p = d_p^2/d_f^2$

Το μήκος μιας ίνας  $l_f$  που μπορούν να αντληθούν από μία προδιαμόρφωση με μήκος  $l_p$  εξαρτάται από τον όγκο του και καθορίζεται από μια παρόμοια εξίσωση χρησιμοποιώντας  $v_f = l_f/t$  και  $v_p = l_p/t$ :  $l_f/l_p = d_p^2/d_f^2$

Η αναλογία μεταξύ της προδιαμόρφωσης και της διαμέτρου των ινών  $d_p^2/d_f^2$  ονομάζεται η αναλογία draw-down.

Η διαδικασία σχεδίασης ινών ξεκινά εισάγοντας το προσχηματισμένο ινώδες σε έναν κλίβανο σχεδίασης στην κορυφή του πύργου και θερμαίνοντας το γυαλί του προμορφώματος κοντά στη θερμοκρασία μαλακώματος του. Τόσο οι κλίβανοι που βασίζονται σε γραφίτη όσο και σε ζirkονία (δηλαδή, ανθεκτική και επαγωγική θέρμανση, αντίστοιχα) με ελεγκτές θερμοκρασίας ακριβείας είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι ηλεκτρικοί φούρνοι σχεδίασης. Οι κλίβανοι γραφίτη πρέπει να λειτουργούν υπό ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (συνήθως αέριο αργό ή ήλιο) για την αποφυγή οξειδωσης των συστατικών του γραφίτη (σιγαστήρας, θερμαντικό στοιχείο και σωλήνας επένδυσης) [18]. Η κατανομή θερμοκρασίας στη ζώνη θέρμανσης του κλιβάνου σχεδίασης καθορίζει την κλίση θερμοκρασίας κατά μήκος της διαμέτρου του προμορφώματος και έτσι επηρεάζει το σχηματισμό της περιοχής λαιμού προς τα κάτω και κατά συνέπεια την προκύπτουσα τάση έλξης ινών.

Ανάλογα με το επεξεργασμένο γυάλινο υλικό, τις διαστάσεις του προμορφώματος και τη δομή, η προδιαμόρφωση ινών μαλακώνει σε θερμοκρασίες έως 2000 °C για να σχηματίσει μια περιοχή λαιμού προς τα κάτω στην άκρη της, η οποία μειώνεται υπό τη δύναμη της βαρύτητας στην επιθυμητή ίνα διάμετρος.

Στη συνέχεια, η οπτική ίνα επικαλύπτεται με ένα στρώμα επικάλυψης περνώντας το μέσω μιας σειράς εφαρμογών επικάλυψης μετά την έξοδο από τον κλίβανο σχεδίασης. Το σύστημα επίστρωσης αποτελείται από μήτρες επίστρωσης (μήτρα υπό πίεση ή μήτρα βαρύτητας) που περιέχει το υγρό υλικό επικάλυψης και επίσης διαθέτει μονάδες σκλήρυνσης, όπως λαμπτήρες UV για σκληρυνόμενα υλικά υπεριώδους ακτινοβολίας (π.χ. ρητίνες με βάση ακρυλικό, πολυουρεθάνη, ORMOCER®) ή κλιβάνους για θερμικά σκληρυνόμενα υλικά (π.χ. σιλικόνη, πολυαμίδια). Η έννοια της επικάλυψης για οπτικές ίνες περιγράφεται λεπτομερέστερα σε επόμενη ενότητα.

Τέλος, η γυάλινη ίνα με επικαλύψεις τραβιέται προς τα κάτω κατά μήκος της γραμμής σχεδίασης και τυλίγεται συνεχώς πάνω σε ένα εγκάρσιο τύμπανο.

Μερικές από τις τυπικές παραμέτρους παρουσιάζονται παρακάτω για να απεικονίσουν τη διαδικασία σχεδίασης. Το πιο κοινό υλικό για οπτικές ίνες είναι καθαρό διοξείδιο του πυριτίου και ενισχυμένο γυαλί πυριτίας. Ανάλογα με το επίπεδο επικάλυψης, το εύρος μαλακώματος των υψηλών γυαλιών πυριτίας εκτείνεται από 1700 ° C έως 2350 ° C. Το ιξώδες του γυαλιού πυριτίας σε θερμοκρασία 1935 ° C - 2322 ° C κυμαίνεται από 10 4,86 Pas έως 10 3,63 Pas [19]. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδίασης, το προσχέδιο μετακινείται αργά μέσω της ζώνης θέρμανσης με ρυθμό συνήθως μικρότερο από 1 mm / min, ενώ η ίνα υάλου τραβάται συνεχώς πολύ πιο γρήγορα στην περιοχή m / min. Οι ακριβείς ταχύτητες καθορίζονται από την αναλογία μείωσης. Οι ερευνητικοί πύργοι σχεδίασης έχουν συνήθως ικανότητα ταχύτητας σχεδίασης  $\leq 200$  m / min ενώ οι βιομηχανικοί πύργοι σχεδίασης επιτρέπουν ταχύτητες σχεδίασης ινών έως 1200 m / min.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα τυπικά χαρακτηριστικά απόδοσης ινών όπως απώλεια οπτικών ινών και αντοχή ινών επηρεάζονται εν μέρει από τις συνθήκες σχεδίασης. Για παράδειγμα, η απώλεια μετάδοσης εξαρτάται από την τάση έλξης. Αποδείχθηκε ότι σε νωμένες πυριτικές ίνες πυρήνα (Al-Ge-Yb-doping) η οπτική απώλεια μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της τάσης των ινών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η τάση έλξης ινών έχει μια γραμμική σχέση με την ταχύτητα έλξης και εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία του κλιβάνου και τον λόγο αναρροής [15].

Η αντοχή των ινών επηρεάζεται άμεσα από τη σύνθεση της δομής των ινών (υλικά και γεωμετρίες πυρήνα και επένδυσης) καθώς και από τον ρυθμό ψύξης των ινών και την τάση έλξης. Ο ρυθμός ψύξης καθορίζεται βασικά από τη διάμετρο των ινών και την ταχύτητα έλξης - οι ίνες μικρότερης διαμέτρου τείνουν να δείχνουν υψηλότερη αντοχή από τις μεγαλύτερες ίνες. Κατά τη διαδικασία σχεδίασης και ψύξης ινών προκαλείται μηχανική τάση (εφελκυστική ή συμπιεστική τάση) στη δομή των ινών, η οποία θα παραμείνει εν μέρει ως υπολειμματική τάση που επηρεάζει την αντοχή των ινών [16]. Ανάλογα με το υλικό προσχηματισμού, ο χρόνος παραμονής του προμορφώματος στη θερμή ζώνη του κλιβάνου σχεδίασης μπορεί να αρχικοποιήσει την επιφανειακή ή χύδην κρυστάλλωση. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με αυξημένο ρυθμό τροφοδοσίας προσχηματισμού και από τροποποίηση της εσωτερικής ατμόσφαιρας αερίου του κλιβάνου.



### 3.4.Επιστρώσεις οπτικών ινών

Οι επικαλύψεις για οπτικές ίνες γυαλιού δεν επηρεάζουν απαραίτητα τις οπτικές ιδιότητες, αλλά είναι ωστόσο απαραίτητες για τη διατήρηση της μηχανικής αντοχής των παρθένων ινών προστατεύοντάς τις από υγρασία και μηχανική πρόσκρουση (πρόληψη μικρο-κάμψης, προστασία από επικίνδυνα περιβάλλοντα) και ii) διασφάλιση της οπτικής απόδοσης ινών (ρύθμιση αριθμητικού ανοίγματος ινών, μείωση οπτικής απώλειας, απογύμνωση λειτουργίας κ.λπ.). Επιπλέον, η επίστρωση ινών μπορεί να αφορά άλλες λειτουργικές πτυχές, όπως ηλεκτρική ή θερμική αγωγιμότητα ή μετάδοση παραμέτρων μηχανικής τάσης από την ενσωμάτωση μέσω των ινών (π.χ. μηχανική ανίχνευση) [3].

Τρεις διαφορετικές κατηγορίες επιστρώσεων διατίθενται στην αγορά για ίνες γυαλιού: οργανικές, ανόργανες και υβριδικές επικαλύψεις. Το οργανικό υλικό επικάλυψης περιλαμβάνει υπεριώδεις (UV) σκληρυνόμενες ρητίνες και θερμικά σκληρυνόμενες ρητίνες. Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες οργανικές επικαλύψεις περιλαμβάνουν υπερφθορο πολυμερή (π.χ. Teflon), πολυακρυλικά, πολυαμίδιο, σιλικόνες και τα παράγωγά τους. Μεταξύ των επικαλύψεων ακρυλικού πολυμερούς, διατίθενται φθοριούχα σκευάσματα που έχουν δείκτη διάθλασης κάτω από εκείνο του ίδιου του υάλινου πυριτίου.

Τέτοιες επικαλύψεις χαμηλού δείκτη παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές λέιζερ στις οποίες απαιτείται υψηλό αριθμητικό διάφραγμα ινών ( $NA > 0,45$ ). Τα υβριδικά υλικά επικάλυψης για οπτικές ίνες βασίζονται σε οργανικά τροποποιημένα κεραμικά πρόδρομα (ORMOCER®)s και συνδυάζουν τις ιδιότητες των οργανικών και ανόργανων συστατικών. Τέτοια υβριδικά υλικά εφαρμόζονται όπου απαιτούνται ιδιότητες τόσο πολυμερών όσο και ανόργανων (π.χ., για την επίτευξη σταθερότητας υψηλής θερμοκρασίας ή χαμηλότερης σκληρότητας) [4]. Οι μεταλλικές επικαλύψεις χρησιμοποιούνται κατά προτίμηση όταν οι εφαρμογές ινών αντιμετωπίζονται υπό σκληρές συνθήκες (π.χ. επιθετικά μέσα, μηχανικές κρούσεις) ή όταν απαιτούνται ειδικές ιδιότητες (π.χ. ταχεία ψύξη ινών κατά τη λειτουργία των ινών) [5].

Περαιτέρω, άλλα ανόργανα όπως επικαλύψεις άνθρακα μπορούν να εφαρμοστούν για να ληφθεί ερμητικότητα (έναντι υδρογόνου και / ή υγρασίας ή υγρού νερού) που διαφορετικά δεν μπορεί να επιτευχθεί. Τα στρώματα άνθρακα στο διοξείδιο του πυριτίου επηρεάζουν επίσης τις επιφανειακές ιδιότητες όπως η διαβρεξιμότητα, η οποία έχει μεγάλη σημασία για πρόσθετα οργανικά ή μεταλλικά στρώματα [6].

Όλες οι επικαλύψεις διαφέρουν ως προς τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες όπως διαθλαστικός δείκτης, ελαστικός συντελεστής, επιμήκυνση, σκληρότητα, διαπερατότητα νερού και υδρογόνου, θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού και θερμική σταθερότητα. Η καταλληλότητα της επικάλυψης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη στοχευμένη εφαρμογή της τελικής ίνας. Η επιλογή του κατάλληλου σκευάσματος επίστρωσης ζητά μια λεπτομερή ανάλυση της προβλεπόμενης εφαρμογής σε όρους περιβαλλοντικών συνθηκών, προγραμματισμένων μεθόδων μέτρησης / ανάλυσης ινών, και φυσικά απλές πτυχές χειρισμού (δηλ. Τοπική / χρονική αφαιρούμενη επικάλυψη).

Μια επισκόπηση των χημικών και οπτικών ιδιοτήτων επιλεγμένων επικαλύψεων ινών παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2.

	Curing	Viscosity (uncured) <sup>a</sup> [Pas]	n (cured) <sup>b</sup>	NA <sup>c</sup>	Max. coating thickness <sup>d</sup> (μm)
Polyamidimide	T	n.a.	1.81		6
Polyimide (Microquartz)	T	26.2	1.68		7
Polyimide (PMGI)	T	9.8	1.57		6
ORMORCER <sup>®</sup>	UV	3.0	1.51		100
Urethane-Acrylate DSM 3471-3-14	UV	9.2	1.505		100
Silica			1.4469		
Silicone LR7665 (Wacker)	T	14.2	1.415	0.30	100
Silicone RT601 (Wacker)	T	2.9	1.409	0.33	100
F-Acrylate Opticlad	UV	3.2	1.38	0.43	50
F-Acrylate (SSCP) PC 373	UV	3.5	1.376	0.45 <sup>e</sup>	60
F-Acrylate (SSCP) PC 370	UV	5.7	1.372	0.46	60
F-Acrylate (SSCP) PC 363	UV	5.0	1.363	0.49	60
OF-133 (MyPolymers)	UV	n.a.	1.326	0.61 <sup>e</sup>	50
Teflon AF (Du Pont)	T	n.a.	1.314	0.61	3

$\alpha$  25 ° C,  $\beta$  μετράται σε 1300 nm (πρίσματος διάταξη ζεύξης),  $\gamma$  υπολογίζεται από  $n$ ,  $d$  ενιαίο στρώμα, ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες του επιπέδου (π.χ., χωρίς φυσαλίδες) και η τεχνολογία (dip επίστρωση έναντι επίστρωση πίεση),  $\epsilon$  μετρούμενη χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεδίου.

### **Πίνακας 3.2 Χημικές και οπτικές ιδιότητες επιλεγμένων επικαλύψεων ινών που αναφέρονται σύμφωνα με τη μείωση του δείκτη διάθλασης.**

Τα βασικά σκευάσματα επικάλυψης πρέπει συνήθως να προσαρμόζονται ειδικά για εφαρμογή κατά τη διάρκεια της σχεδίασης ινών (βλέπε, για παράδειγμα, [9]). Υπάρχουν πολλές εμπορικά διαθέσιμες συνθέσεις επικάλυψης. Ειδικά πρόσθετα, όπως φωτοεναρκτήρες, προαγωγείς προσκόλλησης, αναστολείς, αντιοξειδωτικά ή διαλύτες, μπορεί να είναι απαραίτητα για τη ρύθμιση του ιξώδους και τη διευκόλυνση της

υψηλής ταχύτητας διαδικασίας γραμμής επικάλυψης. Ορισμένες από τις γενικές απαιτήσεις υλικών επικάλυψης για εφαρμογή εν σειρά συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3.

Liquid state	Surface tension	N/m	0.02–0.2
	Viscosity	Pa s	1–10
	Curing		thermal or UV
	Curing time	Sec	0.1–2.5
	Solvent content		as low as possible
	Shrinkage during curing		as low as possible
	Polymerization		preferably without water generation
Cured state	Layer thickness of cured material (single coating)	μm	≤50
	Young's modulus of cured material	GPa	≤1.5

**Πίνακας 3.3 Γενικές απαιτήσεις υλικού για τη δυναμική επίστρωση ινών.**

Επιπλέον, ο διαθέσιμος εξοπλισμός πύργου σχεδίασης πρέπει να τηρείται και να περιορίζει την επιλογή. Οι συνθήκες επίστρωσης και σκλήρυνσης πρέπει να ελεγχθούν προσεκτικά πριν προχωρήσετε στη διαδικασία επίστρωσης εν σειρά της ίνας.

Η ποιότητα της επικάλυψης των σκληρυμένων ινών συνήθως επαληθεύεται χρησιμοποιώντας οπτικές μεθόδους (μικροσκοπία, απορρόφηση και απώλεια φασμάτων), μηχανικές δοκιμές (συντελεστής ρήξης επιστρωμένων ινών) και δοκιμή ερμητικότητας (δοκιμή απορρόφησης υδρογόνου και νερού).

Η συνήθης διαδικασία εφαρμογής επιχρίσματος για πολυμερή ή υβριδικά υλικά είναι είτε επίστρωση βαρύτητας είτε επικάλυψη υπό πίεση. Η απλούστερη μέθοδος των δύο

είναι η επικάλυψη με βαρύτητα χρησιμοποιώντας μια μήτρα επίστρωσης κωνικού σχήματος.

Αυτή η μέθοδος είναι βολική όσον αφορά τη ρύθμιση και το χειρισμό κατά τη διάρκεια του σχεδίου και επιτρέπει την προσαρμογή της διαμέτρου των ινών στην αρχή της διαδικασίας σχεδίασης, αλλά υπάρχουν πάντα φυσαλίδες αέρα που παγιδεύονται στη δεξαμενή επικάλυψης λόγω της δυναμικής σχεδίασης και υπάρχει πάντα κίνδυνος μόλυνσης σωματιδίων σκόνης να μειωθεί η ποιότητα της επικάλυψης. Για την παράκαμψη αυτών των μειονεκτημάτων, προτιμάται ένα σύστημα επικάλυψης υπό πίεση. Λόγω της εξωτερικής πίεσης εντός του δοχείου επικάλυψης, η δυναμική του συστήματος επικάλυψης (π.χ. διάτμηση) αλλάζει πλεονεκτικά και επιτυγχάνονται επιστρώσεις πολύ υψηλής ποιότητας. Ωστόσο, το υπό πίεση σύστημα επικάλυψης απαιτεί εκτεταμένη προσπάθεια καθαρισμού και περισσότερο υλικό επίστρωσης λόγω των νεκρών όγκων εντός των γραμμών της εγκατάστασης.

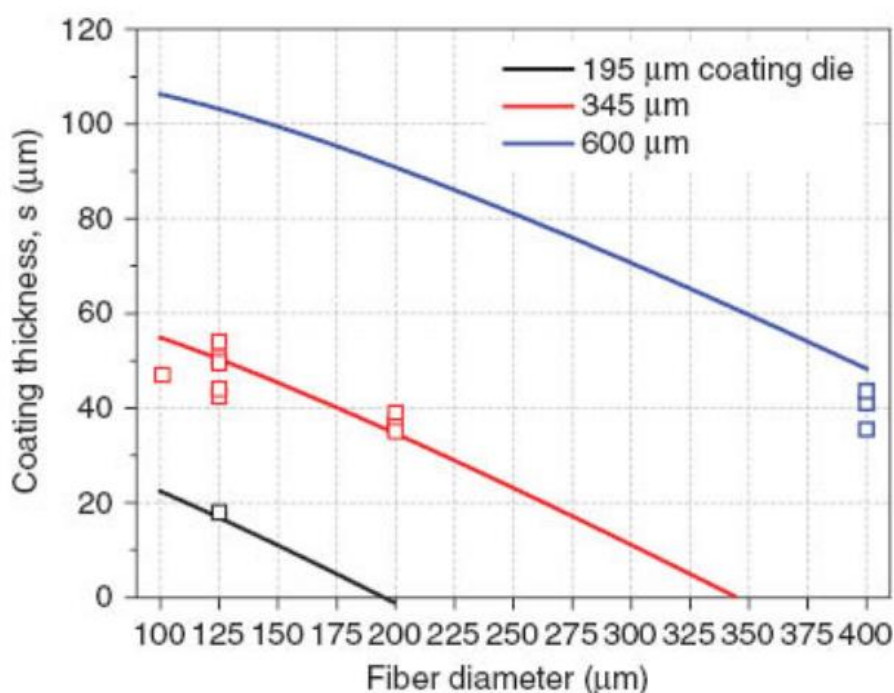
Διάφορες προσομοιώσεις της διαδικασίας επικάλυψης και τα πάχη επικάλυψης που λαμβάνονται είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία για ανοιχτές ρυθμίσεις εφαρμογών επίστρωσης και εφαρμοστές επίστρωσης υπό πίεση [61, 70–74]. Λεπτομερείς εργασίες μοντελοποίησης και σύγκριση με πρακτικά αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν στο Jaluria et al. [5–8]. Αντιμετωπίστηκαν επίσης οι διακυμάνσεις του πάχους της επικάλυψης [79], τα ειδικά αποτελέσματα της διαδικασίας επικάλυψης (π.χ. ομόκεντρος επικάλυψης) [8], η ολίσθηση [1] και οι θερμικά προκαλούμενες τάσεις [2].

Το πάχος της επίστρωσης βαρύτητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδίασης μπορεί να προκύψει μαθηματικά βάσει της εξίσωσης Hagen-Poiseuille και της υπόθεσης της ιδανικής ροής (στρωτή ροή, υγρό Νεύτωνα). Μια κατά προσέγγιση εκτίμηση οδηγεί στην ακόλουθη απλοποιημένη εξίσωση 3, [4], η οποία παραμελεί τη συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης.

$$s = h - a = \sqrt{\frac{R^2 - a^2}{2 \ln\left(\frac{R}{a}\right)}} - a$$

που  $s$  είναι το τελικό πάχος επικάλυψης,  $h$  είναι η ακτίνα της επικαλυμμένης ίνας,  $a$  είναι η ακτίνα της ίνας και το  $R$  είναι η ακτίνα της διατομής μήτρας επικάλυψης.

Στην πράξη, οι παράμετροι σχεδίασης επηρεάζουν ιδιαίτερα τη συμπεριφορά εξόδου ροής του υλικού επικάλυψης στη μήτρα επικάλυψης, αποδίδοντας έτσι ένα κάπως διαφορετικό τελικό πάχος επικάλυψης. Παραδειγματικά δεδομένα από πειράματα σχεδίασης ινών και η πρόβλεψη σύμφωνα με το απλοποιημένο μοντέλο, εξίσωση 3, απεικονίζονται στην Εικόνα 3.12.



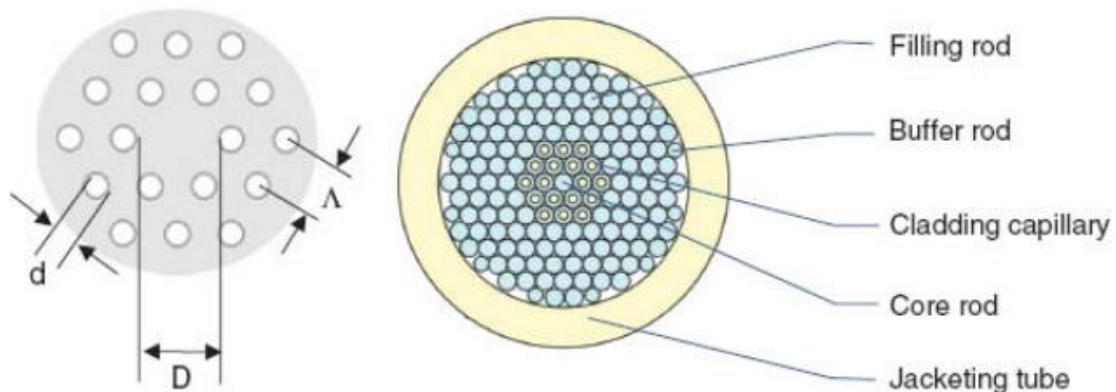
**Εικόνα 3.12** Πάχος επίστρωσης ως συνάρτηση της διαγραμμένης διαμέτρου ινών και της διαμέτρου μήτρας επίστρωσης. Στερεές γραμμές: απλοποιημένο μοντέλο (βλ. Εξίσωση 3). Τετράγωνα: πειραματικές τιμές. Μαύρο: διάμετρος μήτρας επίστρωσης 195  $\mu\text{m}$ . κόκκινο: διάμετρος μήκους επίστρωσης 345  $\mu\text{m}$ . μπλε: διάμετρος μήτρας επίστρωσης 600  $\mu\text{m}$  [25].

Υπάρχει μεγάλη γκάμα ειδικών ινών για διαφορετικές εφαρμογές. Στην επόμενη ενότητα, θα συζητήσουμε δύο κατηγορίες τέτοιων ινών που αποτελούν το επίκεντρο ειδικού ερευνητικού ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια: μικροδομημένες ίνες (MOFs) και υβριδικές ίνες. Αυτοί οι τύποι ινών επιτρέπουν τις ιδιότητες διάδοσης πολύ πέρα από τις ιδιότητες των πιο συμβατικών δομών ινών επένδυσης πυρίνα.

### 3.4.1. Μικρές δομές ινών που παρασκευάζονται με τεχνική *stack and draw*

Η ιδέα των μικροδομημένων ινών (MOFs), που πρωτοστάτησε το 1996 από τους Russell et al. [13], επιτρέπει μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών λόγω ενός μεγάλου όγκου ελευθερίας στο σχεδιασμό της διάταξης τριχοειδών και ράβδων με επικάλυψη ή χωρίς επικάλυψη. Τα MOF με διαφορετικούς μηχανισμούς διάδοσης φωτός περιγράφονται ευρέως σε άρθρα αναθεώρησης [4, 15].

Ανάλογα με τη δομική τους σχεδίαση, τα MOF λειτουργούν με το φαινόμενο διάκενο φωτονικής ζώνης ή από ολική εσωτερική ανάκλαση (TIR). Σε αυτήν την ενότητα, επικεντρωνόμαστε σε MOF που λειτουργούν μέσω TIR. Συνήθως έχουν έναν συμπαγή κεντρικό πυρήνα με διάμετρο  $D$  που δρα σαν ένα συμπαγές δομικό ελάττωμα σε μια εξαγωνική οπώδη διάταξη με ομοιόμορφο μέγεθος βήματος  $\Lambda$  και διάμετρο οπής  $d$  (βλ. Εικόνα 3.13 , αριστερά). Αυτή η οπίσθια επένδυση είναι συνήθως διευθετημένη ως πολλαπλός αριθμός τριχοειδών δακτυλίων.



**Εικόνα 3.13** Αρχικό προφίλ ενός MOF (επίσης: οπών ινών) που λειτουργεί σε TIR με δύο τριχοειδείς δακτυλίους (αριστερά: γεωμετρικές παραμέτρους, δεξιά: σχήμα διάταξης των στοιχείων συσκευασίας) [25].

Η κοινή τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την προετοιμασία των MOFs είναι η σχεδίαση των προμορφωμάτων των τριχοειδών και των ράβδων, που συχνά

αναφέρονται ως η τεχνική stack and draw. Οι ράβδοι και τα τριχοειδή με ομοιόμορφες εξωτερικές διαμέτρους τυπικά είναι διατεταγμένα σε εξαγωνική συσκευασία και επιστρωμένα με σωλήνα μανδύα.

Για να εκτείνεται η αναντιστοιχία μεταξύ της εξαγωνικής διάταξης και του κυκλικού εξωτερικού σωλήνα, χρησιμοποιούνται συχνά ρυθμιστικές ράβδοι με διαφορετικές διαμέτρους για την πλήρωση του παρενθετικού όγκου. Η εικόνα 3.13 (δεξιά) δείχνει μια τυπική διάταξη πακέτου προσχηματισμού. Δύο τύποι TIR MOF με υψηλή πρακτική σημασία συζητούνται στα ακόλουθα: ίνες με αέρα και ίνες αιωρούμενου πυρήνα.

#### Ίνες με επικάλυψη αέρα (air clad fibers)

Ένα εξαιρετικό χαρακτηριστικό των MOFs είναι η δυνατότητα επίτευξης υψηλού αριθμητικού ανοίγματος,  $NA > 0,6$ . Υψηλές αποτελεσματικές διαφορές δείκτη μεταξύ τρόπων καθοδήγησης πυρήνα και τρόπων επένδυσης είναι δυνατές λόγω της υψηλής αντίθεσης διαθλαστικού δείκτη μεταξύ πυριτίας και αέρα περίπου 0,45 κατά την εφαρμογή υψηλού κλάσματος αέρα και μικρού πλάτους γέφυρας στον επενδυμένο αέρα.

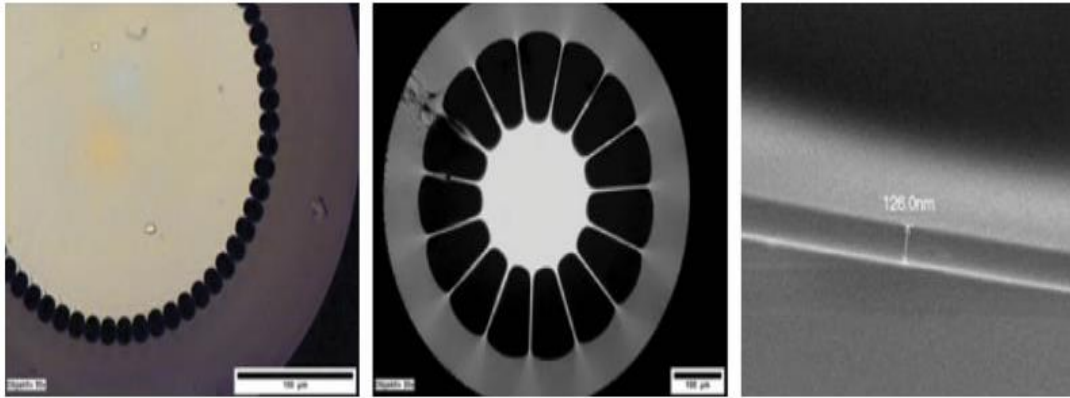
Τέτοιες ίνες είναι κατάλληλες για οπτική ισχύ ή μετάδοση σήματος, ή για ανίχνευση διαθλαστικού δείκτη, κυρίως στο καθεστώς διάδοσης φωτός πολλαπλών τρόπων [16]. Οι air clad fibers κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας την τεχνική stack-and-draw. Πυρήνας και τριχοειδής επένδυση αέρα με τυπική εξωτερική διάμετρο 1 mm και ο σωλήνας επικάλυψης συνήθως κατασκευάζονται από συνθετικό διοξείδιο του πυριτίου (π.χ. Heraeus Suprasil F300).

Τα τριχοειδή εισάγονται εντός του δακτυλιοειδούς χώρου αέρα μεταξύ του πυρήνα πυριτίας και του σωλήνα επικάλυψης. Για υψηλό NA στην τελική ίνα, απαιτείται πολύ μικρό πάχος γέφυρας  $< 1 \mu m$ . Οι προσομοιώσεις δείχνουν τη σημασία ενός πολύ μικρού πάχους γέφυρας [17]. Η εικόνα 3.14 δείχνει τις μικρογραφίες των παρασκευασμένων ινών με επίστρωση αέρα με διαφορετικές διαμέτρους πυρήνα και σχέδια με επένδυση αέρα.

Τα τριχοειδή και η δακτυλιοειδής διεπαφή του προμορφώματος συνδέονται με ένα σύστημα συμπίεσης. Ο εσωτερικός τριχοειδής όγκος συμπιέζεται, ενώ ο διάμεσος

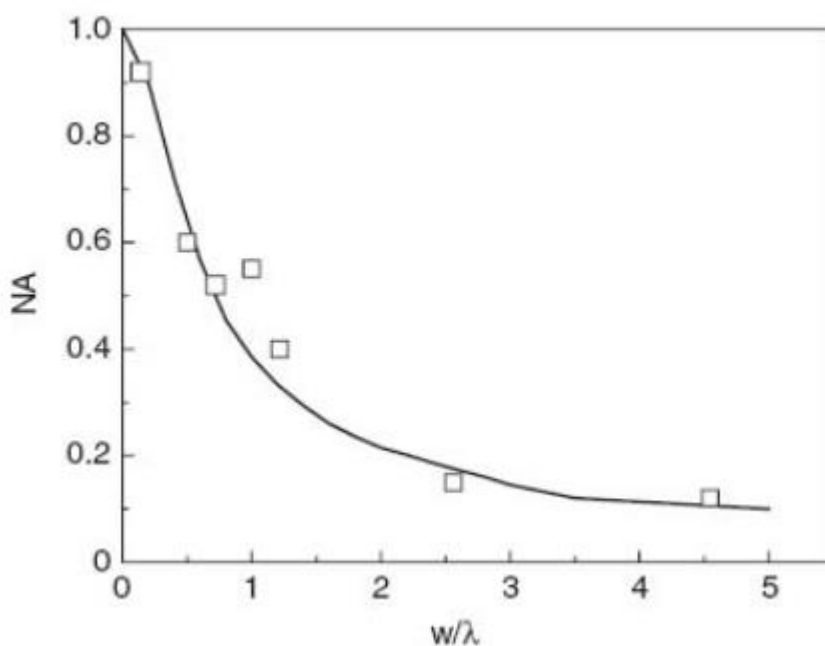


όγκος μεταξύ του πυρήνα και του σωλήνα υπερπλήρωσης εκκενώνεται ασθενώς. Οι προσομοιώσεις για τον έλεγχο της συνδυασμένης διαδικασίας τεντώματος και φουσκώματος των τριχοειδών κατά το σχέδιο περιγράφονται στο [18].



**Εικόνα 3.14** Μικρογραφίες των air clad ινών με διαφορετικές αναλογίες τεντώματος τριχοειδών (αριστερά, μεσαία) και εικόνα SEM μιας γέφυρας με επένδυση αέρα (δεξιά) [25].

Τεντώνοντας τα τριχοειδή με υπερπίεση, το πλάτος της γέφυρας,  $w$ , μπορεί να μειωθεί στην περιοχή του δέκατου ενός μικρομέτρου, όσον αφορά τις πολύ μικρότερες διαστάσεις σε σύγκριση με το μήκος κύματος λειτουργίας ( $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ ), μπορεί να επιτευχθεί ένα αριθμητικό άνοιγμα περίπου 0,9 (Εικόνα 3.15).



**Εικόνα 3.15.** Επίδραση του πλάτους της γέφυρας,  $w$ , στο αριθμητικό άνοιγμα, NA. Η σταθερή γραμμή ακολουθεί τις προσομοιώσεις στο [15].

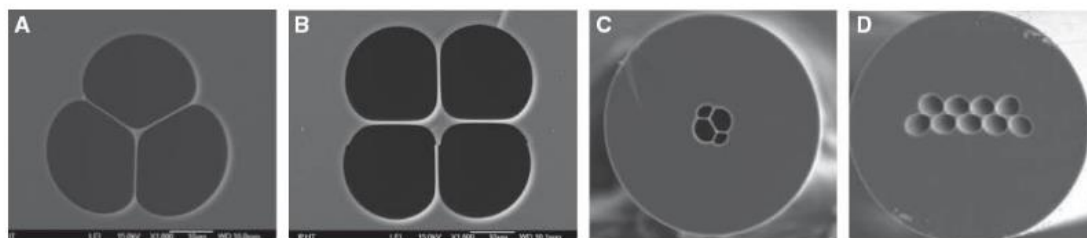
#### Ίνες αιωρούμενου πυρήνα

Οι ίνες αιωρούμενου πυρήνα (SCFs: Suspended core fibers) είναι ένας συγκεκριμένος τύπος MOF με εξαιρετικά μικρούς πυρήνες και σχετικά μεγάλες κοιλότητες. Έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μη γραμμικές εφαρμογές λόγω της μικρής διαμέτρου του πυρήνα και του μεγάλου NA, π.χ. για την παραγωγή υπερκειμένου κενού ή την ενίσχυση RAMAN.

Τέτοιες ίνες είναι επίσης κατάλληλες για την ανίχνευση των υγρών μέσων στη χημική μηχανική και για περιβαλλοντική παρακολούθηση ή βιολογικές έρευνες γεμίζοντας τις κοιλότητες με υγρά ή αέριους αναλύτες. Τα SCF με τρεις και τέσσερις γέφυρες παρασκευάστηκαν ως προσχηματισμός με διάταξη των τριχοειδών λεπτών τοιχωμάτων (διοξείδιο του πυριτίου F300) σε ένα σωλήνα υπερ-επένδυσης. Αυτό το πακέτο στη συνέχεια τραβιέται σε μια ίνα. Εφαρμόζοντας υπερβολική πίεση στις κοιλότητες, μπορεί να ελεγχθεί το πλάτος της γέφυρας.

Σε σύγκριση με τις air clad fibers (βλ. Εικόνα 3.14) και τις τρύπιες δομές που φαίνονται στην εικόνα 3.13, στο SCFs ο πυρήνας σχηματίζεται συνήθως από τη συνένωση των

τριών ή τεσσάρων τριχοειδών αγγείων. Η ίνα τριών κοιλοτήτων στην Εικόνα 3.16 Α έχει πλάτος γέφυρας περίπου 0,8  $\mu\text{m}$ . η ίνα τεσσάρων κοιλοτήτων στην Εικόνα 3.16 Β έχει πλάτος γέφυρας 0,5  $\mu\text{m}$ . Αυτά τα παραδείγματα δείχνουν ότι ένα πάχος γέφυρας μικρότερο από το συνήθως χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος είναι πιθανό.



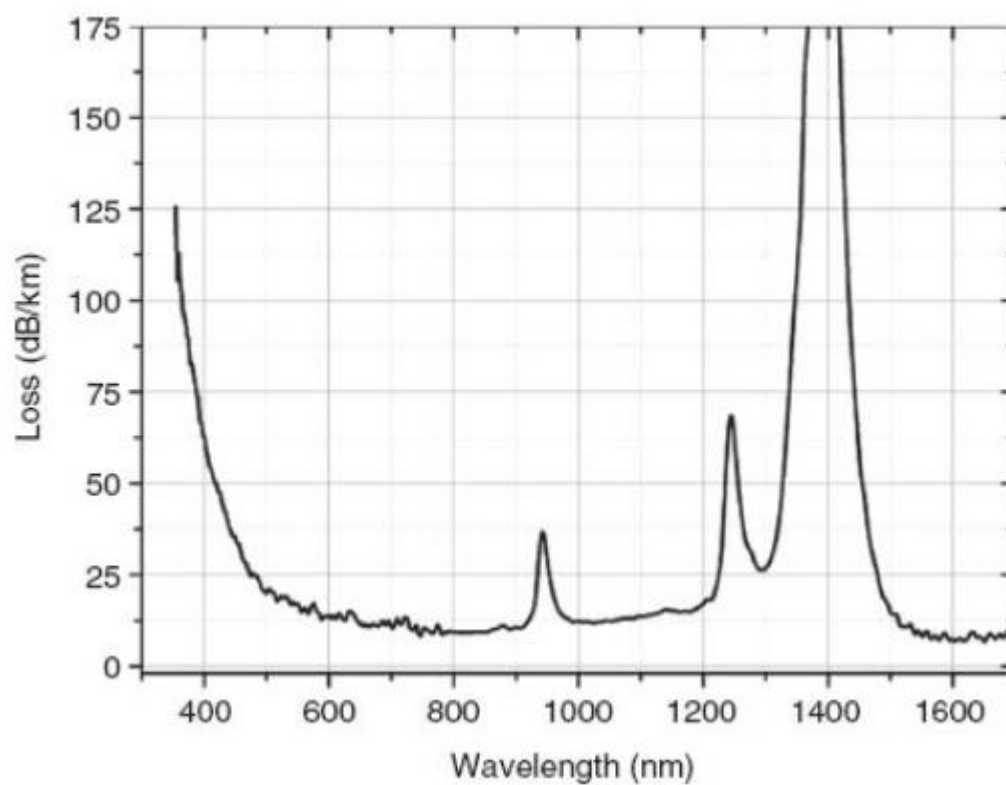
**Εικόνα 3.16 SEM μικρογραφίες SCF τριών και τεσσάρων κοιλοτήτων και αιωρούμενες ίνες πολλαπλών πυρήνων [25].**

Ένας άλλος τύπος SCF είναι η αιωρούμενη πολυπύρηνη ίνα. Εδώ, ένας αριθμός πυρήνων αναστέλλεται, επιτρέποντας τη θερμοκρασία και την ανεξάρτητη από την ενδομετρική ανίχνευση των αποτελεσμάτων στρέψης (Εικόνα 3.16 C) ή την ταυτόχρονη μέτρηση της καμπυλότητας και της καταπόνησης (Εικόνα 3.16 D) μέσω αλληλεπίδρασης του φωτός που καθοδηγείται στους διαφορετικούς πυρήνες [8].

Οι πραγματικές διαμέτροι πυρήνα στις ίνες που φαίνονται είναι 1,3  $\mu\text{m}$  (Εικόνα 3.16 Α) και 5,0  $\mu\text{m}$  (Εικόνα 3.16Β). Η μικρή διάμετρος πυρήνα διασφαλίζει υψηλή επικάλυψη πεδίου λειτουργίας-πεδίου στις τριχοειδείς κοιλότητες (π.χ., για την ανίχνευση απορρόφησης NIR υδρογονανθράκων) [91].

Τα αριθμητικά ανοίγματα είναι 0,68 και 0,50, αντίστοιχα. Η αιωρούμενη ίνα διπλού πυρήνα (Εικόνα 3.16 C) δείχνει μεγέθη πυρήνα 1,5  $\mu\text{m}$  και απόσταση πυρήνα 7,6  $\mu\text{m}$ , όπου η ανίχνευση βασίζεται στη διαφορική οπτική διαδρομή του φωτός στους δύο πυρήνες που σχετίζονται με διαφορά διαθλαστικού δείκτη περίπου  $10^{-3}$  [19]. Χρήση της αιωρούμενης επτά πυρήνων ίνας (Εικόνα 3.16D), η φασματική απόκριση βασίζεται σε πολύπλοκα μοτίβα παρεμβολών.

Τα μεγέθη του πυρήνα είναι συγκρίσιμα με τις ίνες του διπλού πυρήνα και η απόσταση του πυρήνα είναι 9,2  $\mu\text{m}$  [9]. Το τυπικό φάσμα απώλειας μιας αιωρούμενης ίνας πυρήνα με ελάχιστη απώλεια  $<15 \text{ dB / km}$  φαίνεται στο Εικόνα 3.17.



**Εικόνα 3.17 Φάσμα εξασθένησης του SCF τριών κοιλοτήτων [25].**

### 3.4.2. Ίνες μη πυριτίου και υβριδικές με βάση γυαλιά τήξης και τεχνολογία ράβδου σε σωλήνα

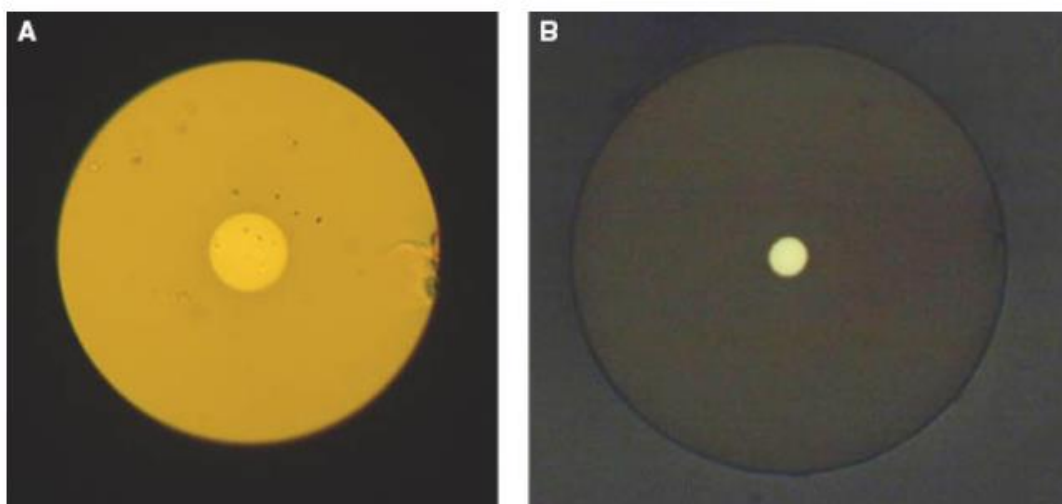
Μία προσέγγιση για την αξιοποίηση των ανώτερων ιδιοτήτων του γυαλιού πυριτίας και της εκτεταμένης διαλυτότητας του RE (ενεργά υλικά) και της υψηλότερης μη γραμμικότητας (παθητικά υλικά) των πυριτικών γυαλιών που περιέχουν λανθάνιο είναι η κατασκευή υβριδικών ινών.

Εδώ, διαφορετικά υλικά συνδυάζονται ως πυρήνας και επένδυση που δεν είναι συμβατά στις θερμο-μηχανικές τους ιδιότητες. Ένας τέτοιος συνδυασμός είναι, για παράδειγμα, ενδιαφέροντος εάν ένα ενεργό υλικό πυρήνα βελτιστοποιημένο για μη γραμμικότητα ή αποτελεσματικότητα επένδυσης ενσωματώνεται σε μια δομή επένδυσης από γυαλί πυριτίας με τις παθητικές και μηχανικές οπτικές του ιδιότητες. Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις για την κατασκευή υβριδικών ινών, όπως η τεχνική πλήρωσης υψηλής πίεσης τριχοειδών ινών και MOFs [8] ή η ταυτόχρονη σχεδίαση διαφορετικών τύπων γυαλιού.

Η πλήρωση υψηλής πίεσης επιτρέπει το συνδυασμό μεγαλύτερης ποικιλίας υλικών αλλά μόνο για μικρά μήκη ινών αρκετών δεκάδων εκατοστών. Η διαδικασία άμεσης σχεδίασης έχει ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερα μήκη ινών, αλλά ισχύει μόνο για χαμηλότερη ποικιλία συνδυασμένων υλικών.

Όπως περιγράφεται προηγουμένως, τα προμορφώματα γυαλιού SAL παρασκευάστηκαν με βάση λιωμένα γυαλιά. Με τον ίδιο τρόπο, παρασκευάστηκαν επίσης σωλήνες επένδυσης με επιπλέον διάτρηση οπών. Ίνες με επένδυση γυαλιού SAL και πυρήνα έχουν παραχθεί χρησιμοποιώντας τεχνολογία ράβδου σε σωλήνα (RIT).

Η αντικατάσταση του γυάλινου σωλήνα επένδυσης SAL με διοξείδιο του πυριτίου παράγει τις λεγόμενες υβριδικές ίνες. Ανάλογα με την απαιτούμενη διατομή ινών (αύξηση στην αναλογία επένδυσης-πυρήνα-διάμετρος (CCDR), οι προδιαμορφώσεις έχουν τραβηχτεί σε καλάμια διαμέτρου 2-3 mm, ακολουθούμενη από ένα επιπλέον βήμα σχεδίασης RIT για το σχηματισμό της τελικής ίνας (Εικόνα 3.18 B).



**Εικόνα 3.18 Δομημένη ίνα με γυάλινο πυρήνα SAL και επένδυση (A), δομημένη υβριδική ίνα με γυάλινο πυρήνα SAL και επένδυση από γυαλί πυριτίας (B) [25].**

Σε μια τέτοια διαδικασία παρασκευής υβριδικών ινών, πολλές απόψεις είναι πολύ δύσκολες: i) το ιξώδες των δύο γυαλιών κατά τη σχεδίαση ινών διαφέρει κατά τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους, ii) ο συντελεστής διαστολής του γυαλιού SAL είναι τουλάχιστον οκτώ φορές υψηλότερος από αυτή της πυριτίας (4 ppm / K έναντι 0,5 ppm / ° K), και iii) μπορεί να συμβούν διαχωρισμοί φάσης που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

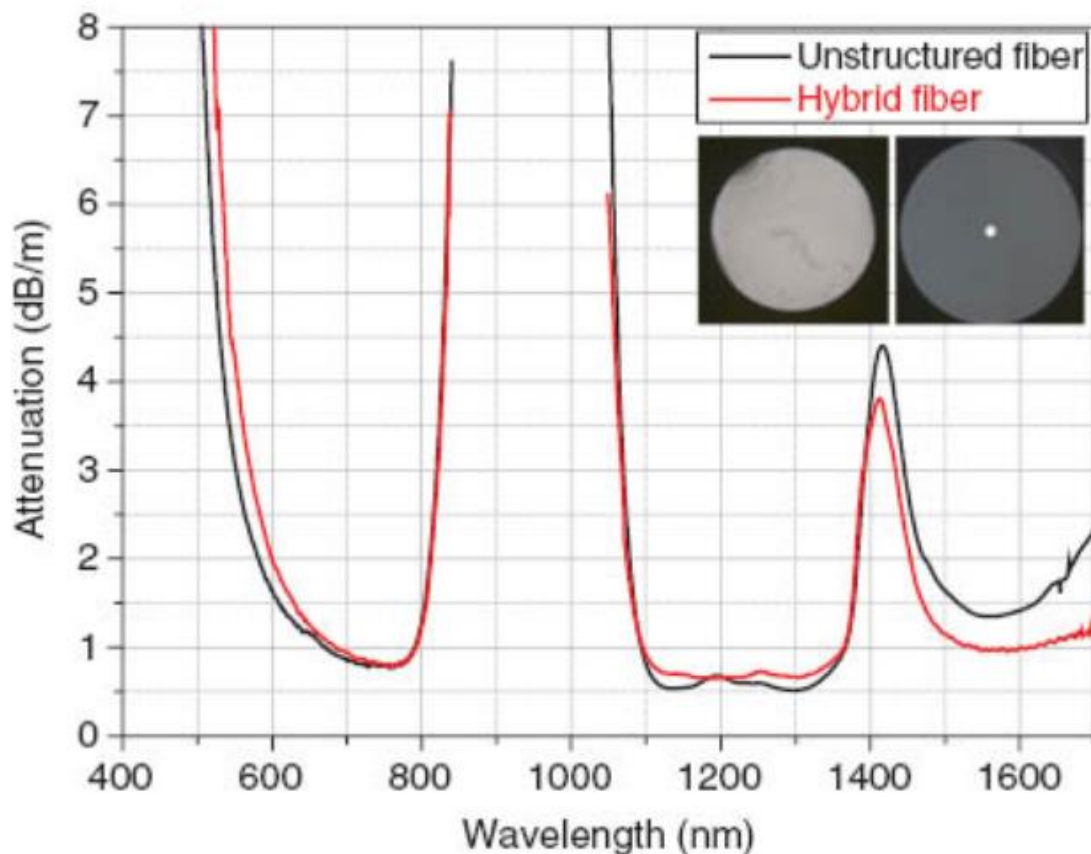
Στο σύστημα  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ο διαχωρισμός φάσης εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε οξείδιο του αργιλίου και τη θερμοκρασία [49]. Στο υλικό σύστημα που περιγράφεται, ο διαχωρισμός φάσης μπορεί να ενισχυθεί με δύο επιπλέον διαδικασίες: codoping (π.χ., με λανθάνιο ή υττέρβιο), και το υλικό ροής / διάχυση του  $\text{SiO}_2$  από την επένδυση διοξειδίου του πυριτίου.

Συγκεκριμένα, ο πιθανός διαχωρισμός φάσεων σε υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του πυριτίου έχει επιπτώσεις στη διαδικασία σχεδίασης ινών και περιορίζει τον πιθανό αριθμό σταδίων επεξεργασίας υψηλής θερμοκρασίας. Επίσης, εάν η διάχυση και ροή υλικού επίδρασης εμπλουτίζουν τον πυρήνα-περιοχή επενδύσεως διεπαφή με  $\text{SiO}_2$ , διαχωρισμός φάσεων γίνεται πολύ πιθανό.

Συνεπώς, σημαντικές εκτιμήσεις για μια διαδικασία κατασκευής υβριδικών ινών περιλαμβάνουν τα ακόλουθα: i) ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής του προμορφώματος στη θερμή ζώνη του κλιβάνου σχεδίασης (αυτό απαιτεί

προμορφώματα μικρής διαμέτρου για τη μείωση του λόγου επιμήκυνσης προ-προς-ίνα), ii) περιορισμός του αριθμού βημάτων θερμής επεξεργασίας, και iii) βελτιστοποίηση της σύνθεσης υάλου πυρήνα για αντιστάθμιση πιθανών διαδικασιών διάχυσης και καταστολής του διαχωρισμού φάσεων.

Όπως φαίνεται από την εικόνα 3.19, οι υβριδικές ίνες δείχνουν σχεδόν τις ίδιες ιδιότητες φασματικής εξασθένησης με τις καθαρές ίνες γυαλιού SAL. Δεν εισάγονται πρόσθετες απώλειες από τη διεπαφή διαφορετικών υλικών. Ωστόσο, οι μετρήσεις του αριθμητικού ανοίγματος έχουν δείξει τιμές με μέγιστο 0,54, το οποίο είναι χαμηλότερο από τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές 0,8. Αυτό οφείλεται στις διαδικασίες διάχυσης του  $\text{SiO}_2$  στο ποτήρι SAL πυρήνα κατά την κατασκευή των ινών όπως αναφέρθηκε παραπάνω.



**Εικόνα 3.19** Σύγκριση των απωλειών ινών από καθαρή ίνα γυαλιού SAL και υβριδικής ίνας (πυριτική επένδυση πυρήνα γυαλιού SAL) [25].

## Συμπεράσματα

Οι οπτικές ίνες σημείωσαν τεράστια επιτυχία στην οπτική επικοινωνία τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Σήμερα παράγονται περισσότερα από 200 εκατομμύρια χιλιόμετρα ινών ετησίως. Τα οπτικά δίκτυα επικοινωνίας αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της σύγχρονης κοινωνίας της πληροφορίας. Η επιτυχία αυτή βασίζεται στην επίτευξη της επιτυχούς ανάπτυξης εξαιρετικών υλικών και στην ικανότητα προσαρμογής δομικών ιδιοτήτων σε σύγχρονες οπτικές ίνες, κυρίως οπτικές ίνες πυριτίας. Η έννοια του καθοδηγούμενου φωτός δίνει στο φως τον περιορισμό της εξαιρετικά υψηλής ποιότητας σε σχεδόν απεριόριστα μήκη. Οι παράμετροι εξασθένησης που επιτεύχθηκαν (π.χ., τόσο χαμηλά όσο 0,17 dB / km στη ζώνη μήκους κύματος των 1550 nm) είναι πολύ κοντά στα φυσικά όρια. Οι διαστατικές δομές ελέγχονται στο εύρος του υπο-μικρομέτρου για τον έλεγχο της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων διασποράς.

Στο πλαίσιο των εξελίξεων επικοινωνίας οπτικών ινών, έχουν προκύψει περαιτέρω ερευνητικοί τομείς. Αυτό περιλαμβάνει ιδίως ενισχυτές ινών, πηγές φωτός ινών (λείζερ ινών, πηγές φωτός υπερκάλυψης ινών) και στοιχεία αισθητήρων ινών. Αυτά τα πεδία εφαρμογής έχουν ενεργοποιήσει εντατικές ερευνητικές δραστηριότητες και παρέχουν μεγάλες ευκαιρίες ανάπτυξης.

Τέτοια αναδυόμενα πεδία εφαρμογής βασίζονται εν μέρει στα καλά ανεπτυγμένα υλικά και τεχνολογίες από ίνες επικοινωνίας, αλλά απαιτούν επίσης νέες και προσαρμοσμένες ιδιότητες οπτικών ινών. Το αυξανόμενο ενδιαφέρον σε τέτοιου είδους νέες εφαρμογές έχει, ως εκ τούτου, ξεκινήσει έρευνα για νέα υάλινα υλικά για οπτικές ίνες, καθώς και για νέες τεχνολογίες επεξεργασίας υλικών για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των σημερινών οπτικών ινών. Οι επιθυμητές λειτουργικές ιδιότητες που αφορούν τη χαμηλή εξασθένιση σε συγκεκριμένα εύρη μήκους κύματος, η διακύμανση του δείκτη διάθλασης, η εισαγωγή ενός μη γραμμικού συντελεστή ή συγκεκριμένων δομικών ιδιοτήτων είναι συχνά πολύ μακριά από τα χαρακτηριστικά των ινών που είναι διαθέσιμες αυτήν τη στιγμή.

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε μια επισκόπηση των τρεχουσών κατευθύνσεων της έρευνας που στοχεύουν στην παροχή μιας πιο εκτεταμένης γκάμας υλικών και συνδυασμών υλικών για χρήση σε καθοδηγούμενα οπτικά. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν διάφορες προσεγγίσεις στην προετοιμασία υλικών και



προδιαμορφωμάτων, νέες μέθοδοι επικάλυψης φάσης αερίου, η έννοια των μικροδομημένων ινών, η διαδικασία σχεδίασης ινών και οι τρέχουσες εξελίξεις στις επικαλύψεις ινών.

Οι ελκυστικές επιλογές εφαρμογής των σύγχρονων οπτικών ινών έχουν ξεκινήσει πολλές καινοτομίες προσανατολισμένες στο υλικό και στη διαδικασία στον τομέα της τεχνολογίας γυαλιού. Σήμερα, έχουν επιτευχθεί ακραίες ιδιότητες σε οπτικές ίνες σχετικά με την καθαρότητα, την ομοιογένεια ή τα δομικά μεγέθη που επιτρέπουν όχι μόνο βελτιστοποιημένη απόδοση σε εφαρμογές επικοινωνίας αλλά και επιτρέπουν περαιτέρω απαιτητικές εφαρμογές, όπως ενισχυτές ινών και λέιζερ ινών ή μικροσκοπικά και κατανεμημένα στοιχεία αισθητήρων. Στην παρούσα εργασία έγινε μια επισκόπηση των προηγμένων συμβατικών τεχνολογιών και καινοτόμων νέων ιδεών για την προετοιμασία υλικών και προμορφωμάτων ινών. Οι προόδοι που επιτυγχάνονται σίγουρα θα βελτιώσουν την ευελιξία της φιλοσοφίας οπτικών ινών (π.χ. για ίνες με ενσωματωμένη λειτουργικότητα) και θα είναι επίσης ελκυστικές για άλλες οπτικές εφαρμογές με βάση το γυαλί.

## Βιβλιογραφία

1. Fadeenko, V. B., Kuts, V. A., Vasiliev, D. A., & Davydov, V. V. (2018, December). New design of fiber-optic communication line for the transmission of microwave signals in the X-band. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1135, No. 1, p. 012053). IOP Publishing.
2. Böcherer, G., Schulte, P., & Steiner, F. (2019). Probabilistic shaping and forward error correction for fiber-optic communication systems. *Journal of Lightwave Technology*, 37(2), 230-244.
3. Grebenikova, N., Davydov, V., Moroz, A., Bylina, M., & Kuzmin, M. (2019, March). Remote control of the quality and safety of the production of liquid products with using fiber-optic communication lines of the Internet. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 497, No. 1, p. 012109). IOP Publishing.
4. Podstrigaev, A. S., Lukyanov, A. S., Smolyakov, A. V., Shishkov, A. N., Davydov, V. V., Glinuchkin, A. P., & Sinicyna, E. A. (2019, December). The research of temperature instability influence of fiber optic communication line in phase direction finder channels on peleng accuracy. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1410, No. 1, p. 012155). IOP Publishing.
5. Moroz, A. V., & Davydov, V. V. (2019, December). Features of transmission bearing and heterodyne receivers for signals in fiber-optic communication line in active phased array antenna. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1410, No. 1, p. 012212). IOP Publishing.
6. Fadeenko, V. B., Pchelkin, G. A., Davydov, V. V., Glinuchkin, A. P., Beloshapkina, O. O., & Rud, V. Y. (2019, December). Features of construction of the scheme of a fiber-optic communication system for transmission of analog signals in the frequency range from 0.135 to 40 GHz. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1410, No. 1, p. 012238). IOP Publishing.
7. Böcherer, G., Steiner, F., & Schulte, P. (2017, September). Fast probabilistic shaping implementation for long-haul fiber-optic communication systems. In *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)* (pp. 1-3). IEEE.
8. Eid, M. M., Seliem, A. S., Rashed, A. N. Z., Mohammed, A. E. N. A., Ali, M. Y., & Abaza, S. S. (2021). High-speed pulse generators with electro-optic modulators based on different bit sequence for the digital fiber optic communication links. *Indones J Electr Eng Comput Sci*, 21, 957-67.
9. Zhang, L. M., & Kschischang, F. R. (2017). Low-complexity soft-decision concatenated LDGM-staircase FEC for high-bit-rate fiber-optic communication. *Journal of Lightwave Technology*, 35(18), 3991-3999.

10. Glazov, A. I., Grigor'ev, V. V., Kravtsov, V. E., Mityurev, A. K., Svetlichnyi, A. B., Savkin, K. B., & Tikhomirov, S. V. (2018). International comparisons of standards in the area of fiber-optic communication and information transmission systems. *Measurement Techniques*, 60(10), 1064-1070.
11. Muhammad, F., Ali, F., Habib, U., Usman, M., Khan, I., & Kim, S. (2020). Time domain equalization and digital back-propagation method-based receiver for fiber optic communication systems. *International Journal of Optics*, 2020.
12. Balaev, R. I., Malimon, A. N., Fedorova, D. M., Kurchanov, A. F., & Troyan, V. I. (2017). Estimation of the precision of transmission of the standard signal of a hydrogen oscillator along a fiber-optic communication line with electronic compensation of disturbances. *Measurement Techniques*, 60(8), 806-812.
13. Jones, R. T., Eriksson, T. A., Yankov, M. P., Puttnam, B. J., Rademacher, G., Luis, R. S., & Zibar, D. (2018). Geometric constellation shaping for fiber optic communication systems via end-to-end learning. *arXiv preprint arXiv:1810.00774*.
14. Fehenberger, T., Millar, D. S., Koike-Akino, T., Kojima, K., & Parsons, K. (2019, March). Partition-based probabilistic shaping for fiber-optic communication systems. In *Optical Fiber Communication Conference* (pp. M4B-3). Optical Society of America.
15. Bogachkov, I. V., & Lutchenko, S. S. (2018, May). Reliability assessment of fiber optic communication lines depending on external factors and diagnostic errors. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1015, No. 2, p. 022005). IOP Publishing.
16. Gladkikh, A. A., Mishin, D. V., & Chilikhin, N. Y. (2018, June). Improving the efficiency of fiber optic communication systems with the use of lexicographic decoding of polar codes. In *Optical Technologies in Telecommunications 2017* (Vol. 10774, p. 1077402). International Society for Optics and Photonics.
17. Schulte, P., Steiner, F., & Bocherer, G. (2017, July). Four-dimensional probabilistic shaping for fiber-optic communication. In *Signal Processing in Photonic Communications* (pp. SpM2F-5). Optical Society of America.
18. Matveeva, T. U., Osadchiy, I. S., & Husnutdinova, M. N. (2017, April). Interactive educational technologies as a method of communicative competency development of optical and fiber optic communication systems specialists. In *Optical Technologies for Telecommunications 2016* (Vol. 10342, p. 103421H). International Society for Optics and Photonics.
19. Davydov, R. V., Saveleiv, I. K., Lenets, V. A., Tarasenko, M. Y., Yalunina, T. R., Davydov, V. V., & Rud, V. Y. (2017). Fiber-optic transmission system for the testing of active phased antenna arrays in an anechoic chamber. In *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems* (pp. 177-183). Springer, Cham.

20. Lutchenko, S. S., & Bogachkov, I. V. (2018, July). Influence of the optical fiber strain on the availability of fiber-optic communication lines. In *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)* (pp. 1-4). IEEE.
21. Naghshvarianjahromi, M., Kumar, S., & Deen, M. J. (2019, June). Smart long-haul fiber optic communication systems using brain-like intelligence. In *2019 16th Canadian Workshop on Information Theory (CWIT)* (pp. 1-6). IEEE.
22. Lau, A. P. T., Khan, F. N., Fan, Q., & Lu, C. (2018, July). Application of machine learning techniques in fiber-optic communication systems. In *Signal Processing in Photonic Communications* (pp. SpW4G-1). Optical Society of America.
23. Fadeenko, V. B., Pchelkin, G. A., Davydov, V. V., & Rud, V. Y. (2019, November). Features of the transmission of microwave signals in the range of 8–12 GHz in the maritime radar station over the fiber-optic communication line. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1400, No. 4, p. 044010). IOP Publishing.
24. Lutchenko, S. S., Bogachkov, I. V., & Kopytov, E. Y. (2017, November). Assessment of fiber optic communication lines reliability with an account of external factors influence. In *2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)* (pp. 1-5). IEEE.
25. De Gruyter, Wei Gao, Bernd Bodermann (2012). *Advanced Optical Technologies. Optical metrology for precision engineering* (Vol.3, No. 4). European Optical Society (EOS).