



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ,
ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ

Έλεγχος ποιότητας οπτικών υλικών Διπλοθλαστικότητα

**Εργαστηριακή άσκηση
στο πλαίσιο του μαθήματος
Οπτική και Εφαρμογές**

Κ. Γαζέας - Δ. Παπαθανάσογλου

Αθήνα, Μάιος 2014

Σκοπός της άσκησης

Σκοπός της εργαστηριακής άσκησης είναι η γνωριμία με τα βασικά οπτικά υλικά και κυρίως το γυαλί, το οποίο αποτελεί την ακρογωνιαία λίθο των οπτικών οργάνων. Το κείμενο που ακολουθεί είναι μια σύντομη περιγραφή των πειραμάτων που θα εκτελεστούν στο εργαστήριο και του απαραίτητου θεωρητικού υποβάθρου.

Ένα οπτικό υλικό π.χ. το γυαλί πρέπει να είναι ομογενές ως προς το δείκτη διάθλασης και μη διπλοθλαστικό. Οι εξαιρέσεις στους κανόνες αυτούς είναι λίγες και αφορούν ειδικές εφαρμογές, όπως η χρήση διπλοθλαστικών κρυστάλλων για την κατασκευή πολωτικών στοιχείων, τα υαλοκεραμικά (ημικρυσταλλικά) υλικά και η χρήση υάλων με ελεγχόμενα μεταβαλλόμενο δείκτη διάθλασης (GRIN) σε οπτικές ίνες και σε ειδικούς φακούς.

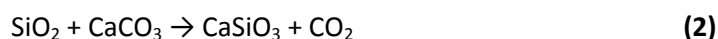
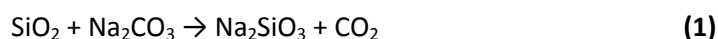
Η άσκηση περιλαμβάνει τις ακόλουθες ενότητες:

- 1) Προβολή διαφανειών από τη βιομηχανική παραγωγή οπτικού γυαλιού.
- 2) Επίδειξη και αναγνώριση διαφόρων ειδών υάλων και κρυστάλλων καθώς και πρώτων υλών υαλουργίας.
- 3) Βασικά πειράματα διπλοθλαστικότητας με κρυστάλλους ασβεστίτη.
- 4) Μέτρηση της διπλοθλαστικότητας και αξιολόγηση δειγμάτων οπτικών υλικών και στοιχείων, με πολωμένο φως.
- 5) Εκτέλεση του πειράματος ελέγχου της ομογένειας οπτικού υλικού (μέθοδος των Schlieren).

Σύνθεση και κατασκευή του γυαλιού

Το γυαλί δεν είναι μια χημική ένωση αλλά είναι ένα μίγμα διαφόρων πυριτικών αλάτων και διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2), που μπορεί να χαρακτηριστεί σαν υγρό με εξαιρετικά μεγάλο συντελεστή ιξώδους. Δεν είναι κρυσταλλικό αλλά άμορφο σώμα και δεν έχει συγκεκριμένο σημείο τήξης, αλλά καθώς αυξάνει η θερμοκρασία του διαρκώς μαλακώνει.

Το κοινό γυαλί παρασκευάζεται μέσα σε καμίνια θερμοκρασίας 1200-1600 C με σύντηξη καθαρής πυριτικής άμμου SiO_2 , σόδας (Na_2CO_3) και μαρμάρου ή ασβεστόλιθων (CaCO_3). Κατά τη σύντηξη γίνονται οι αντιδράσεις:



Ενώ στο τελικό μίγμα υπάρχει περίσσεια SiO_2 . Έτσι το κοινό γυαλί έχει κατά προσέγγιση τη σύσταση $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 5\text{SiO}_2$

Η σόδα, το μάρμαρο και το διοξείδιο του πυριτίου είναι δυνατόν να αναμιχθούν και σε διάφορες άλλες αναλογίες ή να αντικατασταθούν από άλλες χημικές ενώσεις, οπότε προκύπτουν διάφορες ποικιλίες γυαλιού, οι οποίες διαφέρουν ως προς το ειδικό βάρος, την αντοχή σε κρούσεις, και χημικές επιδράσεις, το δείκτη διάθλασης τη διαπερατότητα στο φως κτλ. Η σόδα για παράδειγμα μπορεί να αντικατασταθεί από ποτάσα (K_2CO_3) οπότε παίρνουμε την ύαλο Βοημίας, το μάρμαρο από μίνιο (Pb_3O_4) οπότε παίρνουμε το κρύσταλλο κτλ.

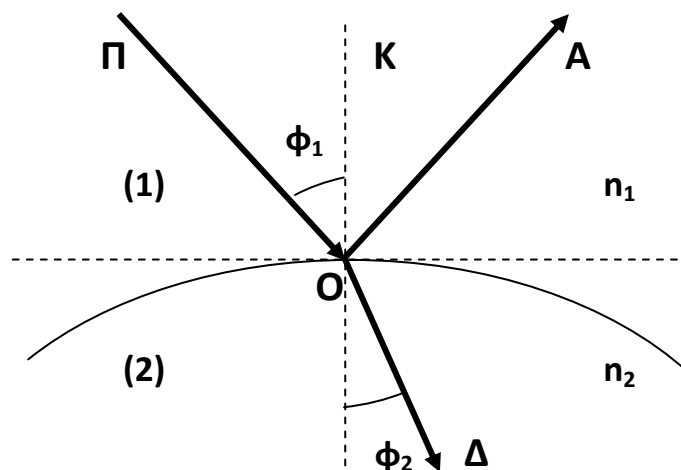
Τα οπτικά γυαλιά ειδικότερα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τη **στεφανύαλο (crown glass)** οι οποίες περιέχουν SiO_2 σε μεγάλη αναλογία και άλλα οξείδια αλλά όχι μόλυβδο και την **πυριτύαλο (flint glass)** που περιέχει SiO_2 σε μικρή αναλογία και οπωσδήποτε μόλυβδο (μέσω του οξειδίου του, Pb_3O_4) σε διάφορες αναλογίες, καθώς και άλλα οξείδια. Η στεφανύαλος είναι σχετικά σκληρή και διαυγής ενώ η πυριτύαλος είναι μαλακότερη, έχει ελαφρά κίτρινη χροιά όταν έχει μεγάλη ποσότητα μολύβδου, αλλά έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης και μεγαλύτερο συντελεστή διασκεδασμού.

Το χρωματιστό γυαλί παράγεται με προσθήκη μικρών ποσοτήτων διαφόρων οξειδίων μετάλλων ή μετάλλων σε μορφή κολλοειδών στο αρχικό μίγμα. Για παράδειγμα η πράσινη χροιά του φθηνού γυαλιού οφείλεται στην ύπαρξη μικρών ποσοτήτων Fe_2O_3 που περιέχονται στην άμμο.

Το γυαλί που χρησιμοποιείται για την κατασκευή οπτικών στοιχείων, φακών πρισμάτων και άλλων οπτικών εξαρτημάτων πρέπει να έχει τις εξής οπτικές ιδιότητες: 1) να είναι ομοιογενές 2) να είναι διαυγές 3) να έχει καθορισμένο δείκτη διάθλασης 4) να έχει καθορισμένο συντελεστή διασκεδασμού 5) να είναι άχρωμο 6) να μην έχει εσωτερικές τάσεις. Επίσης πρέπει να είναι χημικά σταθερό και να είναι σκληρό.

Διάθλαση και διασκεδασμός στα οπτικά υλικά

Είναι γνωστό ότι όταν μια μονοχρωματική ακτίνα φωτός συναντήσει μια επιφάνεια διαχωρισμού δυο διαφανών υλικών (δίοπτρο) με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2 μέρος αυτής ανακλάται και μέρος διαθλάται (Εικόνα 1). Η προσπίπτουσα ακτίνα ΠΟ και η κάθετη γραμμή στη διαχωριστική επιφάνεια ΚΟ ορίζουν το επίπεδο πρόσπτωσης.



Εικόνα 1. Κατά την πρόσπτωση μιας ακτίνας φωτός (ΠΟ) σε μια διαχωριστική επιφάνεια (δίοπτρο), μέρος της ακτίνας ανακλάται (ΟΑ) και μέρος της διαθλάται (ΟΔ). Οι γωνία ανάκλασης είναι ίδια με τη γωνία πρόσπτωσης (ϕ_1) και η γωνία διάθλασης (ϕ_2) υπακούει το νόμο του Snell. Όλες οι γωνίες μετρώνται από την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης.

Ισχύουν οι ακόλουθοι νόμοι:

- 1) η ανακλώμενη ΟΑ και η διαθλώμενη ΟΔ ακτίνα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο πρόσπτωσης
- 2) η γωνία πρόσπτωσης $\text{ΠΟΚ} = \phi_1$ είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης ΚΟΑ
- 3) η γωνία πρόσπτωσης ϕ_1 και η γωνία διάθλασης ϕ_2 συνδέονται με τη σχέση:

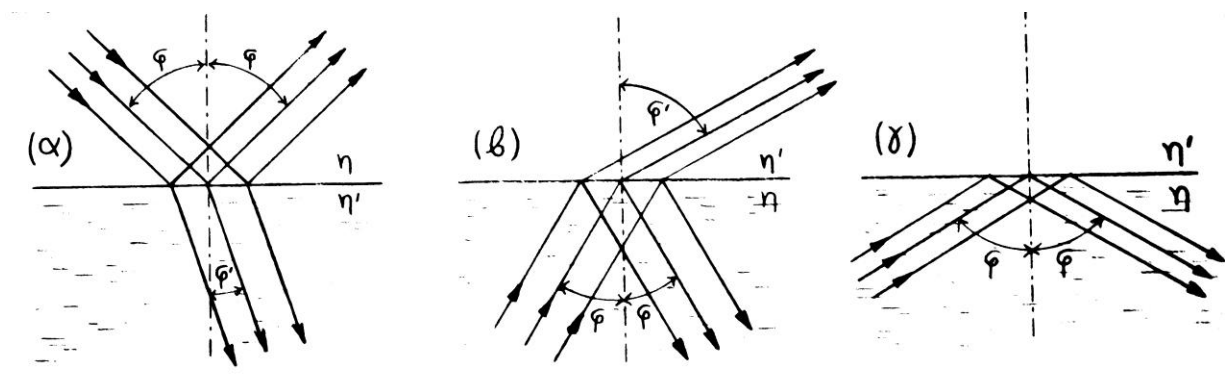
$$\frac{\eta\mu\phi_1}{\eta\mu\phi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{νόμος του Snell}) \quad (3)$$

Ο λόγος $n_2/n_1 = v_1/v_2$ (όπου v_1 και v_2 οι ταχύτητα του φωτός στο αντίστοιχο μέσο) ονομάζεται σχετικός δείκτης διάθλασης του μέσου 2 ως προς το μέσο 1 και μπορεί να είναι μικρότερος της μονάδας.

Οι απόλυτοι δείκτες διάθλασης των οπτικών υλικών κυμαίνονται συνήθως στο διάστημα $1 < n < 3$.

Είναι προφανές ότι η γωνία διάθλασης είναι ανάλογη της γωνία πρόσπτωσης. Από τον τριγωνομετρικό περιορισμό του ημιτόνου ($\eta\mu\phi \leq 1$) προκύπτει ένας περιορισμός στις γωνίες, ώστε να υπάρχει διάθλαση σε μια διαχωριστική επιφάνεια.

Αυτό που συμβαίνει στην πράξη είναι ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται στην διαχωριστική επιφάνεια (Εικόνα 2). Έτσι, όταν η τριγωνομετρική συνθήκη ικανοποιείται έχουμε και τα δύο φαινόμενα, ενώ όταν δεν ικανοποιείται έχουμε μόνο το ένα. Όταν δεν ικανοποιείται η συνθήκη (όταν για παράδειγμα το φως διέρχεται από ένα οπτικά πυκνότερο υλικό σε ένα οπτικά αραιότερο) έχουμε ολική ανάκλαση στην επιφάνεια του διόπτρου χωρίς καθόλου διάθλαση. Για παράδειγμα όταν βρισκόμαστε μέσα στο νερό και κοιτούμε στην επιφάνεια με μεγάλη γωνία βλέπουμε ολική ανάκλαση στο εσωτερικό της επιφάνειας του νερού. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό διεθνώς ως Total Internal Reflection - TIR. Η οριακή τιμή της γωνίας στην οποία σταματά η διάθλαση και έχουμε ολική ανάκλαση λέγεται οριακή γωνία. Είναι αξιοσημείωτη η διαπίστωση ότι η ολική ανάκλαση δε συμβαίνει ακριβώς στη γεωμετρική επιφάνεια του διόπτρου, αλλά το φως εισχωρεί κατά ένα πολύ μικρό μήκος μέσα στο αραιότερο υλικό, με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ακτίνα να έχει μια μικρή παράλληλη μετατόπιση ως προς τη θέση που θα είχε εάν πάθαινε ολική ανάκλαση από κατοπτρική επιφάνεια (φαινόμενο Goos-Hänchen). Το κύμα που βγαίνει έξω από το όριο του μέσου ονομάζεται λανθάνον κύμα (evanescent wave).



Εικόνα 2. Διάθλαση με ανάκλαση (α,β) και ολική ανάκλαση (γ).

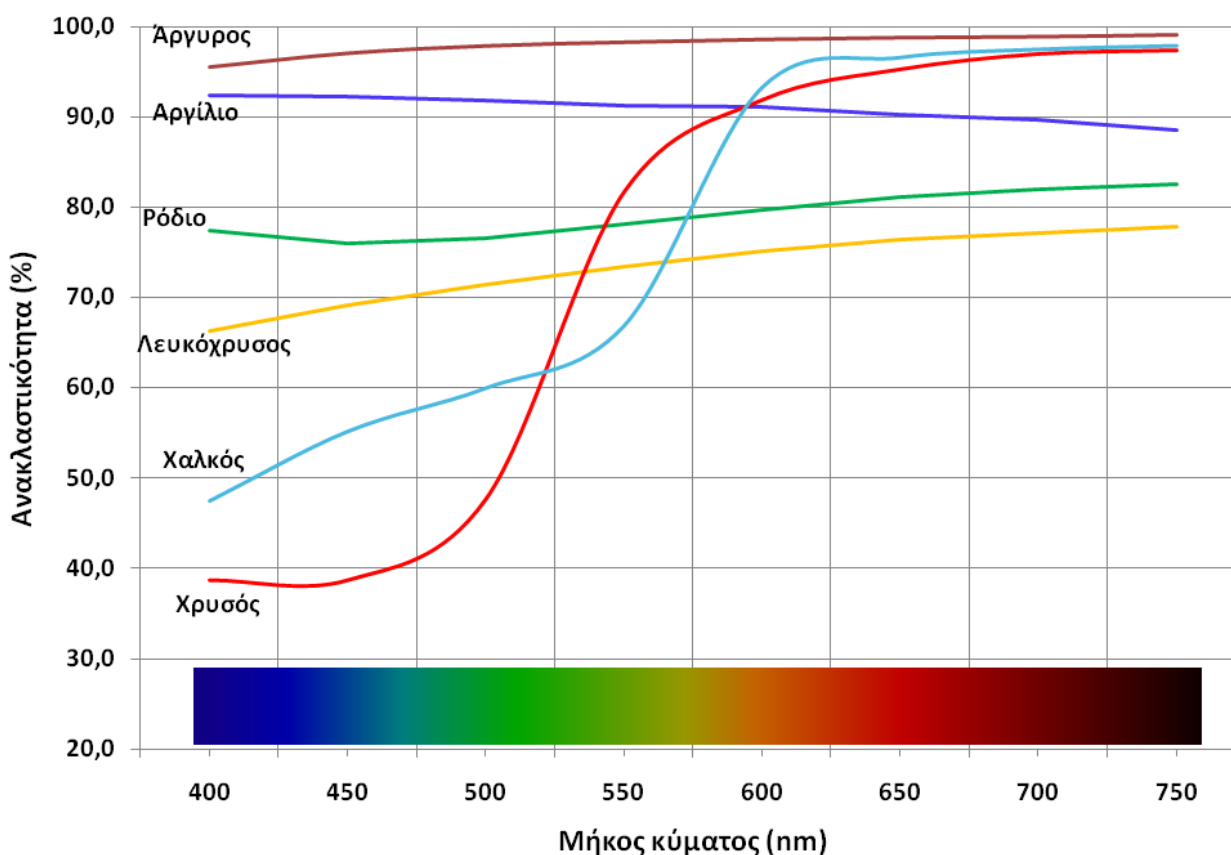
Την ολική ανάκλαση σε επίπεδο δίοπτρο εκμεταλλεύονται τα πρίσματα, τα οποία χρησιμοποιούνται σε πολλές οπτικές εφαρμογές. Η χρήση των πρισμάτων για την εκτροπή του φωτός πλεονεκτεί έναντι της χρήσης κατόπτρων διότι:

1) στην ολική ανάκλαση ανακλάται το σύνολο του φωτός που προσπίπτει, ενώ η μεταλλική επιφάνεια των κατόπτρων απορροφά και διαχέει μέρος του φωτός. Η ανάκλαση στα κάτοπτρα που έχουν μεταλλική επίστρωση μπορεί να φτάσει μέχρι κι το 92% για το αλουμίνιο (αργίλιο), το 98% για το ασήμι (άργυρος) και το 90-97% για το χρυσό. Η ανακλαστική ικανότητα των μεταλλικών επιστρώσεων είναι συνάρτηση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας και έτσι οι επιστρώσεις που προτιμούνται σε κάθε περίπτωση είναι ανάλογη της χρήσης (Εικόνα 3). Μικρό ποσοστό του φωτός απορροφάται και από τα πρίσματα, αλλά η διαύγεια των σημερινών πρισμάτων, καθώς και οι αντανάκλαστικές τους επιστρώσεις, κάνουν τις απώλειες μηδαμινές.

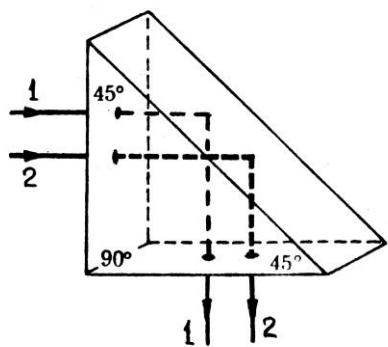
2) το πρίσμα δεν αλλοιώνεται με το χρόνο, σε αντίθεση με τη μεταλλική επίστρωση των κατόπτρων.

3) ο χειρισμός του πρίσματος είναι πιο εύκολος λόγω των διαστάσεών του και είναι ασφαλέστερος σε αντίθεση με το κάτοπτρο, του οποίου η επιφάνεια καταστρέφεται εύκολα.

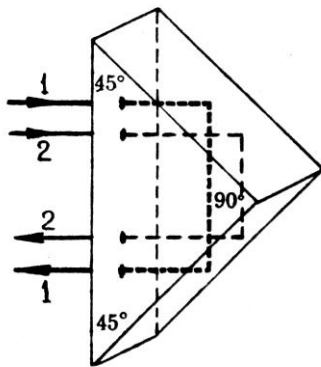
4) η μεγάλη ποικιλία πρισμάτων (Εικόνα 4) προσφέρει εκτός από την ανάκλαση και τη δυνατότητα της αντιστροφής του ειδώλου ή της περιστροφής του γύρω από έναν άξονα.



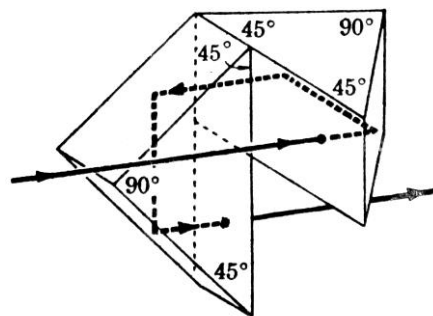
Εικόνα 3. Η ανακλαστική ικανότητα των κατόπτρων εξαρτάται από την μεταλλική επίστρωση. Διαφορετικά μέταλλα έχουν διαφορετικές ανακλαστικές ιδιότητες κατά μήκος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.



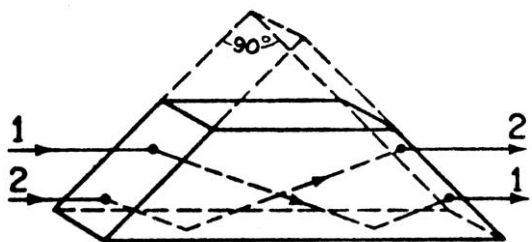
(α) Πρίσμα εκτροπής 90°



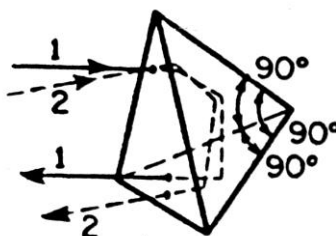
(β) Πρίσμα Porro



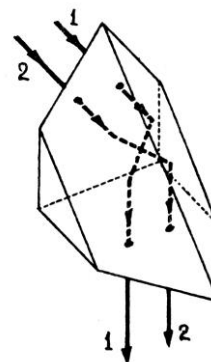
(γ) Σύνθετο πρίσμα Porro



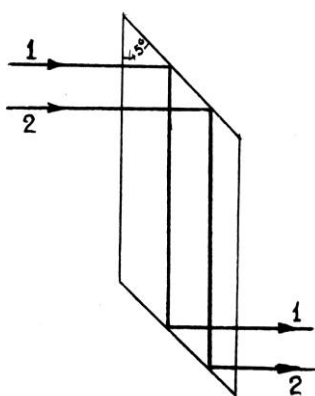
(δ) Πρίσμα Dove



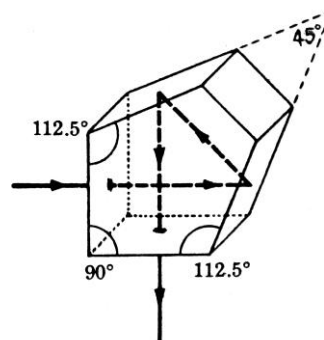
(ε) "Τριπλό κάτοπτρο"
(corner cube ή retroreflector)



(στ) Πρίσμα Amici



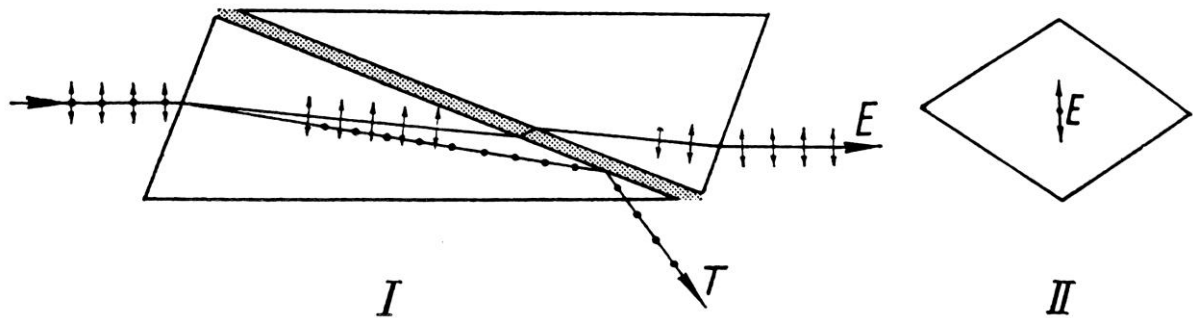
(ζ) Ρομβοειδές πρίσμα



(η) Πεντάπρισμα

Εικόνα 4. Διάφορα πρίσματα ολικής ανάκλασης.

Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφαρμογή της οριακής γωνίας είναι το πρίσμα Nicol (Εικόνα 5). Το πρίσμα αυτό αποτελείται από δύο κρυστάλλους ασβεστίτη (CaCO_3) τοποθετημένους σε κατάλληλη γωνία, ώστε η τακτική ακτίνα να ανακλάται ολικά στην ενδιάμεση επιφάνεια και να εξέρχεται από τον κρύσταλλο, ενώ η έκτακτη να διέρχεται κανονικά από τον κρύσταλλο και να εξέρχεται παράλληλα με την αρχική εισερχόμενη δέσμη. Τα δύο τμήματα του κρυστάλλου είναι κολλημένα μεταξύ τους με βάλσαμο του Καναδά (υλικό με μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον κρύσταλλο). Το πρίσμα αυτό μπορεί επομένως να απομονώσει μόνο τη μία ακτίνα φωτός, η οποία είναι γραμμικά πολωμένη.



Εικόνα 5. Πρίσμα Nicol σε εγκάρσια και διαμήκη τομή.

Ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού είναι συνάρτηση του μήκος κύματος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό. Έχει καθιερωθεί να δίνονται οι δείκτες διάθλασης ενός υλικού για ορισμένες φασματικές γραμμές του ηλιακού φάσματος, οι οποίες είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστικές. Αυτές είναι οι γραμμές F(κυανό), D(πράσινο) και C (ερυθρό), οι οποίες αντιστοιχούν στα μήκη κύματος 486.13 nm, 589.29 nm και 656.28 nm, δηλαδή τις χαρακτηριστικές γραμμές απορρόφησης του υδρογόνου H_β , του νατρίου Na (μέση τιμή των δύο χαρακτηριστικών γραμμών απορρόφησης) και του υδρογόνου H_α αντίστοιχα.

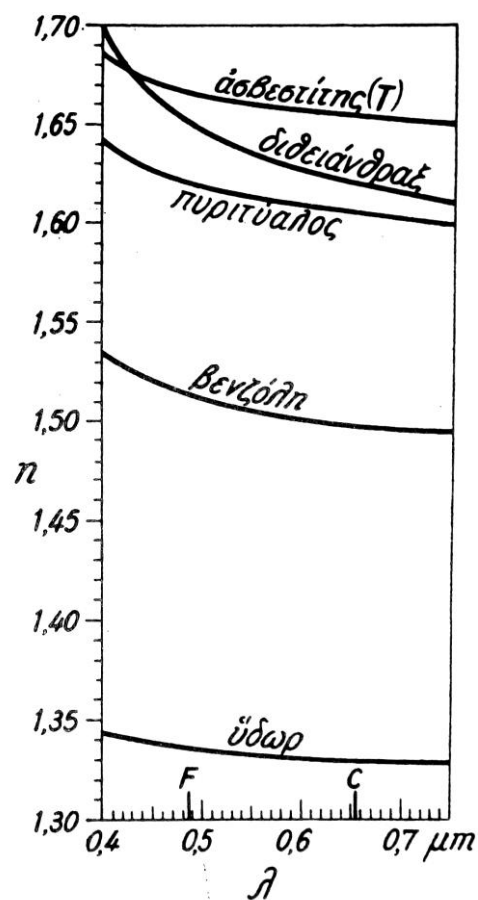
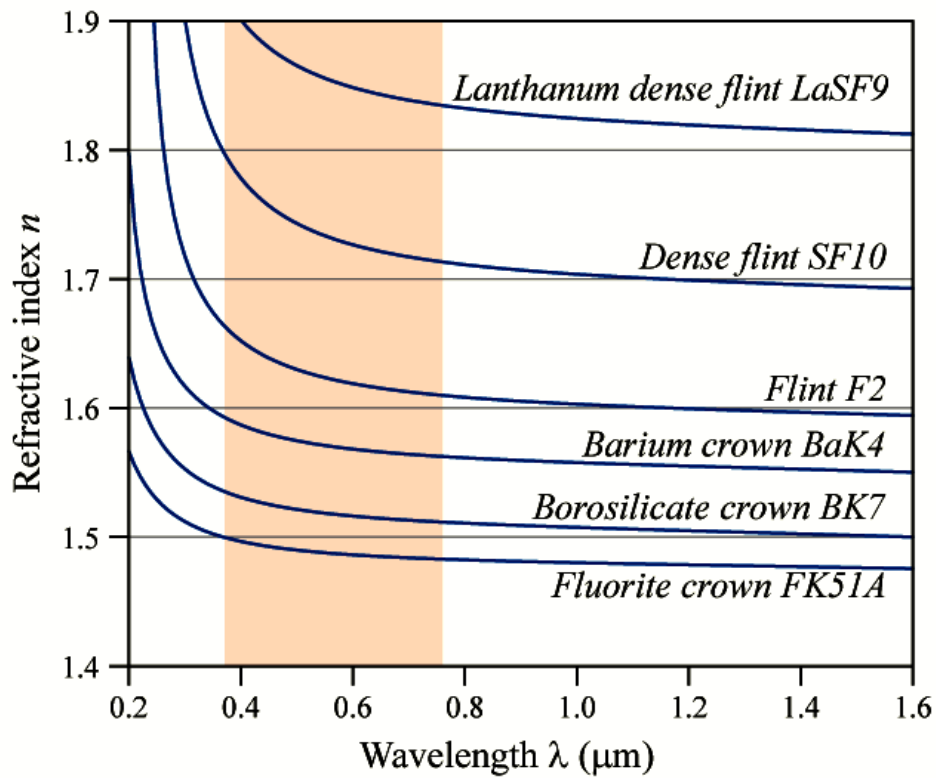
Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης συναρτηθεί του μήκους κύματος λ , δηλαδή η ποσότητα $dn/d\lambda$ ονομάζεται διασκεδασμός του υλικού για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ και η συνάρτηση $n=\phi(\lambda)$ ονομάζεται συνάρτηση (ή καμπύλη) διασκεδασμού (Εικόνα 6).

Ειδικά για την περίπτωση της ανάλυσης του φωτός από λεπτό πρίσμα, η οποία έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την εφαρμοσμένη οπτική, η γωνία που σχηματίζουν οι εξερχόμενες χαρακτηριστικές ακτίνες F(κυανό) και C(ερυθρό) δηλαδή η ποσότητα $\epsilon_F - \epsilon_C$ (Εικόνα 7) αποδεικνύεται ότι είναι ανάλογη της διαφοράς $n_F - n_C$, η οποία ονομάζεται μέσος διασκεδασμός.

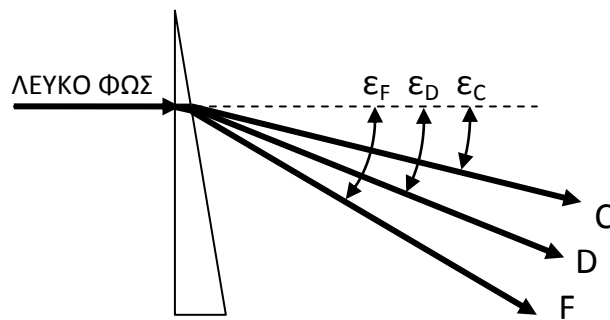
Από την ίδια σχέση προκύπτει ότι η μέση εκτροπή της εξερχόμενης δέσμης (που λαμβάνεται ίση με την εκτροπή της ακτίνας D δηλαδή η γωνία ϵ_D , είναι ανάλογη του $n_D - 1$. Ο λόγος $(n_F - n_C)/(n_D - 1)$ ονομάζεται ισχύς διασκεδασμού και το αντίστροφό του:

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (4)$$

Ονομάζεται συντελεστής διασκεδασμού ή αριθμός Abbe.



Εικόνα 6. (επάνω): Καμπύλες διασκεδασμού μερικών οπτικών υλικών. Η περιοχή του ορατού φαίνεται σκιασμένη. (κάτω): Καμπύλες διασκεδασμού για διάφορα στερεά και υγρά.



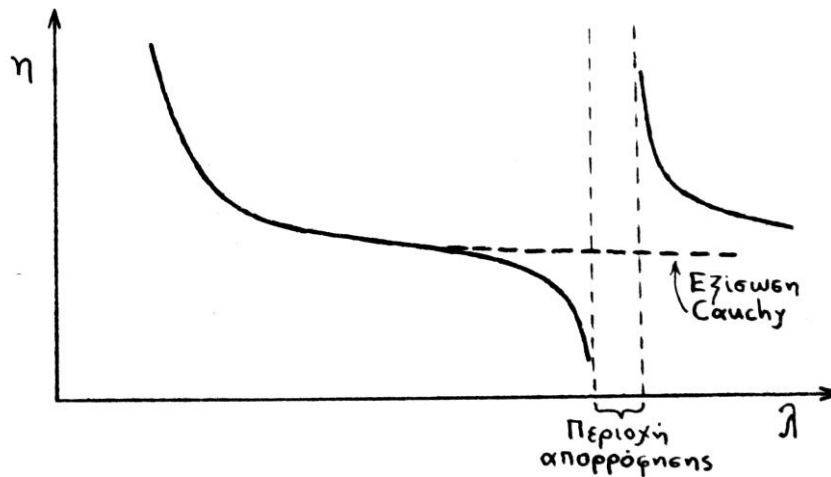
Εικόνα 7. Η γωνία που σχηματίζουν οι εξερχόμενες ακτίνες στα διάφορα χρώματα είναι συνάρτηση του μήκος κύματός τους.

Από τη μελέτη των καμπύλων διασκεδασμού διαφόρων υλικών προκύπτουν οι εξής κανόνες:

- 1) ο δείκτης διάθλασης αυξάνει προς τα μικρότερα μήκη κύματος
- 2) η κλίση $dn/d\lambda$ της καμπύλης (δηλαδή ο διασκεδασμός) αυξάνει κατά απόλυτη τιμή προς τα μικρότερα μήκη κύματος
- 3) υλικά με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης σε ορισμένο μήκος κύματος παρουσιάζουν μεγαλύτερη κλίση της καμπύλης διασκεδασμού στο μήκος κύματος αυτό, δηλαδή μεγαλύτερο διασκεδασμό
- 4) η καμπύλη διασκεδασμού ενός υλικού δεν μπορεί να ταυτιστεί με την καμπύλη άλλου υλικού αν κάνουμε παράλληλη μετατόπιση ούτε αν αλλάξουμε τις κλίμακες των αξόνων
- 5) όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ενός οπτικού μέσου τόσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης διάθλασης και ο διασκεδασμός του.

Οι κανόνες αυτοί έχουν αρκετές εξαιρέσεις. Για όλα όμως τα διαφανή υλικά που δεν είναι χρωματισμένα, η καμπύλη διασκεδασμού δεν παρουσιάζει ασυνέχειες στην ορατή περιοχή, το εγγύς υπεριώδες και το εγγύς υπέρυθρο. Η περίπτωση αυτή χαρακτηρίζεται ως κανονικός (ομαλός) διασκεδασμός. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που η καμπύλη διασκεδασμού παρουσιάζει ασυνέχειες και τότε λέμε ότι έχουμε ανώμαλο διασκεδασμό.

Ανώμαλος διασκεδασμός στο ορατό φάσμα συμβαίνει σε ορισμένες χρωστικές ουσίες και ατμούς, π.χ. στη φουξίνη, και στους ατμούς του νατρίου και του ιωδίου, στις περιοχές μηκών κύματος όπου τα υλικά αυτά παρουσιάζουν απορρόφηση (Εικόνα 8) τα άχρωμα οπτικά υλικά παρουσιάζουν επίσης ανώμαλο διασκεδασμό αλλά στις αόρατες φασματικές περιοχές, όπου αυτά απορροφούν.



Εικόνα 8. Τυπική καμπύλη ανώμαλου διασκεδασμού.

Τη μορφή της καμπύλης του ομαλού διασκεδασμού ενός υλικού μπορούμε να την προσεγγίσουμε ικανοποιητικά με την εμπειρική εξίσωση του Cauchy:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (5)$$

Όπου A, B, C είναι σταθερές που χαρακτηρίζουν το υλικό.

Είναι φανερό ότι για να βρούμε τις τιμές των σταθερών αυτών πρέπει να γνωρίζουμε τους δείκτες διάθλασης του υλικού σε τρία μήκη κύματος. Κατόπιν μπορούμε από την Εξίσωση (5) να προσδιορίσουμε το n για κάθε άλλο μήκος κύματος, πράγμα που είναι πρακτικά χρήσιμο. Όταν δε χρειαζόμαστε μεγάλη ακρίβεια, μπορούμε να περιοριστούμε στους δύο πρώτους όρους, οπότε έχουμε:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (6)$$

και με διαφόριση:

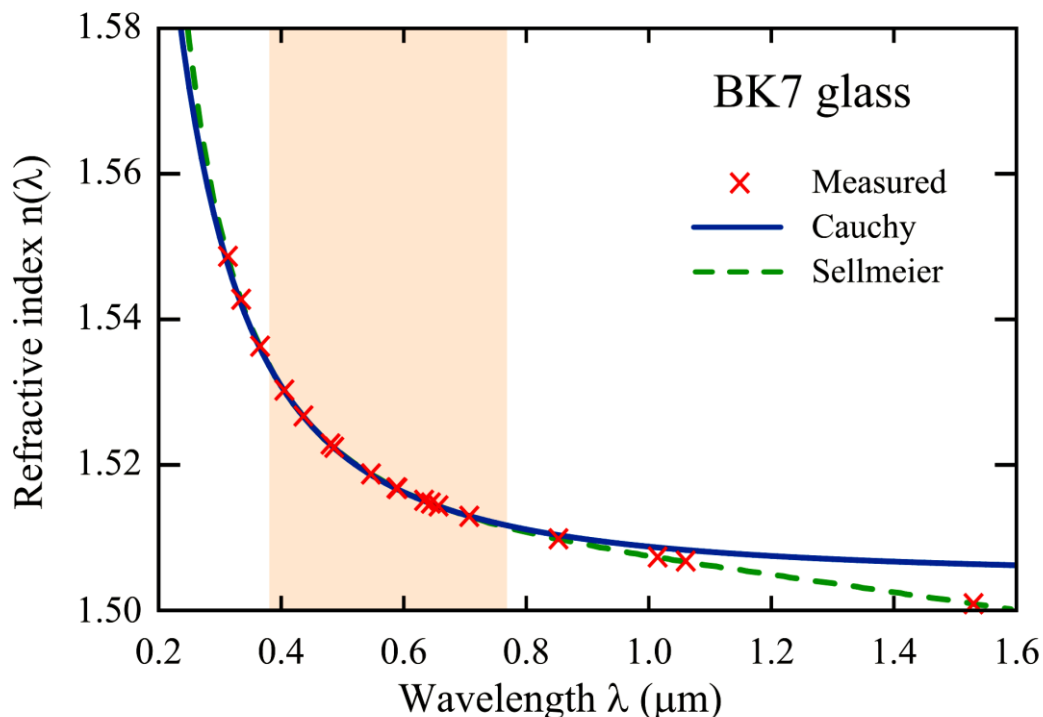
$$\frac{dn}{d\lambda} = -\frac{2B}{\lambda^3} \quad (7)$$

Βλέπουμε δηλαδή ότι ο διασκεδασμός μεταβάλλεται (κατά προσέγγιση) αντιστρόφως ανάλογα του κύβου του μήκους κύματος.

Ακριβέστερη εμπειρική εξίσωση διασκεδασμού είναι η εξίσωση Sellmeier, η οποία είναι ελαφρώς πιο πολύπλοκη:

$$n^2 = 1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3} \quad (8)$$

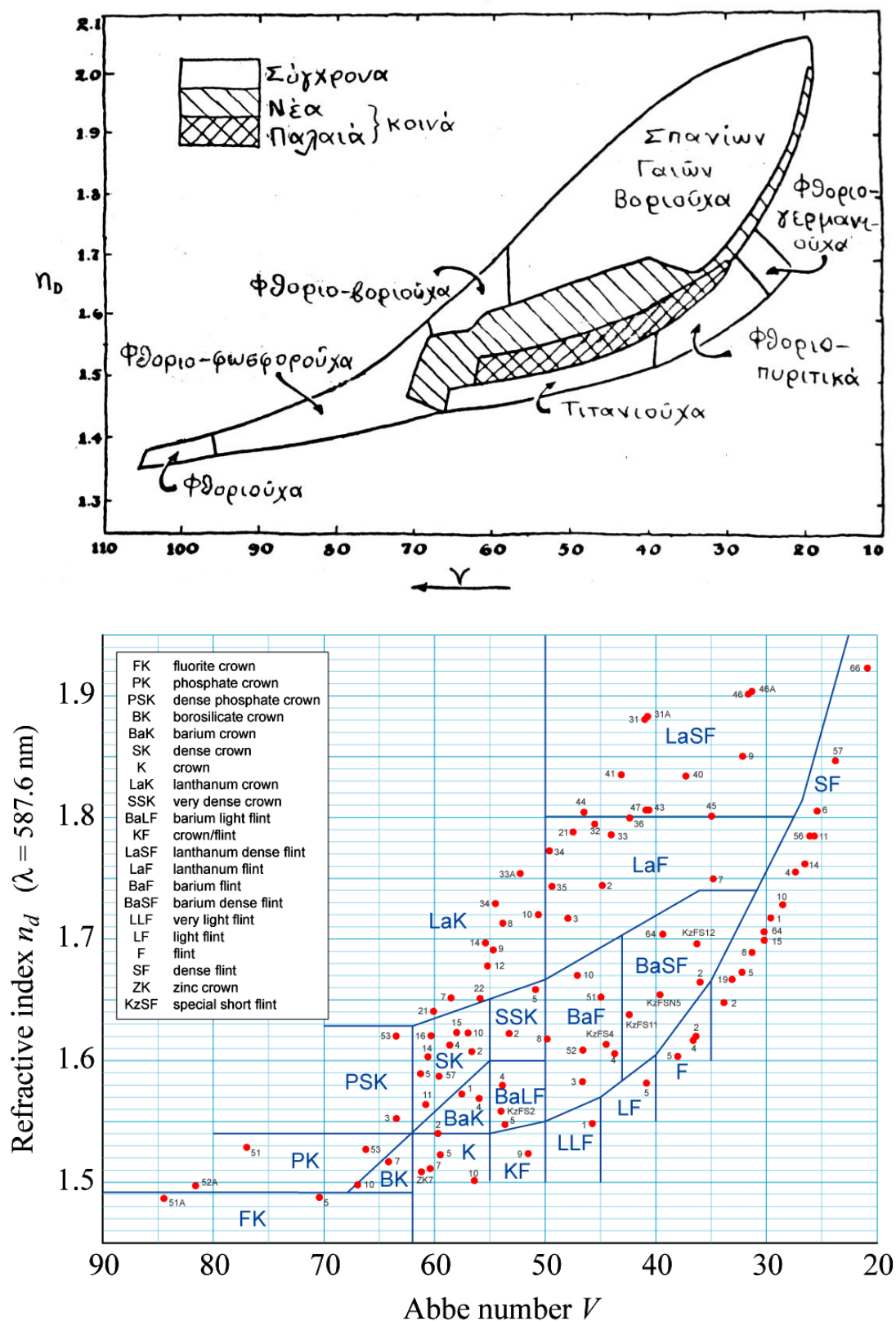
Στην πράξη, οι διαφορές των δύο παραπάνω εμπειρικών νόμων φαίνονται μόνο σε ακραίες τιμές μηκών κύματος (Εικόνα 9). Στην περιοχή του ορατού οι δύο σχέσεις δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, και θεωρούνται εξίσου αποδεκτές.



Εικόνα 9. Τυπική καμπύλη διασκεδασμού για το οπτικό γυαλί BK7 και η σύγκριση των πειραματικών τιμών του δείκτη διάθλασης με αυτές που προβλέπονται από τους εμπειρικούς νόμους του Cauchy και Sellmeier.

Το διάγραμμα n_D - v

Αν κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα n_D - v θα διαπιστώσουμε ότι τα παλιά γυαλιά (μέχρι το 1884), τα νέα (μέχρι το 1943) και τα σύγχρονα θα καταλάβουν καθορισμένες περιοχές του διαγράμματος (Εικόνα 10). Οι παλιές και οι νέες ποικιλίες χαρακτηρίζονται σαν κοινά οπτικά γυαλιά. Το διάγραμμα n_D - v είναι χρήσιμος οδηγός για τη σχεδίαση οπτικών συστημάτων. Με τη βοήθεια του διαγράμματος αυτού κατασκευάστηκε ένα πλήθος οπτικών γυαλιών με πολύτιμες ιδιότητες. Στην προσπάθεια αυτή δοκιμάστηκαν συστηματικά όλα τα στοιχεία του Περιοδικού Πίνακα που είναι κατάλληλα για υαλοποίηση και λίγα πλέον απομένουν να γίνουν στην περιοχή αυτή της έρευνας.



Εικόνα 10. (επάνω): Το διάγραμμα n_D - V των οπτικών γυαλιών, όπου διακρίνονται οι περιοχές των παλαιών και νέων γυαλιών. (κάτω): το ίδιο διάγραμμα με πιο λεπτομερείς τις θέσεις των πιο γνωστών οπτικών γυαλιών (υαλουργία Schott).

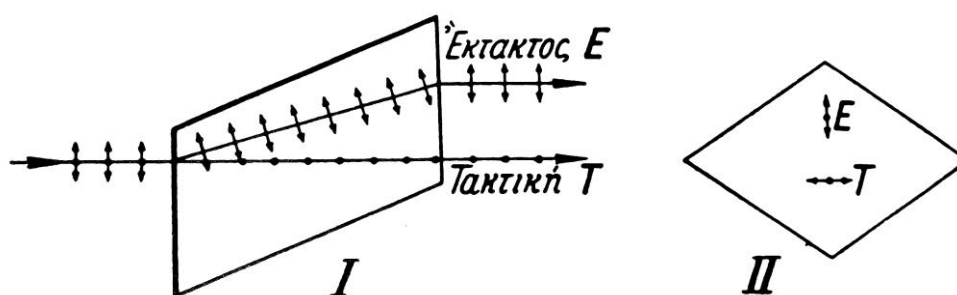
Συνοπτικά περί διπλοθλαστικότητας και πλακιδίων καθυστέρησης φάσης

Διπλοθλαστικότητα ή διπλή διάθλαση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο όταν μια ακτίνα φυσικού φωτός προσπέσει σε ένα διπλοθλαστικό υλικό, προκύπτουν δύο διαθλώμενες ακτίνες (Εικόνα 11), α) η τακτική, η οποία ακολουθεί τους δύο νόμους της διάθλασης και για την οποία ο δείκτης διάθλασης ($\delta.δ.$) n_o είναι σταθερός και ανεξάρτητος από τη διεύθυνση διάδοσης και β) η έκτακτη, η οποία δεν ακολουθεί τους νόμους της διάθλασης (εκτός δύο εξαιρέσεων, παρακάτω) και για τα οποία ο $\delta.δ.$ $n_{e,\theta}$ εξαρτάται από τη διεύθυνση διάδοσής της και κυμαίνεται μεταξύ του n_o και μίας άλλης τιμής n_e , μεγαλύτερης (θετικοί κρύσταλλοι) ή μικρότερης (αρνητικοί κρύσταλλοι). Οι n_o και n_e ονομάζονται κύριοι $\delta.δ.$ (Πίνακας 1).

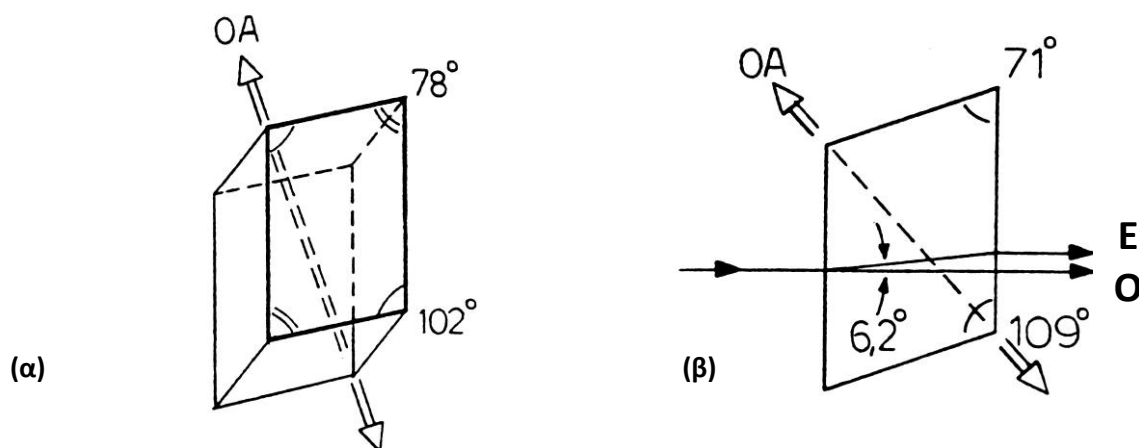
Διπλοθλαστικά υλικά είναι όλα τα διαφανή κρυσταλλικά υλικά εκτός από αυτά του κυβικού συστήματος κρυστάλλωσης, διότι παρουσιάζουν ασυμμετρία δομής ως προς όλες τις διευθύνσεις εκτός μιας, του οπτικού άξονα (ΟΑ). Κατά τη διεύθυνση του ΟΑ (Εικόνα 12α) η κρυσταλλική δομή είναι συμμετρική (κύριος κρυσταλλογραφικός άξονας) και δεν εμφανίζεται διπλοθλαστικότητα για πρόσπτωση φωτός κατά τη διεύθυνση αυτή (και μόνον αυτή) και ο $\delta.δ.$ είναι n_o .

Ο ΟΑ δεν είναι μια συγκεκριμένη γραμμή μέσα στον κρύσταλλο, αλλά είναι μια διεύθυνση και με την έννοια αυτή υπάρχουν άπειροι ΟΑ.

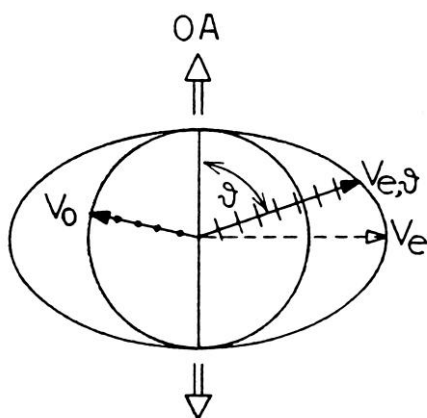
Εκτός των μονοαξονικών κρυστάλλων, υπάρχουν και οι διαξονικοί κρύσταλλοι (αποτελούν την πλειοψηφία), με δύο ΟΑ, πράγμα που εξαρτάται από το σύστημα κρυστάλλωσης, στους διαξονικούς κρυστάλλους και οι δύο διαθλώμενες ακτίνες είναι έκτακτες και υπάρχουν τρεις $\delta.δ.$ (Πίνακας 1).



Εικόνα 11. Πρόσπτωση φυσικού φωτός κάθετα σε φυσική έδρα κρυστάλλου ασβεστίτη. Η τακτική ακτίνα (T) εξέρχεται ανεπηρέαστη (αναμενόμενο), ενώ η έκτακτη (E) εκτρέπεται (παράβαση του δεύτερου νόμου διάθλασης). Εάν περιστρέψουμε τον κρύσταλλο με άξονα κάθετο στην έδρα πρόσπτωσης, η τακτική παραμένει ακίνητη (αναμενόμενο), ενώ η έκτακτη περιστρέφεται "μαζί με τον κρύσταλλο" γύρω από την τακτική (παράβαση του πρώτου νόμου της διάθλασης).



Εικόνα 12. (α): Κρύσταλλος ασβεστίτη (CaCO_3). Ανήκει στο εξαγωνικό σύστημα και οι επιφάνειές του είναι παραλληλόγραμμα με γωνίες 78° και 120° . Ο οπτικός του άξονας (OA) διέρχεται από τις δύο (και μοναδικές) τρισαμβλυγώνιες κορυφές του. (β): Κύρια τομή έδρας ασβεστίτη.



Εικόνα 13. Το πολικό διάγραμμα των ταχυτήτων διάδοσης της τακτικής και της έκτακτης ακτίνας εντός του ασβεστίτη είναι ελλειψοειδές εκ περιστροφής με άξονες V_o (αργός) και V_e (ταχύς).

Φυσικές έδρες ονομάζονται οι φυσικές επιφάνειες περάτωσης του κρυσταλλικού υλικού, σε αντιδιαστολή με τις τεχνητές έδρες που προέρχονται από τομή.

Κύριο επίπεδο μονοαξονικού κρυστάλλου ονομάζεται κάθε επίπεδο το οποίο περιέχει τον OA. Κύρια τομή έδρας ονομάζεται κάθε τομή του κρυστάλλου από ένα κύριο επίπεδο κάθετο στην έδρα αυτή (Εικόνα 12β).

Η τακτική και η έκτακτη ακτίνα είναι γραμμικά πολωμένες σε επίπεδα κάθετα μεταξύ τους. Το επίπεδο ταλάντωσης της έκτακτης περιέχει τον OA του κρυστάλλου, συμπίπτει δηλαδή με κύριο επίπεδο, ενώ το επίπεδο ταλάντωσης της τακτικής ακτίνας είναι κάθετο στο προηγούμενο. Οι ταχύτητες διάδοσης εντός μονοαξονικού κρυστάλλου της τακτικής και έκτακτης ακτίνας είναι προφανώς αντιστρόφως ανάλογες των n_o και $n_{e\theta}$ (Εικόνα 13). Οι εντάσεις της τακτικής και της έκτακτης ακτίνας είναι ίσες μεταξύ τους και ίσες προς το $\frac{1}{2}$ της έντασης της προσπίπτουσας ακτίνας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΟΙ ΣΥΝΗΘΕΣΤΕΡΟΙ ΔΙΠΛΟΘΛΑΣΤΙΚΟΙ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΙ
ΔΕΙΚΤΕΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΓΙΑ $\lambda = 589.2 \text{ nm (Na)}$

Ονομασία/ Σύσταση	n_o	n_e	$n_e - n_o$	Χαρακτηρισμός
Ασβεστίτης CaCO_3	1.65835	1.48640	-0.17195	Αρνητικός Μονοαξονικός
Χαλαζίας SiO_2	1.54424	1.55335	+0.00911	Θετικός Μονοαξονικός
Μαρμαρυγίας $\text{KH}_2\text{Al}_3(\text{SO}_4)_3$	1.59770*	1.59360*	-0.00410	Αρνητικός Διαξονικός

**Οι τρεις κύριοι δ.δ. του διαξονικού αυτού κρυστάλλου είναι $n_\alpha=1,5601$, $n_\beta=1,59360$, $n_\gamma=1.59770$. Οι τιμές αυτές μπορεί να διαφέρουν λίγο μεταξύ διαφόρων δειγμάτων. Στις εφαρμογές χρησιμοποιούνται λεπτότατα φύλλα μαρμαρυγία που μπορεί εύκολα να αποσχισθούν στο επιθυμητό πάχος. Οι επιφάνειες απόσχισης είναι κάθετες στη διχοτόμο της οξείας γωνίας των δύο οπτικών αξόνων και οι ενεργοί δ.δ. στην περίπτωση αυτή είναι $n_o=n_\gamma$ και $n_e=n_\beta$.*

Εξαιρέσεις στο φαινόμενο της διπλοθλαστικότητας

Εκτός από την περίπτωση πρόσπτωσης κατά την διεύθυνση του ΟΑ, οπότε δεν εμφανίζεται έκτακτη ακτίνα, υπάρχουν δύο εξαιρέσεις από τον γενικό ορισμό της διπλοθλαστικότητας, στη συμπεριφορά της έκτακτης ακτίνας.

α) Εάν το επίπεδο πρόσπτωσης συμπίπτει με κύριο επίπεδο, η έκτακτη ακτίνα παραμένει στο κύριο επίπεδο, άρα πληρούται ο πρώτος νόμος της διάθλασης , όχι όμως και ο δεύτερος. (Σε πρόσπτωση εκτός κυρίου επιπέδου η έκτακτη δεν παραμένει στο επίπεδο πρόσπτωσης).

β) Εάν το επίπεδο πρόσπτωσης είναι κάθετο στον ΟΑ η έκτακτη ακτίνα πληροί και τους δύο νόμους της διάθλασης.

Πλακίδια καθυστέρησης φάσης

Συνέπεια της β' εξαίρεσης είναι ότι αν κοπεί ο κρύσταλλος κατά ένα κύριο επίπεδό του και έχουμε πρόσπτωση κάθετη στην τεχνητή έδρα που δημιουργήθηκε, η τακτική και η έκτακτη ακτίνα διαδίδονται στην ίδια διεύθυνση, φαινομενικά σαν μια ακτίνα αλλά με διαφορετικές ταχύτητες, λόγω των δ.δ. n_o και n_e . Τα πλακίδια καθυστέρησης φάσης κόβονται από διπλοθλαστικούς κρυστάλλους. Όταν οι κρύσταλλοι είναι μονοάξονες κόβονται κατά τρόπο ώστε οι δύο απέναντι επιφάνειές τους να είναι κύρια επίπεδα. Για κάθετη πρόσπτωση σε πλακίδιο πάχους d , δημιουργείται διαφορά οπτικού δρόμου (Δ) μεταξύ τακτικής και έκτακτης ακτίνας:

$$\Delta = (n_e - n_o)d \quad (9)$$

και διαφορά φάσης

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d \quad (10)$$

Η ποσότητα $k=2\pi/\lambda$ ονομάζεται κυματάριθμος.

Τα πλακίδια καθυστέρησης φάσης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ή τη μεταβολή των πολωσιμετρικών χαρακτηριστικών του φωτός. Μερικές τυπικές περιπτώσεις θα αναφέρουμε στη συνέχεια. Συνήθως κατασκευάζονται πλακίδια με $\Delta=\lambda/4$, οπότε η καθυστέρηση φάσης μεταξύ τακτικής και έκτακτης είναι $\Delta\varphi=2\pi/4=90^\circ$ ή $\Delta=\lambda/2$, οπότε $\Delta\varphi=2\pi/2=180^\circ$.

Για την κατασκευή πλακιδίου, έστω $\lambda/4$, απαιτείται βάσει της Εξίσωσης (9) πάχος πλακιδίου d , που να πληροί τη σχέση:

$$(n_e - n_o)d_v = (2\nu - 1)\frac{\lambda}{4} \quad (11)$$

όπου $\nu=0,1,2,\dots$

Τα αντίστοιχα πλακίδια χαρακτηρίζονται ως μηδενικής τάξης αν $\nu=0$ ή ανώτερης τάξης αν $\nu>0$. Ανάλογες της (11) σχέσης ισχύουν για τα πλακίδια $\lambda/2$ και λ .

Μόνο ο μαρμαρυγίας μπορεί να δώσει λεπτά πλακίδια μηδενικής τάξης, λόγω της μικρής διπλοθλαστικότητας του και της άριστης σχιστότητάς του. Για την κατεργασία του χαλαζία και του ασβεστίτη απαιτούνται μερικά χιλιοστόμετρα πάχους, οπότε τα πλακίδια είναι υψηλής τάξης. Τα πλακίδια ανώτερης τάξης μειονεκτούν, γιατί η δράση τους μεταβάλλεται πολύ με το μήκος κύματος, τη γωνία πρόσπτωσης και τη θερμοκρασία.

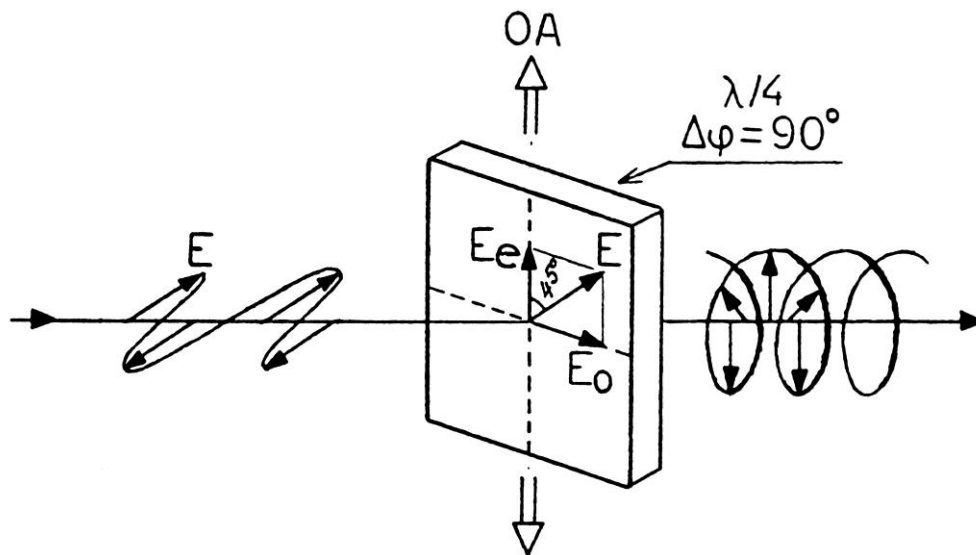
Τα πολωσιμετρικά χαρακτηριστικά του εξερχόμενου φωτός από ένα διπλοθλαστικό πλακίδιο (ή γενικότερα από ένα διπλοθλαστικό υλικό) μπορούμε να τα προβλέψουμε αν γνωρίζουμε :

α) Τα πολωσιμετρικά χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος φωτός.

β) Τα οπτικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλακιδίου.

γ) Τους κανόνες σύνθεσης των κάθετων μεταξύ τους κυμάτων, που είναι στην περίπτωση αυτή τα κυμαινόμενα ανύσματα της τακτικής και έκτακτης ακτίνας E_o και E_e αντίστοιχα.

δ) Αν κατασκευάσουμε τέλος, σχήμα ανάλογο της Εικόνας 14.



Εικόνα 14. Κατά την πρόσπτωση γραμμικά πολωμένου φωτός σε πλακίδιο $\lambda/4$, με γωνία 45° με τον OA του πλακιδίου, προκύπτει κυκλικά πολωμένο φως.

Σύνθεση κυμάτων. Στη σύνθεση δύο γραμμικά πολωμένων και κάθετων μεταξύ τους κυμάτων ίσου πλάτους (όπως η τακτική και η έκτακτη ακτίνα που προκύπτουν από τα πλακίδια καθυστέρησης φάσης), εάν η διαφορά φάσης είναι $\Delta\phi=90^\circ$, προκύπτει κυκλικά πολωμένο κύμα. Εάν $\Delta\phi \neq 90^\circ$ (ή τα πλάτη άνισα, έστω και αν $\Delta\phi=90^\circ$) προκύπτει ελλειπτικά πολωμένο κύμα. Εάν $\Delta\phi=0^\circ$ ή $\Delta\phi=180^\circ$ προκύπτει γραμμικά πολωμένο κύμα.

Χαρακτηριστικές περιπτώσεις πλακιδίων καθυστέρησης φάσης.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα εξηγούνται οι ακόλουθες περιπτώσεις :

- 1) Πλακίδιο $\Delta\phi$ + φυσικό φως :

Προκύπτει φυσικό φως*.

- 2) Πλακίδιο $\Delta\phi$ + γραμμικά πολωμένο φως :

Προκύπτει ελλειπτικά πολωμένο φως (με οριακές περιπτώσεις το κυκλικά και γραμμικά πολωμένο).

- 3) Πλακίδιο $\lambda/4$ ($\Delta\phi=90^\circ$) + γραμμικά πολωμένο φως με το επίπεδο πόλωσης σε γωνία 45° με τον ΟΑ:

Προκύπτει κυκλικά πολωμένο φως.

- 4) Πλακίδιο $\lambda/4$ ($\Delta\phi=90^\circ$) + κυκλικά πολωμένο φως :

Προκύπτει γραμμικά πολωμένο φως με επίπεδο πόλωσης σε 45° γωνία με τον ΟΑ.

- 5) Πλακίδιο $\lambda/2$ ($\Delta\phi=180^\circ$) + γραμμικά πολωμένο φως με επίπεδο πόλωσης σε γωνία ω με τον ΟΑ :

Προκύπτει γραμμικά πολωμένο φως με στροφή του επιπέδου πόλωσης κατά γωνία $-\omega$ ως προς τον ΟΑ , δηλαδή κατά γωνία 2ω ως προς το αρχικό επίπεδο πόλωσης.

*Παρατήρηση: Εάν προσπίπτει ακτίνα φυσικού φωτός σε πλακίδιο καθυστέρησης φάσης $\Delta\phi$ (ή γενικά ευρεία δέσμη φωτός σε διπλοθλαστικό υλικό, οπότε έχουμε επικάλυψη των δύο εξερχόμενων δεσμών), έχουμε στην έξοδο σύνθεση δύο κάθετα μεταξύ τους πολωμένων ακτινών της ίδιας έντασης, οπότε και θα αναμενόταν να προκύψει ελλειπτικά πολωμένο φως. Το πείραμα όμως μας δείχνει φυσικό φως! Η εξήγηση είναι η ακόλουθη :

Παρόλο που οι εξερχόμενες ακτίνες ,τακτική και έκτακτη, έχουν την ίδια ένταση στη μακροσκοπική κλίμακα χρόνου της παρατήρησης, εν τούτοις, τα πλάτη των αντιστοίχων κυμάτων συνεχώς μεταβάλλονται, επειδή το επίπεδο ταλάντωσης του ανύσματος Ε του φυσικού φωτός αλλάζει διαρκώς και τυχαία , με συνέπεια τη διαρκή μεταβολή των προβολών του προς τη διεύθυνση του ΟΑ και κάθετα προς αυτήν.

Έχουμε λοιπόν σύνθεση δύο κυμάτων καθέτων μεταξύ τους, με ορισμένη διαφορά φάσης, αλλά διαρκώς μεταβαλλόμενα πλάτη, πράγμα που δημιουργεί ελλειπτικά πολωμένο κύμα, αλλά με διαρκώς μεταβαλλόμενους άξονες. Το φως αυτό είναι φυσικό φως, με την έννοια ότι δεν μπορεί να διακριθεί από αυτό.

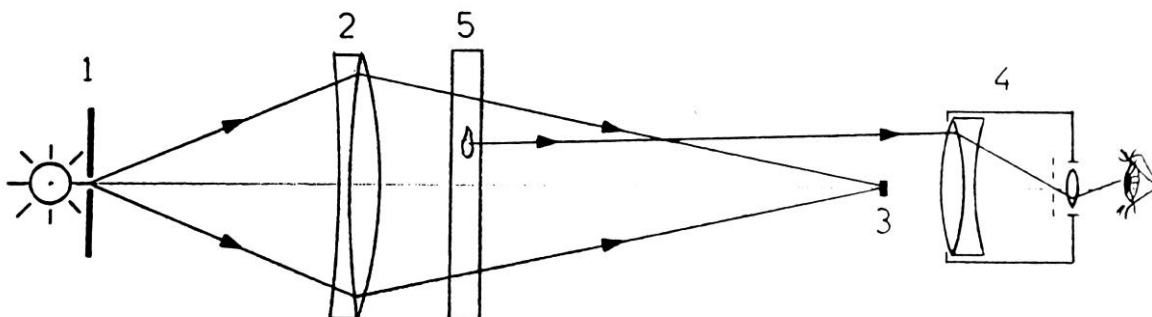
Μέτρηση της διπλοθλαστικότητας.

Μεταξύ πολωτή και αναλυτή (polaroid αμφότερα) σε απόσταση μεταξύ τους περί τα 10cm και σε θέση απόσβεσης του φωτός, τοποθετούμε το προς εξέταση δείγμα. Εάν υπάρχει διπλοθλαστικότητα στο δείγμα θα παρατηρήσουμε διέλευση φωτός από τον αναλυτή στην περιοχή διπλοθλαστικότητας, γιατί το φως που προσπίπτει τώρα στον αναλυτή έχει αλλάξει πολωσιμετρικά χαρακτηριστικά και δεν αποσβήνεται. Από την έκταση και την ένταση του διερχόμενου φωτός, εκτιμούμε την ποιότητα του υλικού.

Προσεγγιστική μέτρηση της διπλοθλαστικότητας γίνεται με περιστροφή του αναλυτή μέχρι μόλις να επιτύχουμε ομοιόμορφο φωτισμό του δείγματος. Η τιμή της γωνίας της περιστροφής αυτή αποτελεί ένα κατά προσέγγιση μέτρο της διπλοθλαστικότητας. Με την ίδια διάταξη εκτελούμε ακολούθως πειράματα φωτοελαστικότητας.

Έλεγχος της ομογένειας (μέθοδος των Schlieren).

Η μέθοδος των Schlieren που θα εφαρμόσουμε φαίνεται στην Εικόνα 15. Μία σχεδόν σημειακή φωτεινή πηγή (1) απεικονίζεται από έναν διορθωμένο φακό (2) πάνω σε ένα πολύ μικρό (1mm) αδιαφανές πέτασμα (3). Η μικρή δίοπτρα παρατήρησης (4) εστιάζεται για τη θέση όπου πρόκειται να τοποθετηθεί το υπό έλεγχο δείγμα (5). Το πεδίο που παρατηρούμε είναι σκοτεινό, γιατί το φως εμποδίζεται από το πέτασμα.



Εικόνα 15. Η διάταξη ελέγχου της ομογένειας των οπτικών υλικών (μέθοδος των Schlieren).

Εάν ακολούθως παρεμβάλουμε το δείγμα (5) (απαραίτητα οπτικά στιλβωμένες και παράλληλες οι δύο του επιφάνειες) και περιέχει ανομοιογένειες δείκτη διάθλασης, αυτές θα εκτρέψουν μέρος του φωτός εκτός του πετάσματος και θα γίνουν ορατές. Επιπλέον γίνεται ορατή και κάθε άλλη ανωμαλία, είτε στη μάζα του γυαλιού, όπως στερεά σωματίδια και φυσαλίδες, είτε στις επιφάνειες, όπως χαραγές, σκόνη ή ατέλειες στη μορφή των επιφανειών. Ουσιαστικά με τη μέθοδο των Schlieren ανιχνεύουμε τις ανωμαλίες ενός μετώπου κύματος και στην αρχή αυτή βασίζονται μερικές πολύ σημαντικές μέθοδοι ελέγχου οπτικών επιφανειών, όπως η μέθοδος ελέγχου φακών και κατόπτρων Foucault.

ΟΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

A) ΚΑΤΟΠΤΡΙΚΑ

Κάτοπτρα
Ημιπερατά κάτοπτρα (διαχωριστές δέσμης)
Κατοπτρικοί ηθμοί

B) ΔΙΟΠΤΡΙΚΑ

Οπτικές ίνες
Πρίσματα ολικής ανάκλασης (ή ανακλαστικά πρίσματα)
Αναλυτικά πρίσματα
Λεπτά πρίσματα
Οπτικές πλάκες (παράθυρα και ηθμοί)
Σφαιρικοί φακοί
Ασφαιρικοί φακοί
Κυλινδρικοί φακοί
Φακοί GRIN

Γ) ΔΙΠΛΟΘΛΑΣΤΙΚΑ

Πολωτικοί ηθμοί polaroid
Πολωτικά πρίσματα
Πλακίδια καθυστέρησης φάσης
Στοιχεία επαγώμενης διπλοθλαστικότητας (οπτικοί διαμορφωτές)

Δ) ΣΤΡΟΦΙΚΑ

Στροφικά στοιχεία (οπτικές βαλβίδες)
Στοιχεία επαγώμενης στροφικότητας (οπτικοί διαμορφωτές)

Ε) ΠΕΡΙΘΛΑΣΤΙΚΑ

Φράγματα διέλευσης
Ανακλαστικά φράγματα
Ολογραφικά οπτικά στοιχεία: κάτοπτρα, ημικάτοπτρα, φακοί, φράγματα

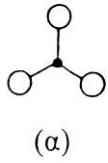
ΣΤ) ΑΔΡΑΝΗ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Διάφορα διαφράγματα και πετάσματα

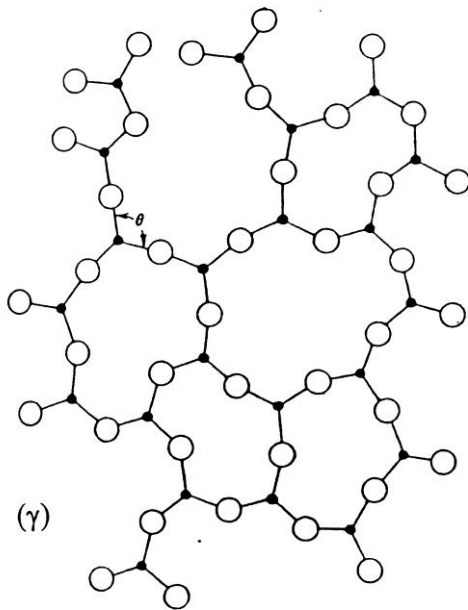
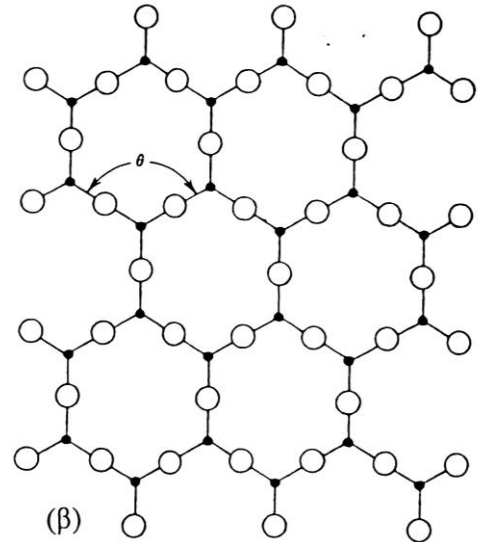
Ζ) ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ

Προστατευτικές
Αντιανακλαστικές
Ανακλαστικές
Επιλεκτικές

Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ



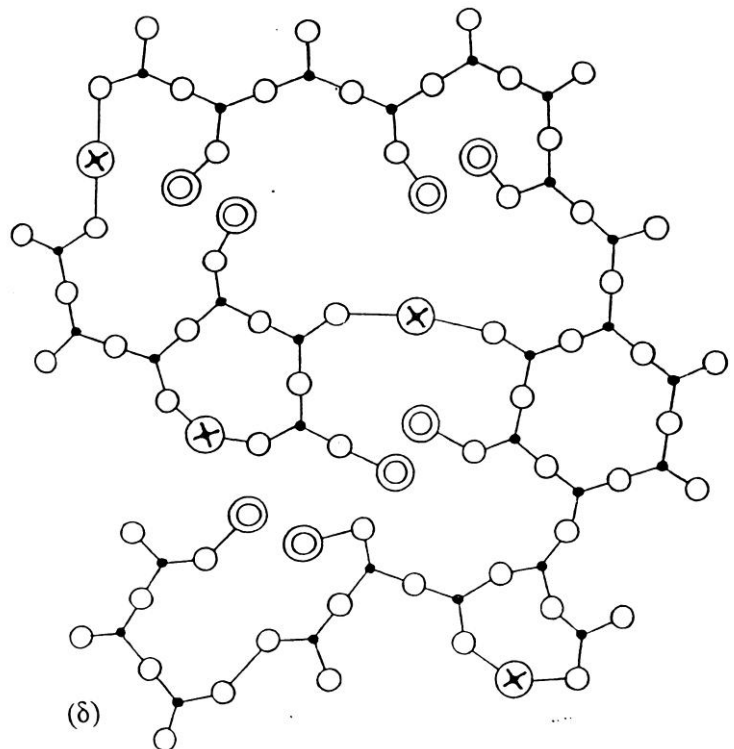
- (α) τετραεδρική δομή μορίου SiO_2
 (β) κρύσταλλος χαλαζία
 (γ) άμορφος χαλαζίας
 (δ) κοινό πυριτικό γυαλί με Na, Ca



- Οξυγόνο
 • Πυρίτιο
 ⊙ Νάτριο
 ⊗ Ασβέστιο

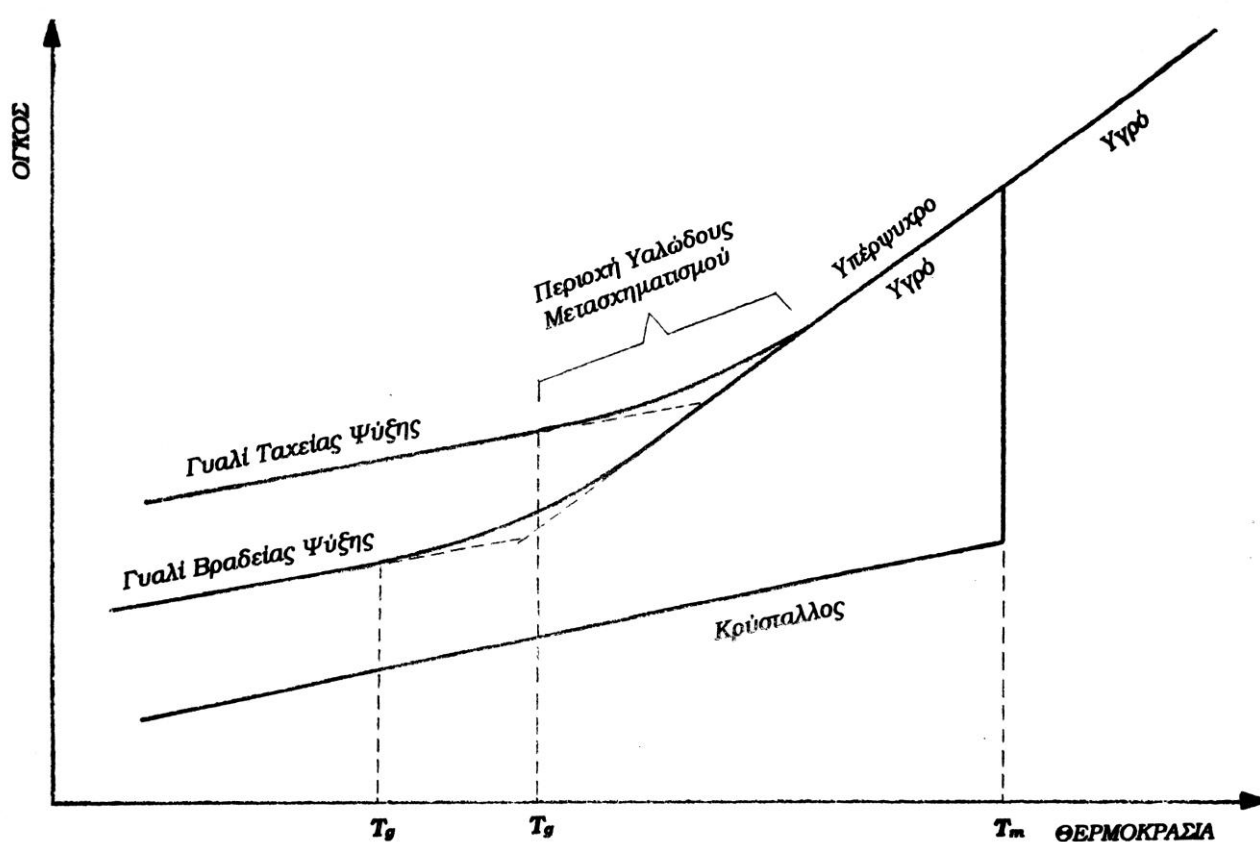
Διδιάστατη σχηματική προσέγγιση της δομής: (α) του τετραέδρου μορίου του χαλαζία (SiO_2), (β) του κρυσταλλικού χαλαζία με την πλήρως περιοδική δομή, (γ) του άμορφου χαλαζία, που είναι η βάση όλων των πυριτικών γυαλιών και (δ) του κοινού γυαλιού νατρίου-ασβεστίου. Στα (γ) και (δ) δεν υπάρχει περιοδική δομή μεγάλης κλίμακας.

Σε όλα τα σχήματα ένα τέταρτο άτομο οξυγόνου πρέπει να συνδεθεί με το πυρίτιο, εκτός του επιπέδου του σχήματος (τριδιάστατη τετραεδρική δομή).



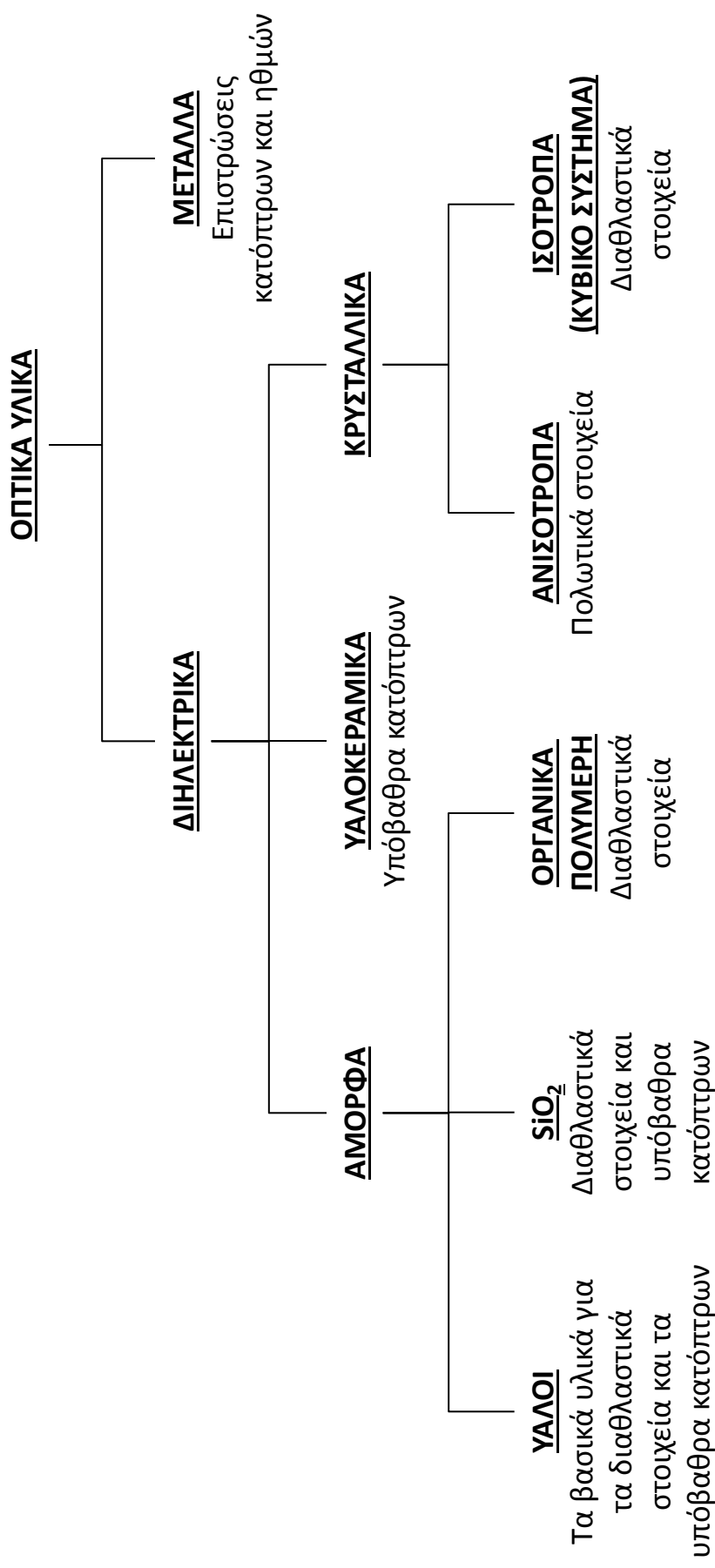
ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΥΑΛΟΓΟΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Γυαλί ονομάζεται κάθε άμορφο στερεό υλικό, ανόργανο ή οργανικό, δηλαδή κάθε στερεό που δεν παρουσιάζει ατομικές περιοδικές δομές μεγάλης κλίμακας και εμφανίζει στη θερμική συμπεριφορά του την περιοχή του υαλώδους σχηματισμού. Η ονομασία "γυαλί" παραδοσιακά αναφέρεται μόνο στα ανόργανα, ενώ τα οργανικά υλικά χαρακτηρίζονται με ιδιαίτερες ονομασίες, που προέρχονται συνήθως από τη χημική τους σύσταση.



Η μεταβολή του όγκου (ή της ενθαλπίας) με τη θερμοκρασία κατά την ψύξη τήγματος υαλογόνου υλικού. Το φαινόμενο μπορεί να κατευθυνθεί σε έναν από τους τρεις κλάδους της καμπύλης, ως εξαρτώμενο από τις συνθήκες και κυρίως από την ταχύτητα ψύξης. **T_m**: θερμοκρασία τήξης, **T_g**: θερμοκρασία του υαλώδους μετασχηματισμού. Οι μεταβολές του όγκου στο σχήμα είναι υπερβολικά τονισμένες για ευκρίνεια.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κ. Αλεξόπουλου, Οπτική : Κεφάλαιο 1.

Δ. Παπαθανάσογλου, Εφαρμοσμένη Οπτική: Κεφάλαια 1 και 2.

R. Serway, Φυσική, Τόμος III: § 38.6

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΥΑΛΙΟΥ

A. Γενικά για το γυαλί

Οι περισσότερες δυσκολίες στο σχεδιασμό, στην κατασκευή και στην λειτουργία ενός εργοστασίου παραγωγής γυαλιού επίπλευσης προκύπτουν από την ιδιάζουσα φύση του γυαλιού. Σε υψηλές θερμοκρασίες, το υγρό γυαλί αρχίζει να συμπεριφέρεται σαν το ιδανικό γενικό διαλυτικό: αποτελεί πρόβλημα να βρεθεί ένα χημικά ανθεκτικό δύστηκτο υλικό ικανό να το συγκρατήσει. Αλλά το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του γυαλιού είναι το ότι αλλάζει προοδευτικά από υγρό με μορφή σιροπιού στη θερμοκρασία των 1.500°C σε συμπαγές στερεό καθώς ψύχεται στους 400°C , όπου και χάνει την κόκκινη λάμψη του. Κατά την διάρκεια της αλλαγής, το ιξώδες του αλλάζει κατά έξη τρισεκατομμύρια φορές.

Τα ρευστά χαρακτηριστικά του γυαλιού καθιστούν δυνατή την επεξεργασία του με πολλούς τρόπους: φυσώντας το για την κατασκευή μπουκαλιών και βάζων, με συμπίεση για την κατασκευή επιτραπέζιων σκευών, με ελκυσμό για την κατασκευή τζαμιών για παράθυρα και σωλήνων, με έλαση για την κατασκευή ανάγλυφου γυαλιού και υαλοπινάκων.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι απλό να ορισθούν τα ρευστά χαρακτηριστικά με μετρήσεις του ιξώδους σε διάφορες θερμοκρασίες κατά την επεξεργασία και να ρυθμιστούν τα μηχανήματα επεξεργασίας γυαλιού σύμφωνα με τις συνήθεις αρχές της μηχανικής. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Στην επεξεργασία του γυαλιού η θερμοκρασία του γυαλιού είναι κάθε άλλο παρά στατική. Η θερμοκρασία του γυαλιού πέφτει με ρυθμό που διαφοροποιείται σημαντικά, μεταξύ άλλων, από τη παρουσία ακάθαρτων σωματιδίων και από το βαθμό οξείδωσης τους. Κάτω από τους 200°C το γυαλί αποτελεί καλό θερμικό μονωτή, αλλά σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η ακτινοβολία υπερисχύει στην μεταφορά θερμότητας και η διαφάνεια του γυαλιού του δίνει ένα υψηλό ποσοστό μεταφοράς θερμότητας, που εξαρτάται ως ένα βαθμό από το χρώμα του. Έτσι μικρές διαφορές στο βαθμό ψύξης, επιφέρουν μεγάλες διαφορές στα χαρακτηριστικά ρευστότητας.

Το γυαλί έχει πολλές χρήσεις εξαιτίας της διαφάνειάς του, της υψηλής αντοχής του στην έκθεση σε χημικά, της αποτελεσματικότητάς του ως κακού αγωγού του ηλεκτρισμού, και της ικανότητάς του στην διατήρηση κενού. Το γυαλί είναι ένα εύθραυστο υλικό και επιδεικνύει χαρακτηριστικά πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη από ότι αντοχή σε εφελκυσμό. Τεχνικές ενίσχυσης, οι περισσότερες από τις οποίες συμπεριλαμβάνουν προένταση με την εισαγωγή της συμπίεσης λειτουργίας έχουν αναπτυχθεί σε σημείο που το γυαλί μπορεί να εργαστεί σε πιο δυσχερές περιβάλλον από ότι παλαιότερα. Παράγονται περίπου 800 διαφορετικές συνθέσεις γυαλιού, ορισμένες με ειδική έμφαση σε κάποια ιδιότητα και ορισμένες με προσανατολισμό σε ένα πιο εξισορροπημένο συνδυασμό ιδιοτήτων.

B. Επίπεδο Γυαλί

Η βιομηχανία γυαλιού μπορεί να διαιρεθεί σε 3 μεγάλους τομείς: επίπεδο γυαλί, καταναλωτικό και τεχνικό γυαλί, και γυαλί συσκευασίας. Οι τομείς χωρίζονται κατά προϊόν και κατά αγορές. Σε αυτήν την κατηγοριοποίηση δεν συμπεριλαμβάνονται λάμπες, εργαστηριακός εξοπλισμός, ίνες γυαλιού και οπτικές ίνες.

Υπάρχουν βασικά 3 τύποι επίπεδου γυαλιού: τεχνολογίας sheet, τεχνολογίας plate και τεχνολογίας float. Η βασική διαφορά ανάμεσα σε αυτούς τους τύπους επίπεδου γυαλιού αφορά στο πως

φτιάχνονται, αφού οι διαδικασίες που ακολουθούνται κατά την επεξεργασία τους είναι πολύ διαφορετικές. Οι αγορές και οι εφαρμογές όμως επικαλύπτονται. Στην παγκόσμια βιομηχανία γυαλιού σήμερα περισσότερο από 95% του διαφανούς γυαλιού που χρησιμοποιείται στα παράθυρα και του γυαλιού που χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία παράγεται μέσω της διαδικασίας float, ενώ το ποσοστό θα αυξηθεί καθώς τα εναπομένοντα εργοστάσια τεχνολογίας sheet και τεχνολογίας plate στις χώρες του τρίτου κόσμου και της πρώην Σοβιετικής Ένωσης κλείνουν και αντικαθιστούνται από εργοστάσια τεχνολογίας float.

Γ. Παραγωγή Επίπεδου Γυαλιού (Flat Glass)

Σχεδόν όλα τα εργοστάσια παραγωγής επίπεδου γυαλιού που διοικούνται από επιχειρήσεις της Δυτικής Ευρώπης και της Ιαπωνίας χρησιμοποιούν την τεχνολογία float. Η τεχνολογία float είναι μια συνεχής διαδικασία η οποία ξεκινάει με την τήξη των ακατέργαστων υλικών στον κλίβανο στους 1.500 °C, συνεχίζεται με την μορφοποίηση στο λουτρό υγρού κασσίτερου (η καρδιά της διαδικασίας), και τελικά με την ψύξη και την αυτόματη κοπή σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πελάτη. Η υψηλή θερμοκρασία επιτρέπει να διορθωθούν οι ανωμαλίες και να διαμορφωθούν οι επιφάνειες του γυαλιού σε επίπεδες και παράλληλες.

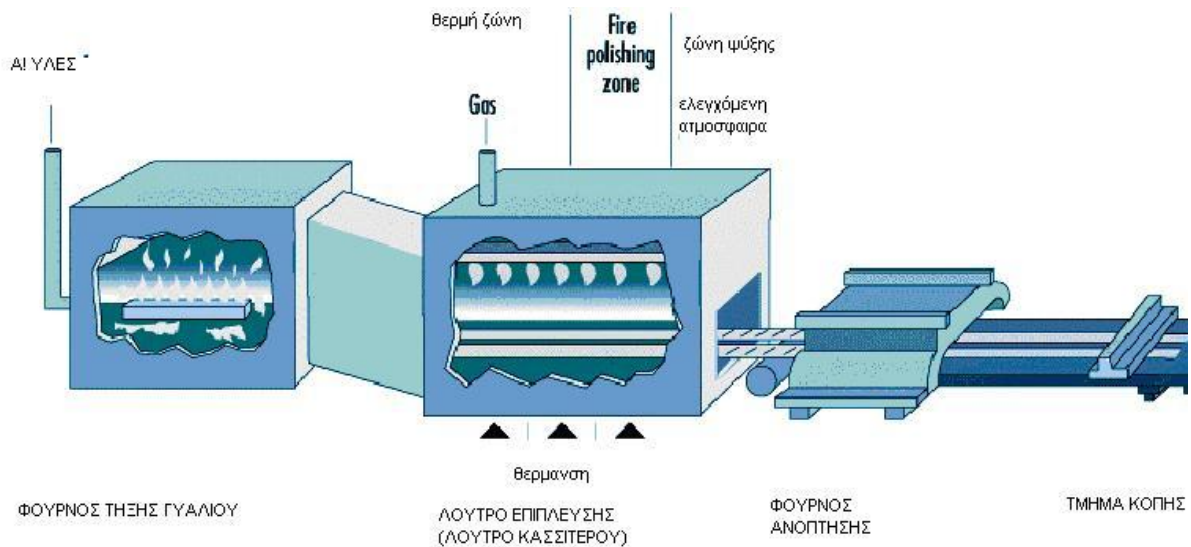
Πριν το 1959, όταν εφευρέθηκε η τεχνολογία float, το επίπεδο γυαλί παραγόταν με την χρήση της τεχνολογίας sheet (etire) ή της τεχνολογίας plate (Pittsburgh). Η διαδικασία με βάση την τεχνολογία sheet ήταν η πιο διαδεδομένη από τις δύο, παράγοντας γυαλί με μία σκληρή, επεξεργασμένη με φωτιά επιφάνεια, παρότι υπέφερε από οπτική παραμόρφωση – παραμόρφωση που προκαλείται από την κατακόρυφη διαδικασία ελκυσμού. Η διαδικασία με βάση την τεχνολογία twin ground plate glass παρήγαγε ένα προϊόν χωρίς παραμορφώσεις αλλά ακριβό.

Η τεχνολογία float συνδυάζει τα πλεονεκτήματα από τις δύο προαναφερθείσες διαδικασίες, έτσι το γυαλί που παράγεται: είναι απαλλαγμένο από παραμορφώσεις, έχει τελική επεξεργασία γυαλίσματος με φωτιά (fire polished finish) και είναι πιο φτηνό. Η τεχνολογία plate έχει ολοκληρωτικά ξεπεραστεί και η τεχνολογία sheet glass αποτελεί μόνο ένα μικρό ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης επίπεδου γυαλιού, αλλά χρησιμοποιείται ακόμη σε κάποιες χώρες της ανατολικής Ευρώπης και της Ασίας

Δ. Διαδικασία Παραγωγής Γυαλιού με Επίπλευση (Float Glass)

Στην τεχνολογία float τα ακατέργαστα υλικά, αναμεμιγμένα με μεγάλη ακρίβεια, λιώνουν σε πολύ μεγάλους κλιβάνους πλευρικών καυστήρων και το λιωμένο γυαλί που προκύπτει ρέει οριζόντια πάνω από λουτρό υγρού κασσίτερου με διαστάσεις περίπου 60 μέτρα μήκος και 7,5 μέτρα πλάτος. Κατά την διάρκεια της διέλευσης πάνω από τον υγρό κασσίτερο, το ζεστό γυαλί προσλαμβάνει τέλεια επιπεδότητα από την επιφάνεια του κασσίτερου και αναπτύσσει εξαιρετική ομοιομορφία πάχους. Μια συνεχής ταινία γυαλιού έλκεται από αυτήν την απλωμένη μάζα. Η διαδικασία αυτή έχει το πλεονέκτημα να σπρώχνει το δύστηκτο ρυπασμένο γυαλί στην εξωτερική πλευρά της ταινίας και αργότερα απομακρύνεται από την σκληρυμένη κορδέλα και ανακυκλώνεται ως υαλόθραυσμα (cullet).

Το παρακάτω σχήμα από το The Handbook of Glass Manufacture δίνει μια σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας παραγωγής γυαλιού με τεχνολογία float.



Ε. Περιγραφή Παραγωγικής Διαδικασίας

Μια μονάδα παραγωγής γυαλιού, με την μέθοδο float, σχεδιάζεται για να λειτουργεί συνεχώς (24 ώρες ημερησίως – 365 ημέρες τον χρόνο) μέχρι να σταματήσει για συντήρηση μετά 11-15 έτη. Για τον λόγο αυτό προβλέπονται πέντε βάρδιες προσωπικού εργασίας και σειρά άλλων εξασφαλίσεων όπως διπλή τροφοδοσία καυσίμου, διπλές ηλεκτρολογικές γραμμές κ.λπ.

Ένα τυπικό Βιομηχανικό Συγκρότημα παραγωγής υαλοπινάκων Float, συνήθως περιλαμβάνει:

- Συγκρότημα αποθήκευσης και προετοιμασίας πρώτων υλών
- Συγκρότημα φούρνου τήξης γυαλιού
- Συγκρότημα επίπλευσης
- Συγκρότημα ανόπτησης
- Συγκρότημα κοπής και αποθήκευσης
- Ειδικές Εγκαταστάσεις (ηλεκτρολογικές -αερίων – νερού ..)
- Βοηθητικές εγκαταστάσεις

Η διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνει τις φάσεις :

- Προετοιμασία του ακριβούς μείγματος των απαιτούμενων Α' υλών και τροφοδοσία του φούρνου τήξης.
- Τήξη των Α' υλών στο φούρνο και ομογενοποίηση του τηγμένου υλικού.
- Προώθηση του τηγμένου προϊόντος στο Λουτρό Επίπλευσης (Tin Bath) όπου το τηγμένο προϊόν έρχεται σε επαφή χωρίς ανάμειξη με την επιφάνεια υγρού κασσιτέρου , σχηματίζοντας μια τέλεια οριζόντια επιφάνεια στο σημείο της επαφής με τον κασσίτερο.
- Η σχηματισμένη ταινία υπέρθερμου γυαλιού προωθείται στο φούρνο ανόπτησης, όπου ψύχεται ομαλά.
- Πέρασμα της ταινίας υπέρθερμου γυαλιού στο τμήμα κοπής, όπου θα απομακρυνθούν οι δύο ακραίες λωρίδες της ταινίας και θα γίνει η κοπή στις τελικές διαστάσεις του προϊόντος

Ε. Πρώτες Ύλες

Η παραγωγή γυαλιού απαιτεί τη χρήση Α' υλών, οι οποίες αποτελούν πρωτογενή φυσικά υλικά που προέρχονται από πλουτοπαραγωγικά κοιτάσματα. Το σύνολο των πρώτων υλών που απαιτούνται για την παραγωγή γυαλιού και η αντίστοιχη ποσοτική συμμετοχή τους, είναι οι ακόλουθες:

Πρώτη Ύλη	Χημικός Τύπος	% Ποσοτική Συμμετοχή
Χαλαζιακή Άμμος (silica sand)	SiO ₂	59,42%
Ασβεστόλιθος (limestone)	CaO	5,06%
Δολομίτης (dolomite)	MgO	13,90%
Άστριος (feld spar)	-	2,09%
Σόδα (soda carbonate)	Na ₂ O	18,42%
Θειικό άλας (soda sulphate)	-	1,11%

Τα παραπάνω αναφερόμενα φυσικά υλικά, για να οδηγηθούν στο πρώτο στάδιο της παραγωγής γυαλιού, απαιτείται να αναμιχθούν με υαλοθραύσματα, θραύσματα δηλαδή έτοιμου μορφοποιημένου γυαλιού. Τα υαλοθραύσματα συμμετέχουν στην ανάμιξη των πρώτων υλών κατά ποσοστό 20%, έτσι ώστε η τελική σύσταση των πρώτων υλών για την παραγωγή γυαλιού float να διαμορφώνεται ως ακολούθως:

Πρώτη Ύλη	% Ποσοτική Συμμετοχή
Χαλαζιακή Άμμος	47,54%
Ασβεστόλιθος	4,05%
Δολομίτης	11,12 %
Άστριος	1,67%
Σόδα	14,74%
Θειικό άλας	0,88%
Υαλοθραύσματα	20.00%
ΣΥΝΟΛΟ	100%

Χημικά και Φυσικά Χαρακτηριστικά των Πρώτων Υλών

Ασβεστόλιθος

Ο [ασβεστόλιθος](#) είναι μονόμεικτο πέτρωμα αποτελούμενο κυρίως από ασβεστίτη. Η απόθεση του ανθρακικού ασβεστίου μπορεί να είναι είτε χημική (κορεσμός λόγω εξάτμισης ή αύξησης συγκέντρωσης ή αλλαγής φυσικοχημικών σταθερών) είτε βιογενής από συσσώρευση και συμπαγοποίηση των σκελετικών στοιχείων διαφόρων ζωικών ή φυτικών οργανισμών μετά το θάνατό τους. Είναι πολύ διαδεδομένο πέτρωμα και υπάρχει άφθονο στη χώρα μας ιδιαίτερα στη δυτική Ελλάδα.

Ο ασβεστόλιθος είναι ένα ευρέως διαδεδομένο υλικό, με πολλές χρήσεις στην βιομηχανία δομικών υλικών και βέβαια στην παραγωγή των ξηρών κονιαμάτων, όπου χρησιμοποιείται ως [Αδρανές υλικό](#).

Δολομίτης

Ο [δολομίτης](#) είναι πέτρωμα μονόμεικτο, το οποίο αποτελείται κυρίως από MgO . Σχηματίζεται όταν ένα μέρος του ασβεστίου του $CaCO_3$ του ασβεστολίθου αντικατασταθεί από μαγνήσιο (δολομιτίωση). Μπορεί να υπάρχουν όλα τα ενδιάμεσα σε σύσταση πετρώματα μεταξύ ασβεστολίθου και δολομίτη.

Για να είναι κατάλληλος ο ασβεστόλιθος ή ο δολομίτης στην παραγωγή, πρέπει να ελεγχθεί η σύσταση του πετρώματος από το οποίο προέρχεται, η σκληρότητά του, η απορροφητικότητα σε νερό το χρώμα του. Επί πλέον πρέπει να είναι καθαρός και απαλλαγμένος από ξένα σώματα και προσμίξεις.

Ο Ασβεστόλιθος και ο δολομίτης εξορύσσονται στα αντίστοιχα [λατομεία](#). Εκεί γίνεται ένας σταδιακός υποβιβασμός της κοκκομετρίας των μεγάλων όγκων, μέχρις να καταλήξουμε στο επιθυμητό μέγεθος, στη συνέχεια το προϊόν προϊόν διαχωρίζεται σε πολλές κοκκομετρίες με τις οποίες γίνεται η σύνθεση του μίγματος ανάλογα με την συνταγή.

Άστριος

Ο άστριος είναι ορυκτό με βάση το διπλό πυριτικό άλας αργιλίου, καλίου, νατρίου ή ασβεστίου. Οι άστριοι παρουσιάζονται σε μεγάλη αφθονία στα πετρώματα του φλοιού της Γης. Ο χημικός τους τύπος είναι πολύπλοκος. Γενικά είναι αργιλοπυριτικά άλατα του καλίου, του νατρίου, του ασβεστίου και του βαρίου. Διακρίνονται σε 4 κύριες σειρές:

Καλιούχοι άστριοι (ορθόκλαστο, μικροκλινής $KAlSi_3O_8$).

Νατριούχοι άστριοι (αλβίτης $NaAlSi_3O_8$)

Ασβεστούχοι άστριοι (αστρίτης $CaAl_2Si_2O_8$)

Βαριούχοι άστριοι (κελσίτης $BaAl_2Si_2O_8$)

Τα χημικά συστατικά του άστριου παρουσιάζονται παρακάτω με την αντίστοιχη ποσοστιαία ποσοτική συμμετοχή τους:

Χημικός Τύπος	% Ποσοτική Συμμετοχή
Al ₂ O ₃	ελάχιστο 19.00
Fe ₂ O ₃	μέγιστο 0.45
TiO ₂	μέγιστο 0.45
Na ₂ O + K ₂ O	ελάχιστο 9.50
SiO ₂	μέγιστο 70.00
CaO + MgO	μέγιστο 3.00
LOI	μέγιστο 0.50

Χαλαζιακή Άμμος

Διαδεδομένο ορυκτό, το μόριο του οποίου σε καθαρή κατάσταση αποτελείται από ένα άτομο πυριτίου και δύο άτομα οξυγόνου.

Ο χαλαζίας βρίσκεται στη φύση αυτοφυής σε φλέβες, ως συστατικό πετρωμάτων και σε διαβρωμένη κατάσταση με τη μορφή άμμου. Αποτελεί συστατικό των μαγματογενών πετρωμάτων και κυρίως των ψαμμιτών και των χαλαζιτών. Γενικά βρίσκεται σε αφθονία στη φύση. Στην Ελλάδα υπάρχει κυρίως στις Κυκλάδες, στη Μάνη και στη Λέσβο. Εμφανίζεται σε διάφορες παραλλαγές, κρυσταλλικές ή κρυπτοκρυσταλλικές. Ο καθαρός χαλαζίας είναι άχρωμος, αλλά οι διάφορες προσμείξεις δημιουργούν αποχρώσεις (κίτρινες, πράσινες, μαύρες και κόκκινες). Ο χαλαζίας έχει σκληρότητα 7 και ειδικό βάρος 2,6. Ο μοριακός του τύπος είναι SiO₂. Λιώνει σε εξαιρετικά ψηλή θερμοκρασία.

Η χαλαζιακή άμμος καθώς και οι χαλαζίτες χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη της υαλουργίας σε τεράστιες ποσότητες. Η σκόνη του χαλαζία χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες πορσελάνης και απορρυπαντικών. Η μεγάλη σκληρότητά του τον κάνει κατάλληλη πρώτη ύλη για την κατασκευή εργαλείων κατεργασίας λίθων, ξύλου και δεμάτων.

Η Χημική ανάλυση της χαλαζιακής άμμου παρουσιάζεται παρακάτω. Η άμμος χρησιμοποιείται στην παραγωγή με μέγιστη υγρασία 6%.

Χημικός Τύπος	% Ποσοτική Συμμετοχή
SiO ₂	95.0 ± 1.0
Al ₂ O ₃	2.0 ± 0.5
Fe ₂ O ₃	0.12 ± 0.03

Σόδα

Κοινή ονομασία του ανθρακικού νατρίου (Na₂CO₃). Η άνυδρη (μη κρυσταλλική) σόδα έχει τη μορφή λευκής σκόνης, ευδιάλυτης, με σημείο τήξης 853 °C και ειδικό βάρος 2,5 γραμ./κυβ.εκ. Δεν έχει οσμή και η γεύση της μοιάζει με του σαπουνιού. Δε διασπάται με θέρμανση και αντιδρά με τα οξέα δίνοντας διοξείδιο του άνθρακα. Είναι συστατικό της στάχτης διαφόρων θαλάσσιων φυτών, κυρίως των φυκιών, από τα οποία εξαγόταν παλαιότερα.

Παρασκευάζεται με τρεις χημικές μεθόδους: τη μέθοδο Leblanc, τη μέθοδο Solvay και την ηλεκτρολυτική μέθοδο. Η σόδα χρησιμοποιείται στη υαλουργία και τη σαπωνοποιία. Επίσης χρησιμοποιείται για την αποσκλήρυνση του νερού, την εξουδετέρωση των οξέων, την παρασκευή υδροξειδίου του νατρίου κ.ά.

Θειικό νάτριο (άλας)

Το θειικό νάτριο (Na_2SO_4) είναι ένα βασικό συστατικό του νατρίου. Έχει μορφή άχρωμων ρομβοειδών κρυστάλλων ευδιάλυτων στο κρύο νερό. Γύρω στο 50% της παγκόσμιας παραγωγής του προέρχεται από τη φυσική ορυκτή μορφή του (sal mirabilis ή Glauber's salt), ενώ το υπόλοιπο από υποπροϊόντα χημικής διαδικασίας, το σπουδαιότερο εκ των οποίων είναι το υδροχλωρικό οξύ από χλωριούχο νάτριο και θειικό οξύ.

Το θειικό νάτριο είναι χημικά ιδιαίτερα σταθερό και δεν αντιδρά με οξειδωτικά ή αναγωγικά μέσα σε κανονικές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται κυρίως στη χαρτοβιομηχανία και στην υαλουργία. Στη βιομηχανία γυαλιού το θειικό νάτριο χρησιμοποιείται ως διαυγαστικό γυαλιού για την απομάκρυνση μικρών φυσαλίδων αέρα από λειωμένο γυαλί. Επίσης διευκολύνει τη συγκόλληση και εμποδίζει τον σχηματισμό αφρού από το λιωμένο γυαλί κατά τη διάρκεια της διαύγασης.

ΠΗΓΗ: <http://www.prismaglass.gr>