

# Πόλωση του φωτός

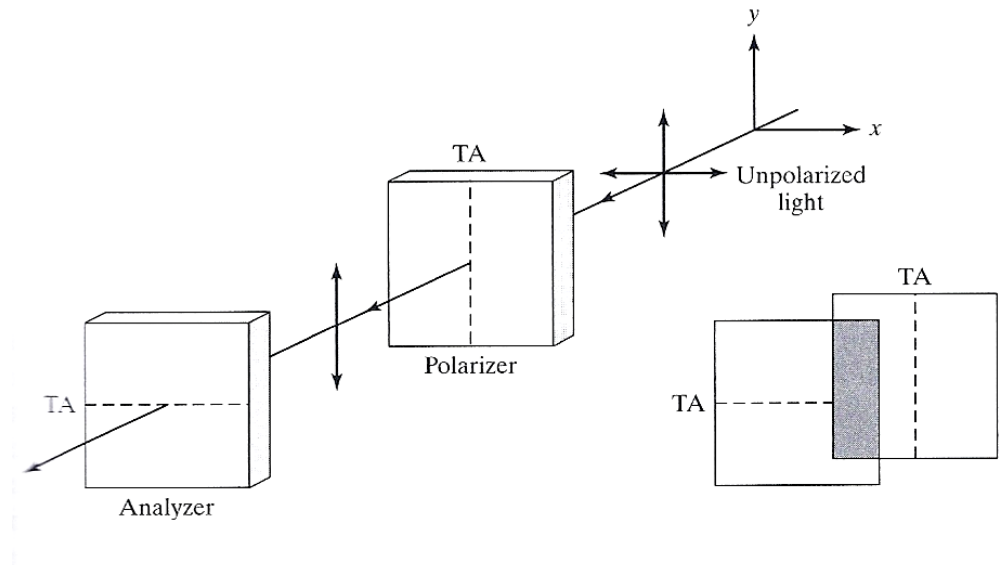


# Βασικές διαδικασίες παραγωγής πολωμένου φωτός

- πόλωση λόγω επιλεκτικής απορρόφησης - *διχρωισμός*
- πόλωση λόγω *ανάκλασης* από μια διηλεκτρική επιφάνεια
- πόλωση λόγω ύπαρξης δύο δεικτών διάθλασης - *διπλοθλαστικότητα*
- πόλωση λόγω *σκέδασης*
- μεταβολή της πόλωσης *ήδη* πολωμένου φωτός - *οπτική ενεργότητα*

# Πόλωση λόγω επιλεκτικής απορρόφησης – Διχρωισμός

- ❖ Ο διχρωικός πολωτής απορροφά επιλεκτικά ηλεκτρομαγνητικά κύματα με το ηλεκτρικό πεδίο παράλληλο προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση
- ❖ Άξονας διάδοσης είναι κάθετος προς τον άξονα απορρόφησης
- ❖ Σε ένα ιδανικό πολωτή το προκύπτον φως είναι 100% γραμμικά πολωμένο κατά τη μια διεύθυνση



# Νόμος του Malus

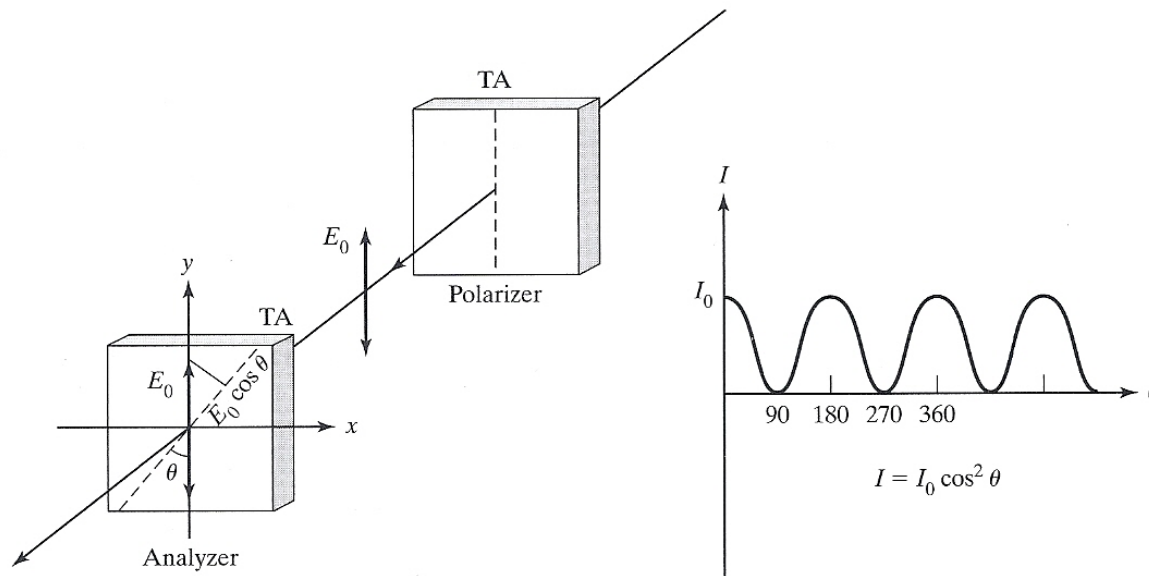
- ❖ Συνήθως, χρησιμοποιούμε δύο πολωτές σε σειρά, ένα για να πολώσουμε (πολωτής) και ένα για να αναλύσουμε το φως (αναλυτής).
- ❖ Η ένταση του φωτός που διέρχεται από τον αναλυτή ακολουθεί το νόμο του Malus:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

όπου:

$\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις TA των δύο πολωτών

$I_0$  είναι η μέγιστη διερχόμενη ένταση.

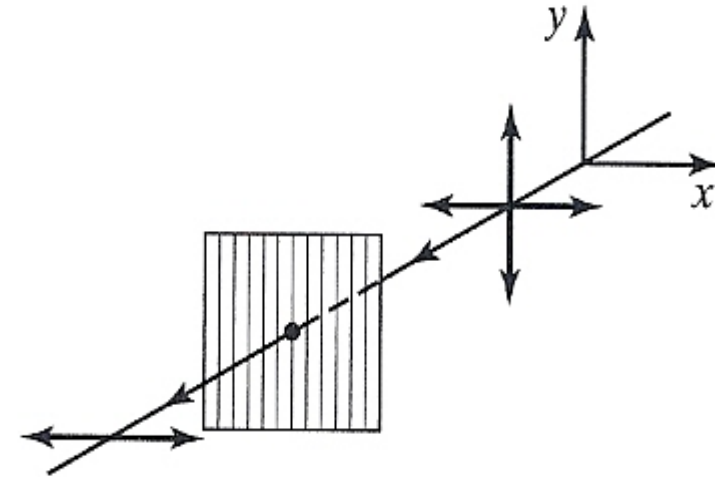


# Polaroid

- ❖ Οι πολωτές αποτελούνται από μακρομόρια, τα οποία είναι διατεταγμένα παράλληλα προς μια κατεύθυνση.
- ❖ Ο πιο γνωστός διχρωικός απορροφητής για το ορατό φως είναι το γνωστό φιλμ Polaroid, που εφευρέθηκε το 1928 από τον E.H. Land.
- ❖ Ένα διαφανές φύλλο πολυβινυλικής αλκοόλης θερμαίνεται κάτω από εφελκυσμό, τα μακρά μόρια της ένωσης τείνουν να ευθυγραμμισθούν κατά την κατεύθυνση του εφελκυσμού.
- ❖ Στα ευθυγραμμισμένα μόρια εμφυτεύονται κατόπιν άτομα ιωδίου τα οποία παρέχουν ένα είδος "ελεύθερων ηλεκτρονίων" στο ευθυγραμμισμένο μόριο, δημιουργώντας έτσι ένα επίπεδο με ευθυγραμμισμένες μικρές βελόνες αγωγιμότητας.
- ❖ Επειδή τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν μόνο προς μια κατεύθυνση, υπό την επίδραση ενός πεδίου με τυχαία πόλωση, το συνιστάμενο εκπεμπόμενο κύμα μακριά από το επίπεδο θα έχει -όπως αποδεικνύεται από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία- πόλωση παράλληλη προς την κατεύθυνση των μακρομορίων.
- ❖ Η κάθετη προς την κατεύθυνση αυτή συνιστώσα δεν διαδίδεται, αλλά "απορροφάται" σύμφωνα με το νόμο

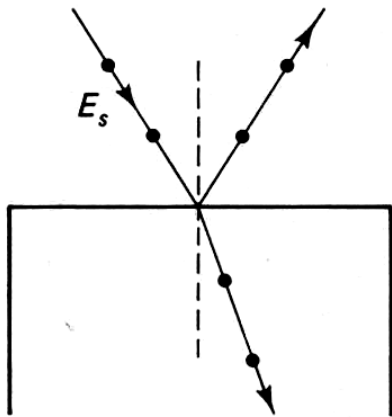
$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

όπου το  $\alpha$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης και  $x$  το πάχος του πολωτή.

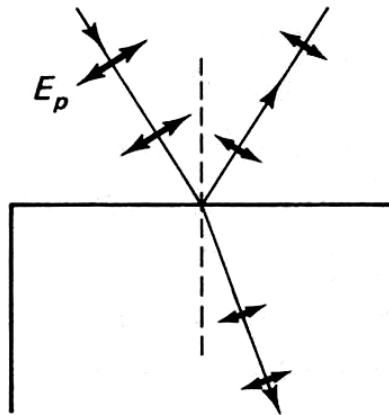


Ανάλογο πείραμα μπορεί να γίνει με "φράγμα" από σύρματα που φωτίζονται από μικροκυματική ακτινοβολία (απόσταση μεταξύ συρμάτων πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος)

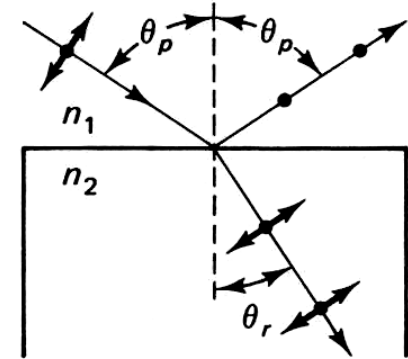
# Πόλωση λόγω ανάκλασης από διηλεκτρική επιφάνεια



(a)



(b)



(c)

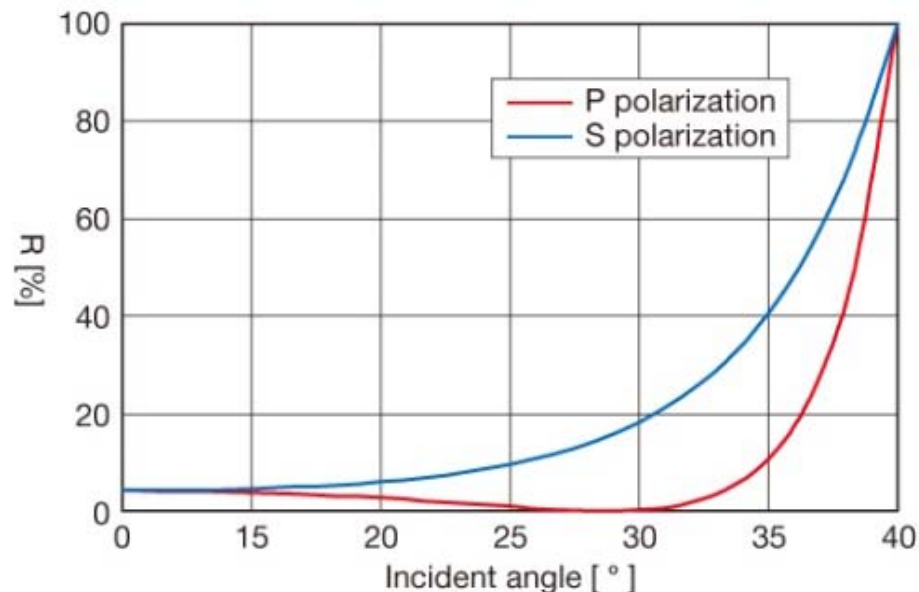
- ❖ Μια μη πολωμένη δέσμη φωτός μπορεί να αναπαρασταθεί από **δύο ορθογώνιες συνιστώσες**, εκ των οποίων **η μία είναι κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης** (που ορίζεται από την διεύθυνση διάδοσης της δέσμης και την κάθετο στην επιφάνεια), και **η άλλη είναι παράλληλη προς το επίπεδο αυτό**.
- ❖ Η πρώτη συνιστώσα συμβολίζεται με  $E_s$  και η δεύτερη με  $E_p$ . Η  $E_s$ , αντιστοιχεί σ' αυτό που ονομάζεται **Transverse Electric (TE) mode**, επειδή στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης. Η  $E_p$ , αντιστοιχεί σε ηλεκτρικό πεδίο παράλληλο προς το επίπεδο πρόσπτωσης, οπότε το μαγνητικό πεδίο είναι τώρα κάθετο στο επίπεδο αυτό, εξ ου και ο όρος **Transverse Magnetic (TM) mode**.

# Γωνία Brewster

- ❖ Η ένταση της ανακλώμενης δέσμης είναι συνάρτηση της γωνίας  $\theta_p$ , που σχηματίζει η προσπίπτουσα δέσμη με την κάθετο στη επιφάνεια, διότι τα ηλεκτρόνια κινούνται μόνο παράλληλα προς την επιφάνεια του υλικού και δεν μπορούν να εξέλθουν από αυτό.
- ❖ Άρα, όσο αυξάνει η γωνία  $\theta_p$ , τόσο η προβολή της  $E_p$  πάνω στην επιφάνεια μικραίνει, με αποτέλεσμα η συνεισφορά της στην ανάκλαση να ελαττώνεται.
- ❖ Το συμπέρασμα είναι ότι ενώ η συνεισφορά της συνιστώσας  $E_s$  δεν εξαρτάται από τη γωνία, η συνεισφορά της  $E_p$  εξαρτάται.

**μόνο ένα μέρος της συνιστώσας  $E_p$  θα εμφανισθεί στην ανακλώμενη δέσμη**

Η ανακλώμενη δέσμη είναι κυρίως TE, η διαθλώμενη δέσμη θα είναι κυρίως TM, εφόσον το άθροισμά τους θα πρέπει να δίνει την αρχική δέσμη.



# Γωνία Brewster

- ❖ Όταν οι άξονες των διπόλων είναι παράλληλοι προς την ανακλώμενη ακτίνα, τότε η ανακλώμενη ακτίνα θα είναι γραμμικά πολωμένη (περιέχοντας μόνο την συνιστώσα  $E_s$ ).
- ❖ Αυτός ο μοναδικός προσανατολισμός προκύπτει όταν η ανακλώμενη και η διαθλώμενη δέσμη είναι κάθετες μεταξύ τους. Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_p$ , για την οποία συμβαίνει αυτό λέγεται γωνία πόλωσης ή γωνία Brewster (σχήμα 9c).

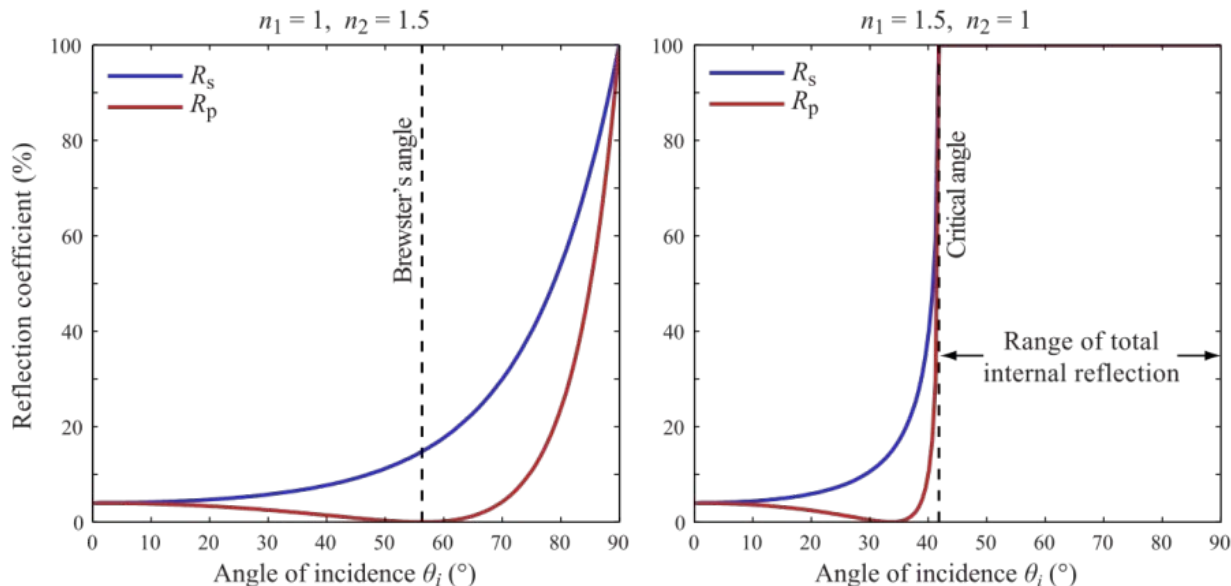
- ❖ Από το νόμο του Snell:  $n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_r$

και τη σχέση:  $\theta_r = 90 - \theta_p$  προκύπτει:  $n_1 \sin \theta_p = n_2 \cos \theta_p$

και επομένως έχουμε τη γωνία Brewster:

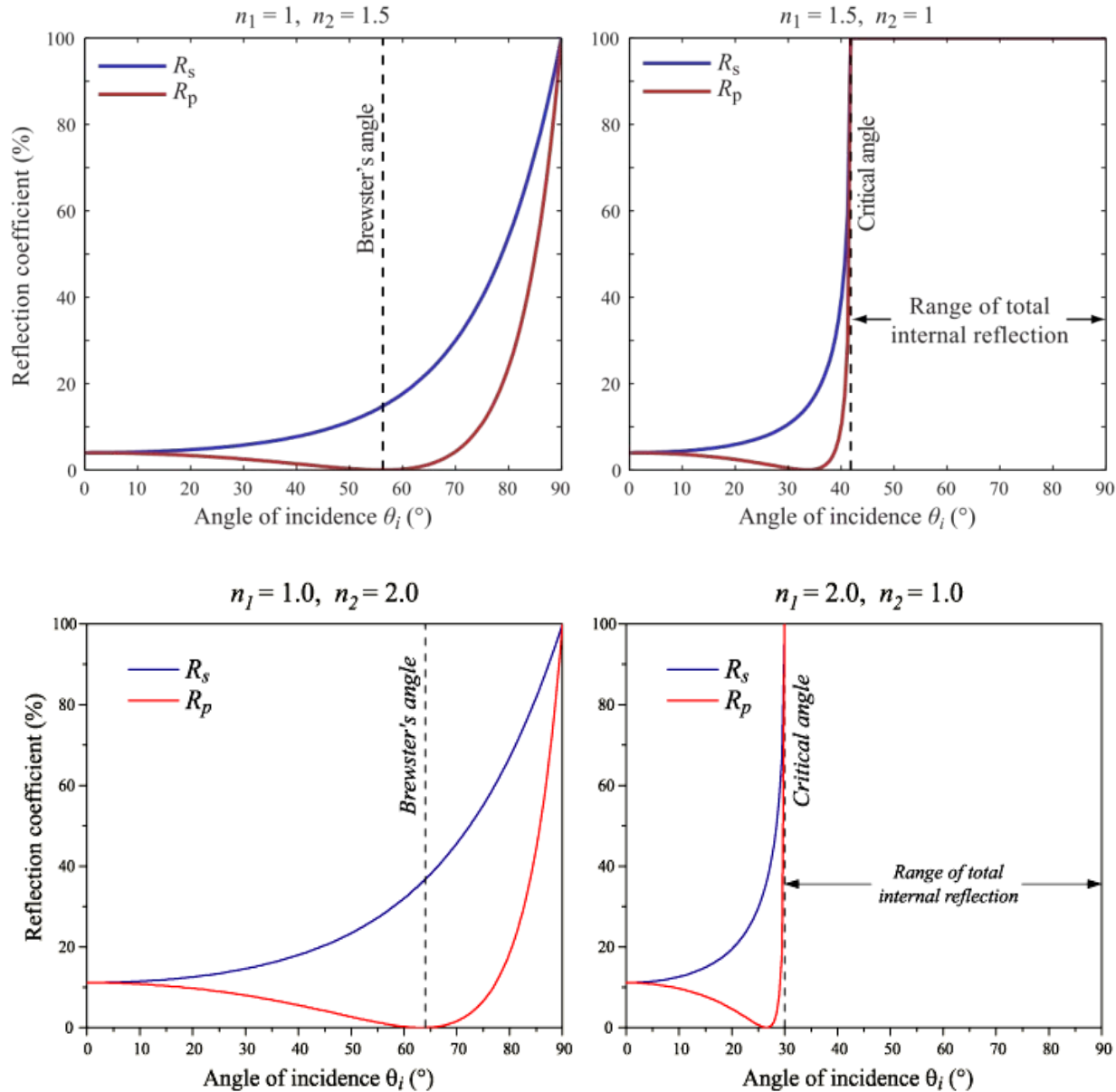
$$\theta_p = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

- ❖ Η μέθοδος της πόλωσης από ανάκλαση δεν είναι πολύ αποδοτική, όταν χρησιμοποιείται ένα μόνο πλακίδιο, γιατί η ανακλώμενη είναι περίπου το 15% της προσπίπτουσας έντασης.





# Γωνία Brewster



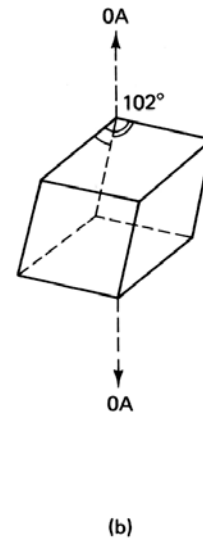
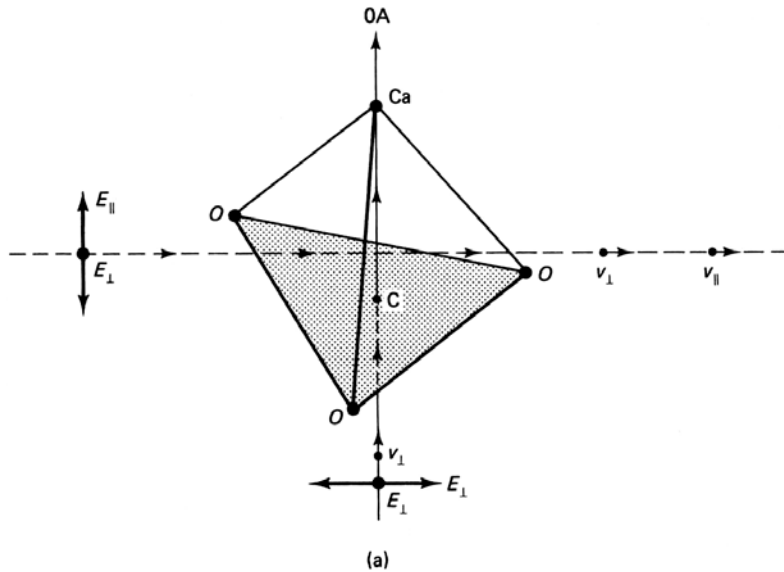
# Διπλοθλαστικότητα

Διπλοθλαστικά ονομάζονται τα υλικά που εμφανίζουν δύο δείκτες διάθλασης, ανάλογα με την κατεύθυνση της δέσμης φωτός σε σχέση με τον οπτικό άξονα του υλικού.

Το φαινόμενο της διπλοθλαστικότητας οφείλεται στην ανισοτροπία των δυνάμεων που συγκρατούν τα ηλεκτρόνια ενός κρυστάλλου.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο κρύσταλλος του ασβεστίτη.

Ασβεστίτης  $\text{CaCO}_3$



Διάδοση του φωτός μέσα από ένα κρύσταλλο ασβεστίτη.

Τα τρία άτομα του οξυγόνου σχηματίζουν τη βάση του τετραέδρου του μορίου.

Ο οπτικός άξονας είναι παράλληλος στην ευθεία που ενώνει τα άτομα C και Ca.

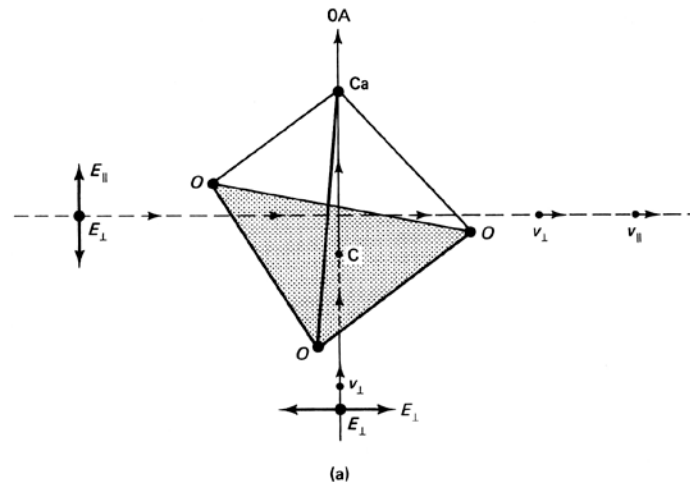
- **Δέσμη εισερχόμενη από τη βάση του κρυστάλλου**

Λόγω συμμετρίας, οι συνιστώσες του πεδίου αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια με ταλαντώσεις της ίδιας μορφής. Η κατεύθυνση αυτή της συμμετρίας ονομάζεται **οπτικός άξονας (OA)** του κρυστάλλου.

- **Δέσμη εισερχόμενη από το πλάι του κρυστάλλου**

Εδώ οι δύο συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου προκαλούν ταλαντώσεις στα ηλεκτρόνια των ατόμων της βάσης είτε στο επίπεδο, είτε κάθετα σ' αυτό, οι οποίες δεν έχουν το ίδιο πλάτος, λόγω της διαφοροποίησης ως προς την ευκολία κίνησης των ηλεκτρονίων στο επίπεδο της βάσης και στο κάθετο σ' αυτό επίπεδο,

(διαφοροποίηση της επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων στα αντίστοιχα δίπολα και εν συνεχεία σε διαφοροποίηση της έντασης του πεδίου που προκαλείται από τα δίπολα στις δύο κατευθύνσεις).



# Πλακίδια υστέρησης φάσης

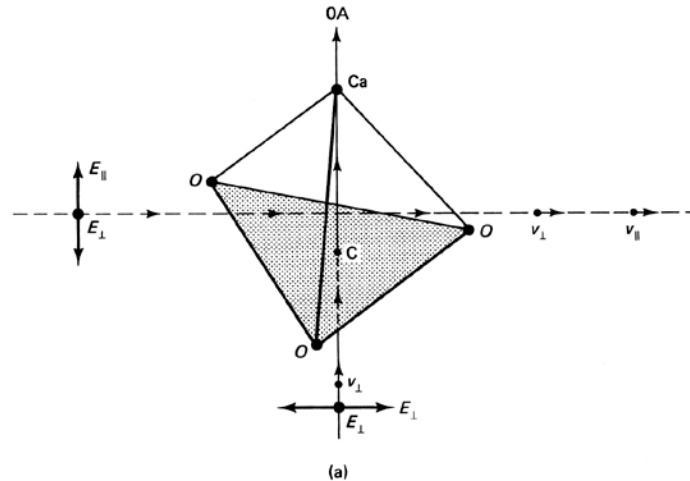
- Η κάθετη στον  $OA$  συνιστώσα του πεδίου αλληλεπιδρά περισσότερο δραστικά με τα ηλεκτρόνια του επιπέδου τριγώνου της βάσης.

Η συνέπεια είναι να έχουμε **μειωμένη ταχύτητα διάλευσης** γι' αυτή τη δέσμη.

- Εισάγεται μία διαφορά  $\Delta$  στους αντίστοιχους οπτικούς δρόμους.

Για κρύσταλλο πάχους  $d$  η διαφορά των οπτικών δρόμων είναι:

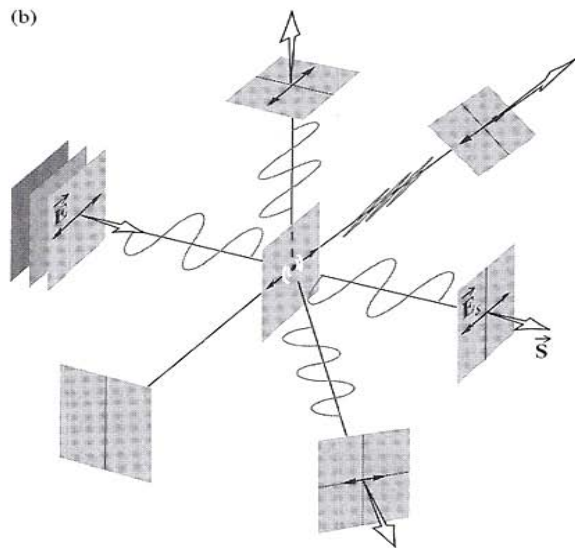
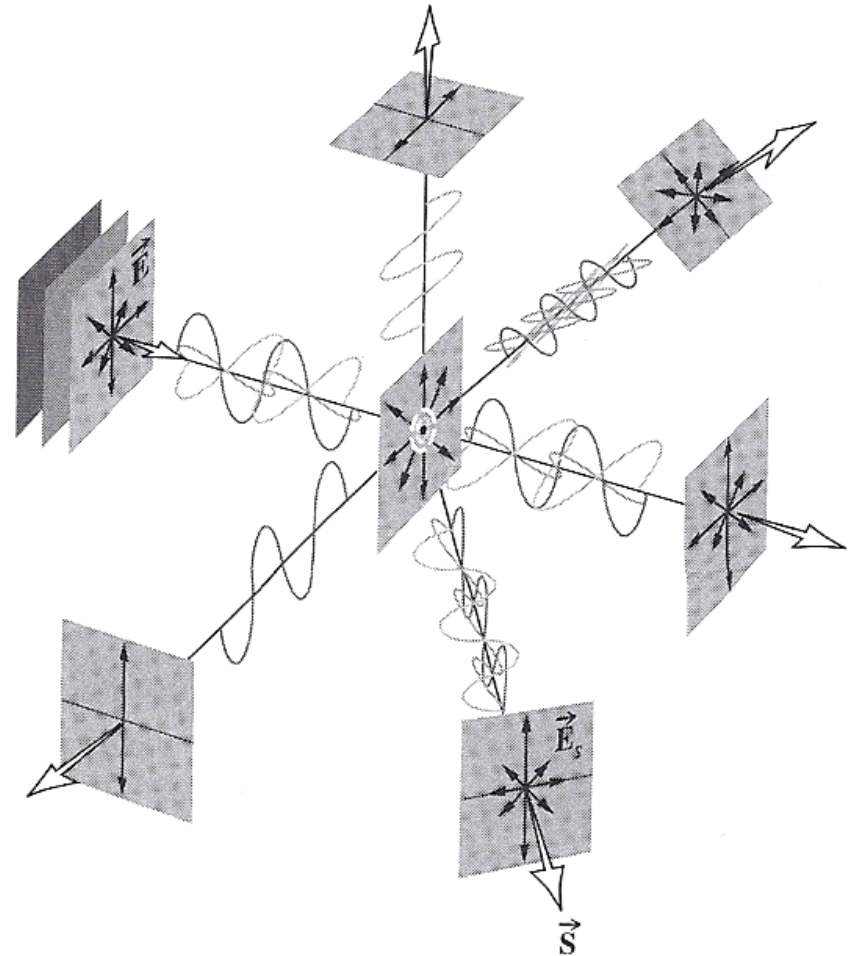
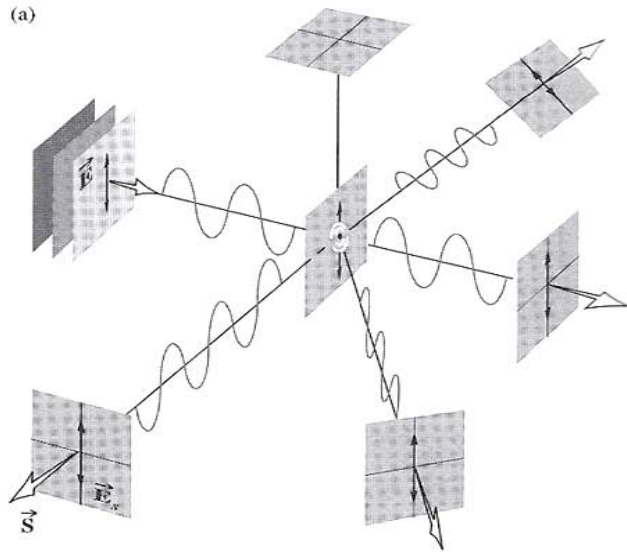
$$\Delta = |n_{\perp} - n_{\parallel}| d \rightarrow \text{Διαφορά φάσης:} \quad \Delta\phi = \frac{2\pi|\Delta|}{\lambda_o} = \frac{2\pi}{\lambda_o} |n_{\perp} - n_{\parallel}| d$$



Για  $d$  τέτοιο ώστε  $\Delta\phi = \pi/2$ , έχουμε ένα πλακίδιο  $\lambda/4$ .

# Πόλωση από σκέδαση

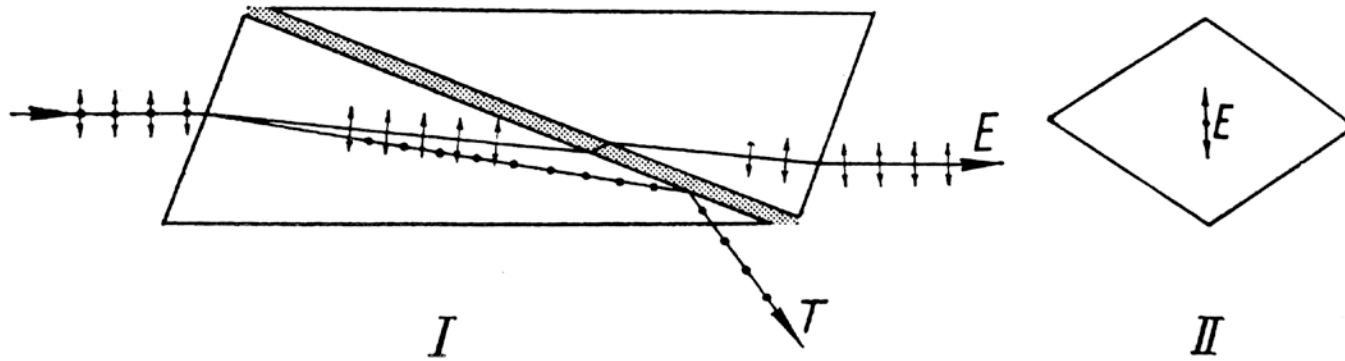
Το δίπολο δεν εκπέμπει κατά μήκος του άξονά του



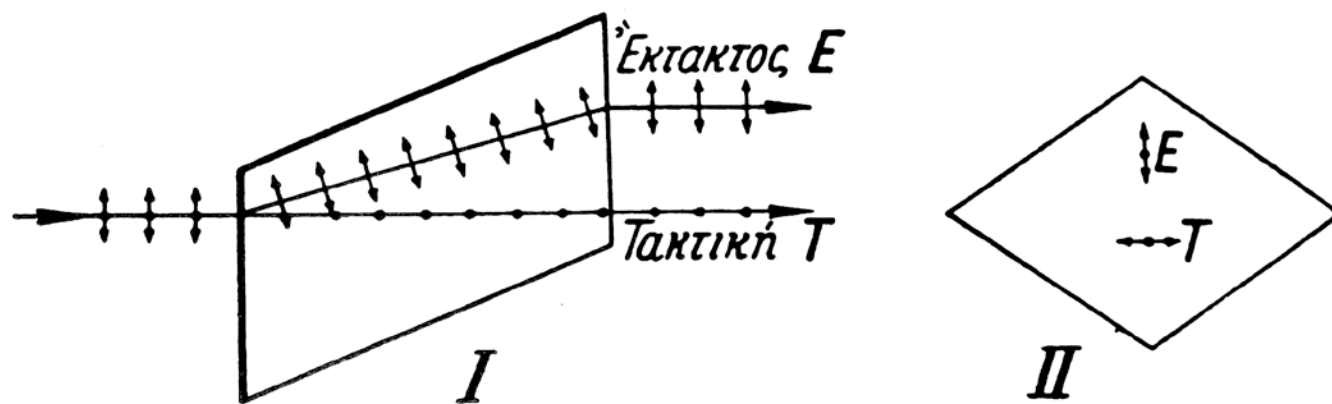
# Οπτική ενεργότητα

- ❖ Ορισμένα υλικά έχουν την ικανότητα να στρέφουν το επίπεδο πόλωσης του γραμμικά πολωμένου φωτός. Τέτοιο υλικό είναι, παραδείγματος χάριν, το διάλυμα ζάχαρης.
- ❖ Τα οπτικώς ενεργά υλικά αποτελούνται συνήθως από μακρομόρια, τα οποία έχουν σπειροειδή διάταξη με αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη απεικόνιση κοχλία.
- ❖ Ένα γραμμικά πολωμένο κύμα που διαδίδεται μέσα από ένα τέτοιο υλικό προκαλεί ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων, τα οποία κινούνται όχι μόνο κατά μήκος του άξονα της σπείρας, αλλά και γύρω από αυτήν.
- ❖ Γενικά, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα γραμμικά πολωμένο εγκάρσιο κύμα σαν άθροισμα δύο κυκλικά πολωμένων κυμάτων, του ενός με αριστερόστροφη πόλωση και του άλλου με δεξιόστροφη.
- ❖ Σύμφωνα με τα παραπάνω, αναμένεται το αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένο τμήμα της δέσμης να συμπεριφέρεται διαφορετικά στα σπειροειδή μόρια με δεξιόστροφη μορφή από ότι σε αυτά με αριστερόστροφη μορφή. Το ίδιο ισχύει και για την άλλη κυκλική συνιστώσα.
- ❖ Συνεπώς, **η ταχύτητα διάδοσης των δύο κυκλικά πολωμένων κυμάτων θα είναι διαφορετική μέσα από το οπτικά ενεργό υλικό**. Αν το υλικό έχει περισσότερα δεξιόστροφα σπειροειδή μόρια από αριστερόστροφα, τότε το συνολικό αποτέλεσμα θα είναι στροφή του επιπέδου της γραμμικής πόλωσης.

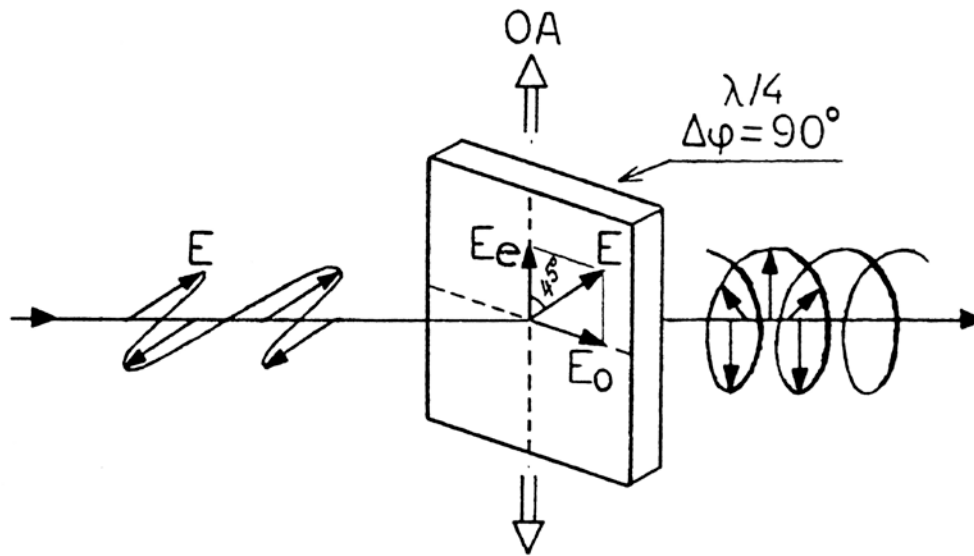
# Πρίσμα Νικολ



Διπλοθλαστικός κρύσταλλος  $\text{CaCO}_3$







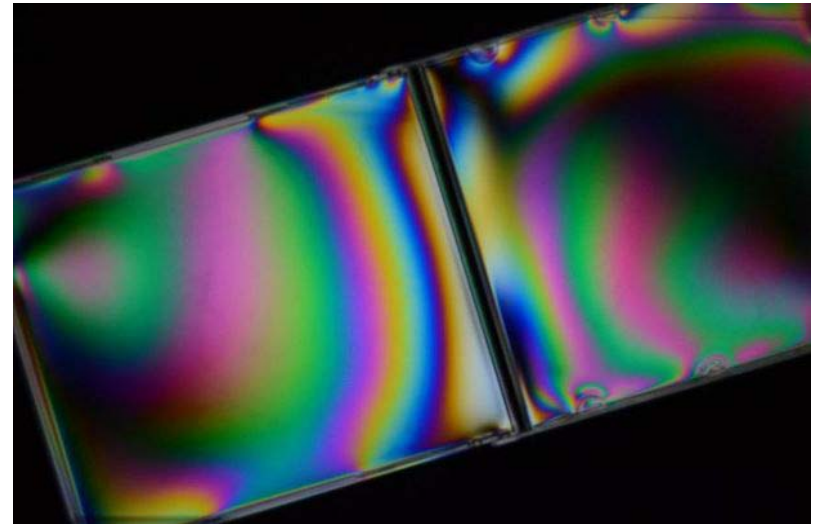
Κατά την πρόσπτωση γραμμικά πολωμένου φωτός σε πλακίδιο  $\lambda/4$ , με γωνία  $45^\circ$  με τον  $OA$  του πλακιδίου, προκύπτει κυκλικά πολωμένο φως.

# Χαρακτηριστικές περιπτώσεις πλακιδίων καθυστέρησης φάσης

Σύμφωνα με τα προηγούμενα εξηγούνται οι ακόλουθες περιπτώσεις :

- Πλακίδιο  $\Delta\phi$  + φυσικό φως :  
Προκύπτει φυσικό φως\*.
- Πλακίδιο  $\Delta\phi$  + γραμμικά πολωμένο φως :  
Προκύπτει ελλειπτικά πολωμένο φως (με οριακές περιπτώσεις κυκλικά και γραμμικά πολωμένο).
- Πλακίδιο  $\lambda/4$  ( $\Delta\phi=90^\circ$ ) + γραμμικά πολωμένο φως με το επίπεδο πόλωσης σε γωνία  $45^\circ$  με τον OA:  
Προκύπτει κυκλικά πολωμένο φως.
- Πλακίδιο  $\lambda/4$  ( $\Delta\phi=90^\circ$ ) + κυκλικά πολωμένο φως :  
Προκύπτει γραμμικά πολωμένο φως με επίπεδο πόλωσης σε  $45^\circ$  γωνία με τον OA.
- Πλακίδιο  $\lambda/2$  ( $\Delta\phi=180^\circ$ ) + γραμμικά πολωμένο φως με επίπεδο πόλωσης σε γωνία  $\omega$  με τον OA :  
Προκύπτει γραμμικά πολωμένο φως με στροφή του επιπέδου πόλωσης κατά γωνία  $\omega$  ως προς τον OA , δηλαδή κατά γωνία  $2\omega$  ως προς το αρχικό επίπεδο πόλωσης.

# Εφαρμογές πολωμένου φωτός



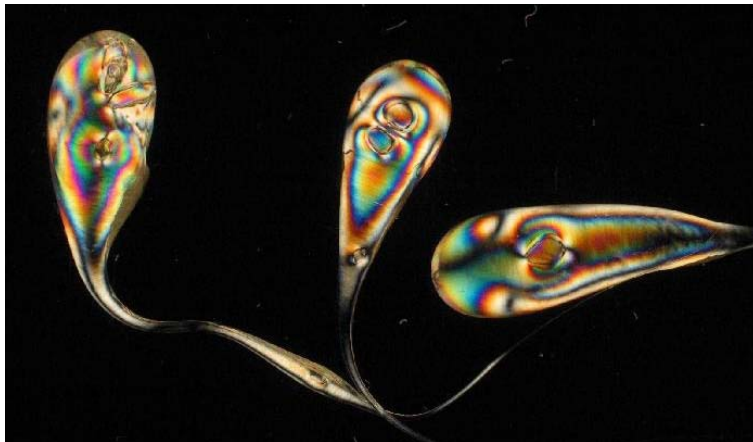
# Prince Rupert Drop

Οι Σταγόνες του Πρίγκιπα Rupert είναι υαλώδεις σταγόνες, που δημιουργούνται όταν λιωμένο γυαλί στάξει μέσα σε κρύο νερό, με αποτέλεσμα την απότομη ψύξη τους.

Το κρύο νερό προκαλεί στο γυαλί στερεοποίηση σε μια σταγόνα με σχήμα σαν δάκρυ με μακριά και λεπτή ουρά.

Οι πολύ υψηλές παραμένουσες τάσεις μέσα στη σταγόνα προσδίδουν την ικανότητα στη σταγόνα να αντέχει ένα χτύπημα από σφυρί ή μια σφαίρα στη βολβώδη άκρη χωρίς να σπάζουν.

Αντιθέτως, παρουσιάζουν εκρηκτική διάλυση, ακόμη και αν η άκρη στην ουρά είναι ελαφρώς κατεστραμμένη.



# Prince Rupert Drop

Παρόμοιες δομές παράγονται επίσης υπό ορισμένες προϋποθέσεις σε ηφαιστειακή λάβα.

Οι σταγόνες πήραν το όνομά τους από τον Πρίγκιπα Ρούπερτ του Ρήνου, που τις έφερε στην Αγγλία το 1660, αν και λέγεται ότι για πρώτη φορά παράχθηκαν στην Ολλανδία πριν από τον 17ο αιώνα και ήταν γνωστές στους υαλουργούς για πολύ περισσότερο.

Είχαν μελετηθεί ως επιστημονικές παραδοξότητες από τη Royal Society και η ανακάλυψη των ασυνήθιστων ιδιοτήτων τους πιθανότατα οδήγησε στην ανάπτυξη της διαδικασίας για την παραγωγή σκληρυμένου γυαλιού, κατοχυρωμένου με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1874.

