



■ ■ ■ ΣΧΟΛΗ
■ ■ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ
■ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Τμήμα: Ηλεκτρονικής

Πτυχιακή Εργασία

Οπτικός χαρακτηρισμός οργανικών διαλυτών

Μυρτιά Παπαμιχαήλ
Σωκράτης Χ. Μπέτσης

Α.Μ.:

5387

5325

Επιβλέπων : Κ. Μουτζούρης

Αθήνα, 29 Απριλίου 2013

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε για την καθοδήγη και την συμβολή του τον Κ. Μουτζούρη καθώς και τους Ε.Μ. Παπαμιχαήλ, ΔΒάττη, Χ. Φούντζουλα για την παραχώρηση των προς μελέτη δειγμάτων.

Περίληψη:

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία επιχειρήθηκε ο πειραματικός προσδιορισμός του δείκτη διάθλασης οργανικών διαλυτών σε σταθερή θερμοκρασία των 300K (27°C) σε ένα φάσμα μηκών κύματος ορατού φωτός (450nm, 532nm, 633nm) και υπέρυθρου (964nm, 1551nm). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ηλεκτρικού χαρακτηρισμού υλικών και ηλεκτρικών διατάξεων με τη χρήση του διαθλασίμετρου σύζευξης πρίσματος της Metricon. Οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή εξισώσεων χρωματικής διασποράς που καλύπτουν το ορατό και κοντινό υπέρυθρο φάσμα. Στη συνέχεια, οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον θεωρητικό υπολογισμό της διασποράς της ταχύτητας ομάδας (GVD). Τέλος χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα (και σε ορισμένες περιπτώσεις τις εξισώσεις διασποράς) και δεδομένα από την βιβλιογραφία για διαφορετικές θερμοκρασίες, έγινε υπολογισμός της εκτιμώμενης τιμής των θερμο-οπτικών συντελεστών (TOC), δηλαδή της μεταβολής του δείκτη διάθλασης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

Abstract:

In the present study it was attempted the experimental determination of the refractive index of organic solvents at a constant temperature of 300K (27°C) in a range of wavelengths of visible light (450nm, 532nm, 633nm) and infrared (964nm, 1551nm). Measurements were performed in the laboratory "Electrical characterization of materials and electrical devices", using the refractometer prism coupling of Metricon. The measurements used to build equations of chromatic dispersion which cover the visible and near infrared spectrum. Then, these relations were used for the theoretical calculation of the group velocity dispersion (GVD). Finally using the experimental data (and in some cases the dispersion equations) and data from the literature for different temperatures, was calculated the estimated value of the thermo-optical coefficients (TOC), i.e. the change of the refractive index as a function of temperature.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	2
Εισαγωγικές Έννοιες.....	2
1.1 Η φυσική σημασία του δείκτη διάθλασης, φαινόμενα διασποράς και εμπειρικές εξισώσεις	2
1.2 Τεχνικές μέτρησης του δείκτη διάθλασης	5
1.3 Οργανικά υγρά: Τα υλικά και οι κοινές εφαρμογές τους	8
1.4 Σκοποί και στόχοι παρούσας μελέτης.....	12
1.5 Μεθοδολογική προσέγγιση.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	15
Δείκτης διάθλασης και διασπορά του δ.δ. από 450nm έως 1551nm	15
2.1 Πειραματικές μετρήσεις του δείκτη διάθλασης	15
2.2 Θεωρητικές σχέσεις διασποράς.....	16
2.3 Γραφική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σύγκριση με βιβλιογραφικά δεδομένα.....	17
2.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	27
Θερμο-οπτικοί Συντελεστές	27
3.1 Εισαγωγή	27
3.2 Υπολογισμός θερμο-οπτικού συντελεστή.....	27
3.3 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	34
Ενδεικτική εφαρμογή: Διασπορά ταχύτητας ομάδας.....	34
4.1 Εισαγωγικές έννοιες: Ταχύτητα φάσης και ταχύτητα ομάδας	34
4.2 Υπολογισμός διασποράς ταχύτητας ομάδας	36
4.3 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	39
Σύνοψη και συμπεράσματα	39
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	41
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγικές Έννοιες

1.1 Η φυσική σημασία του δείκτη διάθλασης, φαινόμενα διασποράς και εμπειρικές εξισώσεις

Οι θεμελιώδεις νόμοι που διέπουν όλα τα φαινόμενα διάδοσης και αλληλεπίδρασης της οπτικής ακτινοβολίας με την ύλη, συνοψίζονται στις διάσημες εξισώσεις Maxwell. Είναι γνωστό πως με σχετικά απλή μαθηματική επεξεργασία των εξισώσεων αυτών προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση για το ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} (καθώς και μία ανάλογη για το μαγνητικό):

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (1.1)$$

όπου η σταθερά ϵ_0 καλείται ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού, ενώ η ποσότητα ϵ ονομάζεται διηλεκτρική σταθερά (ή σχετική επιτρεπτότητα) και είναι χαρακτηριστική του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδεται η ακτινοβολία. Η τεράστια σημασία της εξίσωσης (1.1) έγκειται στο γεγονός πως έχει πανομοιότυπη μορφή με την κλασσική διαφορική εξίσωση που περιγράφει γενικά κάθε μηχανικό κύμα, δηλαδή οποιαδήποτε «διαταραχή» φ η οποία διαδίδεται στο χώρο και το χρόνο με ταχύτητα u , έτσι ώστε:

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{u^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0. \quad (1.2)$$

Από τα προηγούμενα εξάγεται ένα πλήθος χρήσιμων συμπερασμάτων. Καταρχάς, συμπεραίνουμε πως η εξίσωση (1.1) αναφέρεται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα, δηλαδή σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που ταλαντώνονται σε επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσής της (και μεταξύ τους). Το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου ορίζει την πόλωση της οπτικής ακτινοβολίας, συνεπώς αντιλαμβανόμαστε πως τα ηλεκτρομαγνητικά αυτά κύματα διαδίδονται στο υλικό με ταχύτητα c η οποία, κατόπιν σύγκρισης των (1.1) και (1.2), είναι ίση με:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon}} \quad (1.3)$$

Αν τώρα το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στο κενό, το οποίο έχει διηλεκτρική σταθερά $\epsilon = 1$, τότε η ταχύτητά του c_0 δίνεται από τη σχέση:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0}} \quad (1.4)$$

Θα πρέπει να διευκρινιστεί σε αυτό το σημείο πως για να καταλήξουμε στη μορφή της εξίσωσης (1.1) έχουμε αποδεχτεί μία σειρά προσεγγιστικών απλοποιήσεων, ότι δηλαδή το μέσο μέσα στο οποίο διαδίδεται η οπτική ακτινοβολία είναι διηλεκτρικό, χωρίς απώλειες, και ότι δεν εμφανίζει μαγνητικές ιδιότητες. Αυτές οι προσεγγίσεις είναι συμβατές με τα φυσικά χαρακτηριστικά των οργανικών διαλυτών που μελετώνται σε αυτή την εργασία.

Με βάση τα παραπάνω, ο δείκτης διάθλασης n του κάθε υλικού ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό c_0 , προς την ταχύτητα του φωτός στο συγκεκριμένο υλικό:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (1.5)$$

Από τις (1.3), (1.4) εύκολα προκύπτει η άμεση σύνδεση του δείκτη διάθλασης με την διηλεκτρική σταθερά μέσω της σχέσης:

$$n = \sqrt{\epsilon} \quad (1.6)$$

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως, στη γενικότερη περίπτωση και χρησιμοποιώντας τη μιγαδική αναπαράσταση των λύσεων της κυματικής εξίσωσης, τόσο η διηλεκτρική σταθερά όσο και ο δείκτης διάθλασης προκύπτουν ως μιγαδικές ποσότητες, το φανταστικό μέρος των οποίων φέρει πληροφορία σχετικά με τις απώλειες διάδοσης της ακτινοβολίας. Αγνοώντας τέτοια φαινόμενα, στο εξής θα αναφερόμαστε στον όρο «δείκτης διάθλασης» εννοώντας το πραγματικό και μόνο μέρος αυτού του φυσικού μεγέθους.

Πρέπει να σημειωθεί πως στην απλούστερη περίπτωση, ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού παραμένει σταθερός, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση διάδοσης τις οπτικής ακτινοβολίας ή της πόλωσής της. Τέτοια υλικά ονομάζονται ισοτροπικά. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα επικεντρωθούμε στην μελέτη αυτών των υλικών (υγρών) όπου ανήκουν και οι οργανικοί διαλύτες. Υπάρχει όμως και ένα πλήθος κρυσταλλικών υλικών, ο δείκτης διάθλασης των οποίων εξαρτάται τόσο από την κατεύθυνση διάδοσης, όσο και από την πόλωση του φωτός. Το φαινόμενο αυτό καλείται διπλή διάθλαση ή διπλοθλαστικότητα. Προφανώς το φαινόμενο αυτό δεν θα μας απασχολήσει στη συγκεκριμένη εργασία.

Είναι γνωστό πως η διηλεκτρική σταθερά και ο δείκτης διάθλασης εξαρτώνται από τη συχνότητα και το μήκος κύματος του φωτός (με άλλα λόγια, από το χρώμα του). Η εξάρτηση αυτή είναι γνωστή και ως χρωματική διασπορά, αναφέρεται δε συχνά ως απλώς διασπορά. Η χρωματική διασπορά είναι υπεύθυνη για ένα πλήθος οπτικών φαινομένων που έχουν γίνει σε όλους αντιληπτά μέσω τις καθημερινής εμπειρίας, όπως για παράδειγμα ο σχηματισμός του ουράνιου τόξου. Να σημειωθεί πως ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται επίσης και από τη θερμοκρασία του υλικού, ένα φαινόμενο που, κατά αναλογία, καλείται θερμοκρασιακή διασπορά.

Η γνώση του δείκτη διάθλασης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι σπουδαίας σημασίας για κάθε πρακτική οπτική εφαρμογή, από την κατασκευή φακών, μέχρι το σχεδιασμό προηγμένων φωτονικών διατάξεων γραμμικής και μη γραμμικής οπτικής. Λαμβάνοντας υπόψη ότι πρακτικά η πειραματική μέτρηση του δείκτη διάθλασης μπορεί να γίνει μόνο σε περιορισμένο πλήθος τιμών του μήκους κύματος, καθώς και το ότι δεν υπάρχει ακριβής θεωρητική ερμηνεία και περιγραφή της χρωματικής διασποράς, γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα της κατάστρωσης «εμπειρικών» μαθηματικών σχέσεων μοντελοποίησης του φαινομένου αυτού.

Η αναζήτηση τέτοιων εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες μπορούν να παραχθούν με βάση πειραματικά δεδομένα και να προβλέψουν με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια το δείκτη διάθλασης σε μήκη κύματος άλλα από αυτά της πειραματικής μέτρησης, είναι μία επιστημονική προσπάθεια που συνεχίζεται αδιάκοπα τις τελευταίους δύο αιώνες! Αυτό το γεγονός, έχει ως αυτονόητο αποτέλεσμα να συναντά κανείς στη

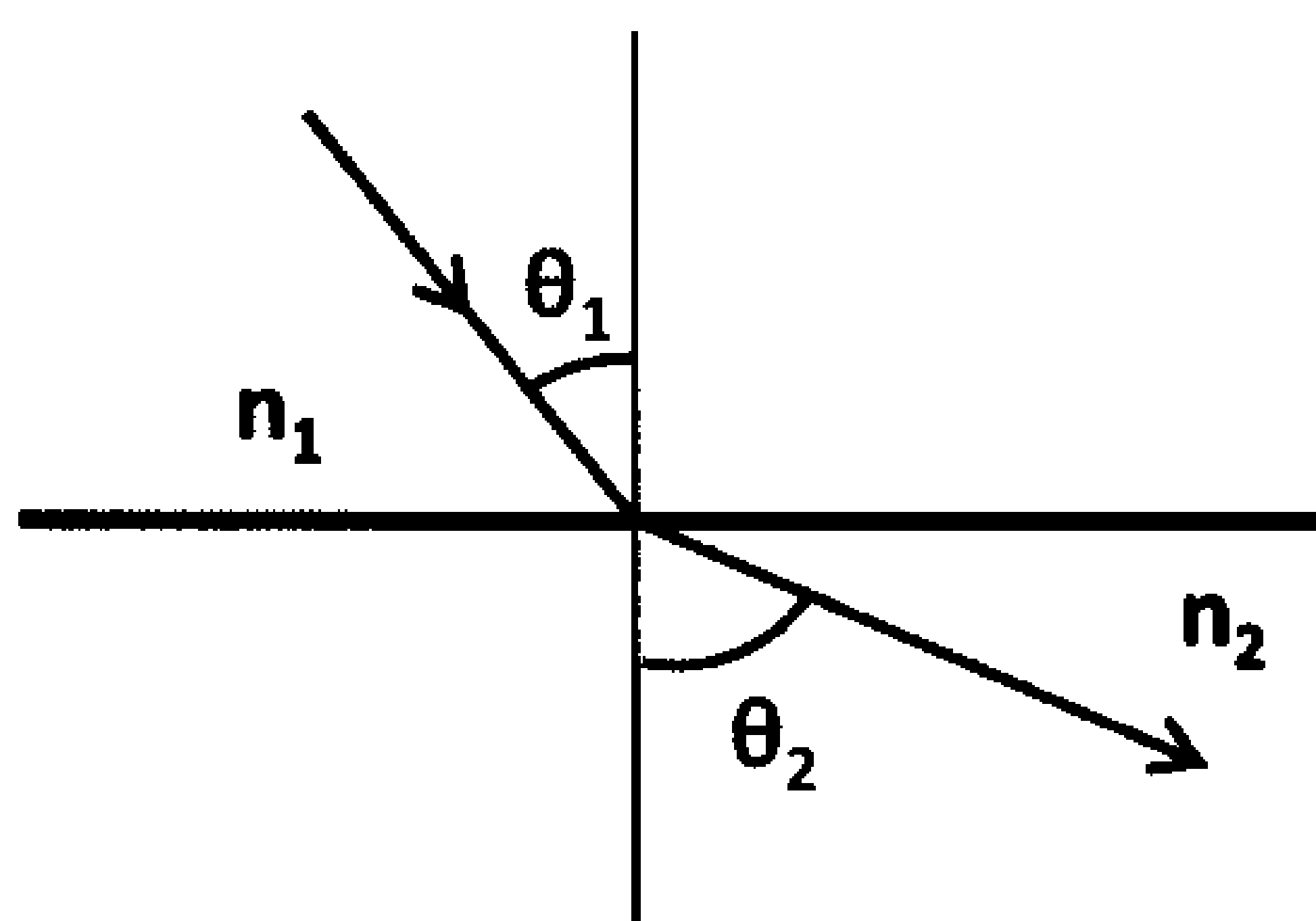
βιβλιογραφία ένα μεγάλο πλήθος εμπειρικών σχέσεων διασποράς. Σε αυτή την εργασία θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Schott (ή Ohara) [47]:

$$n^2(\lambda) = A_0 + A_1 \cdot \lambda^2 + \sum_{i=2,3,4\dots} \frac{A_i}{\lambda^{2i-2}}. \quad (1.7)$$

Είναι σαφές ότι το πλήθος των όρων που μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει διαφέρει ανά περίπτωση. Είναι γενική αρχή πως μεγαλύτερος αριθμός όρων συνεπάγεται βέλτιστη ικανότητα προσομοίωσης σε ευρύτερες φασματικές περιοχές. Ο απόλυτος περιορισμός στον αριθμό των όρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή, προκύπτει από τη μαθηματική απαίτηση ότι ο μέγιστος αριθμός συντελεστών " A_i " δεν δύναται να υπερβεί το πλήθος των διαθέσιμων πειραματικών μετρήσεων.

1.2 Τεχνικές μέτρησης του δείκτη διάθλασης

Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί μία σύντομη επισκόπηση πειραματικών τεχνικών μέτρησης του δείκτη διάθλασης. Οι συνηθέστερες από αυτές τις τεχνικές, βασίζονται σε εννοιολογικά απλά φαινόμενα γεωμετρικής οπτικής [43], όπως για παράδειγμα στο φαινόμενο της διάθλασης, της εκτροπής δηλαδή της ευθύγραμμης κατεύθυνσης διάδοσης του οπτικού κύματος, όταν αυτό περνά μέσα από μία διεπιφάνεια η οποία χωρίζει δύο διαφορετικά υλικά (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Φαινόμενο διάθλασης

Η διάθλαση του φωτός περιγράφεται μαθηματικά σχέση από το νόμο του Snell:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \text{ ή ισοδύναμα: } n_1 = n_2 \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}. \quad (1.8)$$

όπου c_1, c_2 είναι οι ταχύτητες του φωτός μέσα στα δύο υλικά, θ_1, θ_2 οι αντίστοιχες γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης που διακρίνονται στο σχήμα, και n_1, n_2 οι δείκτες διάθλασης των δύο υλικών.

Είναι σαφές από το νόμο του Snell πως με χρήση ενός «υλικού αναφοράς» γνωστού δείκτη διάθλασης n_2 , και με πειραματική μέτρηση των γωνιών πρόσπτωσης θ_1 και διάθλασης θ_2 (η οποία μπορεί να γίνει με εξαιρετική ακρίβεια), μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα ο δείκτης διάθλασης n_1 οποιουδήποτε υλικού είναι σε άμεση επαφή με το υλικό αναφοράς.

Μια εναλλακτική προσέγγιση βασίζεται στο φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό ως εξής: Είναι προφανές (βλ. σχήμα 1.1) πως αν αυξηθεί η γωνία πρόσπτωσης θ_1 θα αυξηθεί και η γωνία διάθλασης θ_2 . Υπό την προϋπόθεση μάλιστα ότι $n_1 > n_2$ (συνθήκη η οποία συνεπάγεται από το νόμο του Snell ότι $\theta_1 < \theta_2$) υπάρχει μία κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης $\theta_1 = \theta_c$ για την οποία η γωνία διάθλασης γίνεται ίση με $\theta_2 = 90^\circ$. Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες ή ίσες της κρίσιμης γωνίας, η δέσμη φωτός δεν διαδίδεται καθόλου στο δεύτερο μέσο, αλλά ανακλάται πλήρως στη διεπιφάνεια. Η κρίσιμη γωνία μπορεί σχετικά εύκολα να εντοπιστεί με χρήση κατάλληλου οπτικού ανιχνευτή, ή και με απλή οπτική παρατήρηση. Με αυτό τον τρόπο, ο δείκτης διάθλασης του άγνωστου μέσου προσδιορίζεται άμεσα από το νόμο του Snell, ο οποίος στην περίπτωση αυτή γράφεται στη μορφή:

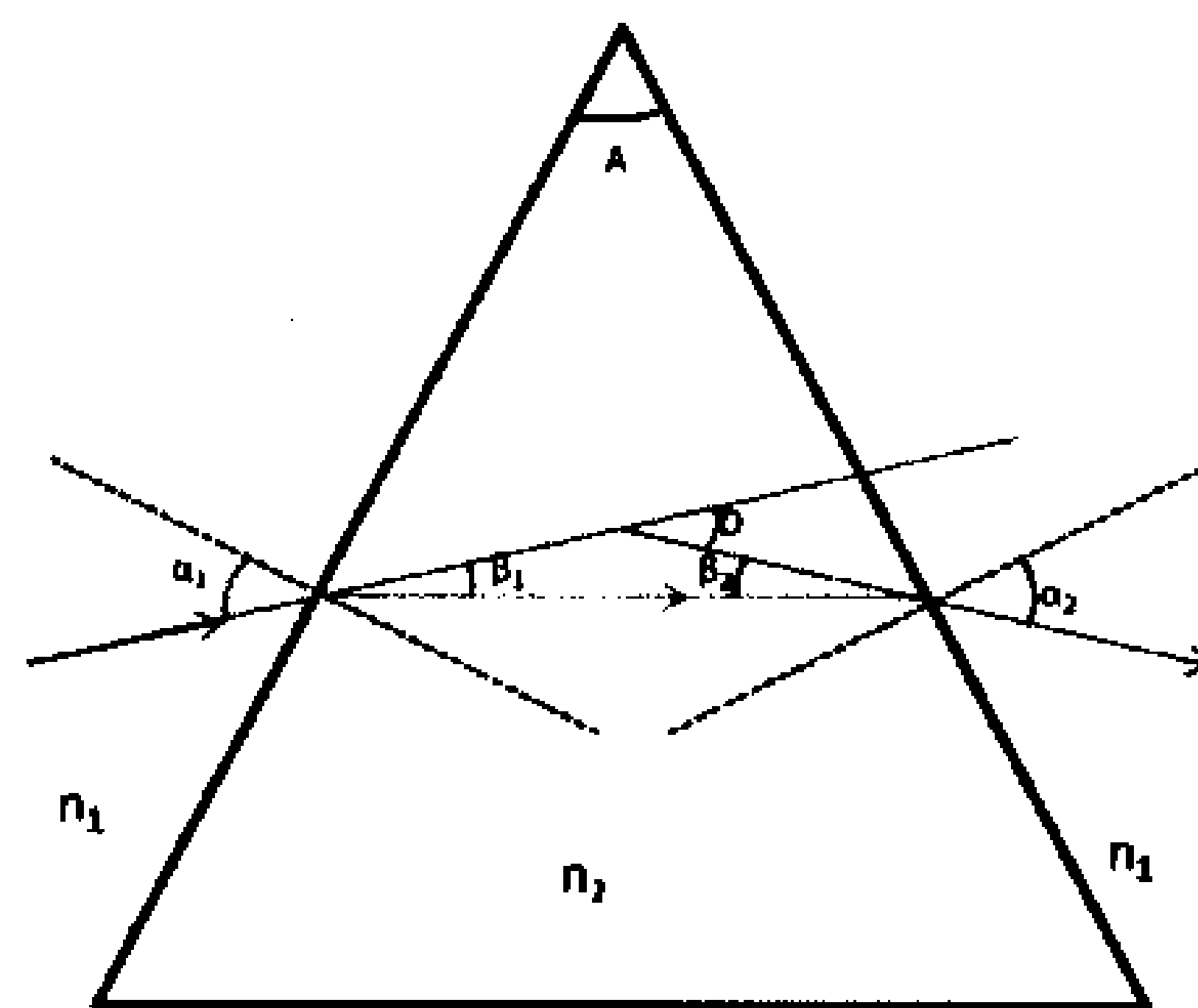
$$\frac{\sin \theta_c}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \text{ ή ισοδύναμα: } n_1 = \frac{n_2}{\sin \theta_c}. \quad (1.9)$$

Μία τρίτη κατηγορία τεχνικών προσδιορισμού του δείκτη διάθλασης, βασίζεται στη μέτρηση της γωνίας ελάχιστης εκτροπής όταν μία δέσμη φωτός διαδίδεται σε πρίσμα (σχήμα 1.2). Συγκεκριμένα, μπορεί σχετικά εύκολα να αποδειχτεί ότι η γωνία

εκτροπής D (η γωνία δηλαδή που σχηματίζει η εξερχόμενη από το πρίσμα δέσμη με την προέκταση της εισερχόμενης στο πρίσμα δέσμης) ελαχιστοποιείται σε μία και μόνη χαρακτηριστική γεωμετρία: όταν δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης στην έδρα εισόδου του πρίσματος α_1 είναι ίση με τη γωνία διάθλασης στην έδρα εξόδου α_2 . Σε αυτή την περίπτωση, η δέσμη στο εσωτερικό του πρίσματος είναι παράλληλη στη βάση του πρίσματος, ενώ ακόμα ο δείκτης διάθλασης του πρίσματος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$n_2 = \frac{n_1 \cdot \sin\left\{\frac{A+D}{2}\right\}}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)} \quad (1.10)$$

όπου n_1 είναι ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος μέσου (στη συνηθέστερη περίπτωση, του αέρα), A είναι η γωνία που σχηματίζουν οι έδρες του πρίσματος και D είναι η γωνία της ελάχιστης εκτροπής όπως φαίνεται στο σχήμα (1.2).



Σχήμα 1.2: Διάθλαση φωτός μέσω ενός πρίσματος

Όπως είναι σαφές, ο προσδιορισμός της γωνίας ελάχιστης απόκλισης οδηγεί στον υπολογισμό του δείκτη διάθλασης μέσω της σχέσης (1.10). Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε στερεά δοκίμια, τα οποία έχουν κοπεί σε πρισματικό σχήμα, όσο και σε υγρά δείγματα. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιούνται κούφια πρίσματα με λεπτά τοιχώματα (ώστε η επίδραση των τοιχωμάτων να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα) τα οποία γεμίζονται με το προς εξέταση υγρό.

Πέρα από τις τεχνικές γεωμετρικής οπτικής που βασίζονται σε μετρήσεις κρίσιμων γωνιών, όπως αυτές που συνοψίστηκαν στα προηγούμενα, έχουν αναπτυχθεί και διάφορες άλλες πειραματικές διατάξεις προσδιορισμού του δείκτη διάθλασης, που περιλαμβάνουν τεχνικές μελέτης σκέδασης Mie [6], πολωσιμετρικές τεχνικές [30], καθώς επίσης και τεχνικές με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών [42, 44]. Αξίζει να αναφερθεί πως ανεξάρτητα από την αρχή λειτουργίας της κάθε μεθόδου, ο πειραματικός προσδιορισμός του δείκτη διάθλασης επιτυγχάνεται με τυπική ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις προχωρημένων αλλά ιδιαίτερα υψηλού κόστους τεχνικών, η μέτρηση του δείκτη διάθλασης μπορεί να γίνει με ακρίβεια έως και δέκατου δεκαδικού ψηφίου.

1.3 Οργανικά υγρά: Τα υλικά και οι κοινές εφαρμογές τους

Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα πτυχιακή θα ασχοληθούμε με τον δείκτη διάθλασης υγρών και συγκεκριμένα κάποιων οργανικών διαλυτών, οι οποίοι παρατίθενται πιο κάτω με μερικές από τις βασικές τους ιδιότητες και χρήσεις.

Διαλύτης:	Ισο-βουτανόλη (Iso-Butanol)
Χημικός τύπος:	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{OH}$
Άλλα ονόματα:	Isobutyl alcohol, IBA, 2-methylpropyl alcohol
Φυσικές Ιδιότητες:	Άχρωμος, εύφλεκτος, με χαρακτηριστική οσμή
Επικινδυνότητα:	Ελάχιστα τοξικός
Κοινές Εφαρμογές:	Στην παραγωγή βερνικιού, στη βιομηχανία τροφίμων και ως προσθετικό βενζίνης

Διαλύτης:	Αμυλική Αλκοόλη (Amyl Alcohol)
Χημικός τύπος:	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$
Άλλα ονόματα:	n-pentanol, pentan-1-ol
Φυσικές Ιδιότητες:	Άχρωμο, εύφλεκτο υγρό με δυσάρεστο άρωμα
Επικινδυνότητα:	Ερεθιστικό στο δέρμα, επιβλαβές αν εισπνευσθεί
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται ως διαλύτης για επίστρωση σε DVD και ως υποκατάστατο βενζίνης

Διαλύτης:	Ισο-αμυλική Αλκοόλη (Iso-Amyl Alcohol)
Χημικός τύπος:	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
Άλλα ονόματα:	Isopentylalcohol, Isopentanol, Isobutylcarbinol
Φυσικές Ιδιότητες:	Διαυγές, άχρωμο υγρό
Επικινδυνότητα:	Ερεθισμός των ματιών, των βλεννογόνων και ναυτία
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται ως βασικό συστατικό του ελαίου μπανάνας και ως αρωματική ύλη στη βιομηχανία

Διαλύτης:	1,5 Πεντανο-διόλη (1,5Pentane-diol)
Χημικός τύπος:	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_2$
Άλλα ονόματα:	Pentylene glycol, Pentamethylene glycol, 1,5 Dihydroxypentane
Φυσικές Ιδιότητες:	Παχύρευστο, άχρωμο, ιξώδες υγρό
Επικινδυνότητα:	Σε συνεχή έκθεση μπορεί να προκαλέσει προσωρινή ανικανότητα
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται ως πλαστικοποιητής και σχηματίζει πολυεστέρες που χρησιμοποιούνται ως γαλακτοματοποιητές και ως ενδιάμεσα ρητίνης

Διαλύτης:	1-Προπανόλη (1-Propanol)
Χημικός τύπος:	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$
Άλλα ονόματα:	propan-1-ol, 1-propyl alcohol, n-propyl alcohol, n-propanol, or simply propanol
Φυσικές Ιδιότητες:	Άχρωμο, εύφλεκτο υγρό
Επικινδυνότητα:	Μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό ματιών, ζαλάδα και υπνηλία
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται ως διαλύτης στην φαρμακευτική βιομηχανία καθώς και στη σύνθεση ρητινών

Διαλύτης:	1-Βουτανόλη (1-Butanol)
Χημικός τύπος:	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$
Άλλα ονόματα:	n-Butanol , n-butyl alcohol, normal butanol
Φυσικές Ιδιότητες:	Άχρωμο υγρό

Επικινδυνότητα:	Βλαβερό στην κατάποση, μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό στην επιδερμίδα και στα μάτια
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται ως τεχνητό αρωματικό στις Η.Π.Α. σε ευρύ φάσμα καταναλωτικών προϊόντων, όπως καλλυντικά και βιοκαύσιμα

Διαλύτης:	Ακετονιτρίλιο (Acetonitrile)
Χημικός τύπος:	C_2H_3N
Άλλα ονόματα:	Cyanomethane, Ethanenitrile, Ethyl nitrile, Methanecarbonitrile
Φυσικές Ιδιότητες:	Άχρωμο υγρό
Επικινδυνότητα:	Προκαλεί βλάβη αν έρθει σε επαφή με τα μάτια, το δέρμα και αν εισπνευσθεί
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται ευρέως σε μπαταρίες λόγω υψηλής ηλεκτρικής σταθεράς, στην παρασκευή φαρμακευτικών προϊόντων και στην παρασκευή φωτογραφικού φιλμ

Διαλύτης:	Τετραχλωράνθρακας (Carbon Tetrachloride)
Χημικός τύπος:	CCl_4
Άλλα ονόματα:	Tetrachloromethane, Benziform, Benzinoform, Carbon chloride, Carbon tet
Φυσικές Ιδιότητες:	Άχρωμο υγρό με «γλυκιά» μυρωδιά
Επικινδυνότητα:	Τοξικό αν έρθει σε επαφή με το δέρμα και τα μάτια, αν καταποθεί ή αν εισπνευσθεί
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται ευρέως σε πυροσβεστήρες, υπήρξε πρόδρομος των ψυκτικών υγρών και ως μέσο καθαρισμού

Διαλύτης:	Μεθανόλη (Methanol)
Χημικός τύπος:	CH_4O
Άλλα ονόματα:	Methylalcohol, wood alcohol, wood naphtha or wood spirits
Φυσικές Ιδιότητες:	Ελαφρύ, πτητικό, άχρωμο, εύφλεκτο υγρό με μια χαρακτηριστική οσμή
Επικινδυνότητα:	Τοξικό αν έρθει σε επαφή με το δέρμα, αν καταποθεί ή αν εισπνευσθεί
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται ως αντιψυκτικό, ως καύσιμο και για την παραγωγή βιοντίζελ

Διαλύτης:	Τολουένιο (Toluene)
Χημικός τύπος:	C_7H_8
Άλλα ονόματα:	phenylmethane, toluol, Anisen
Φυσικές Ιδιότητες:	Είναι διαυγές, αδιάλυτο στο νερό υγρό με χαρακτηριστική οσμή των αραιωτικών βαφής
Επικινδυνότητα:	Δεν πρέπει να εισπνέεται λόγω των επιπτώσεων στην υγεία. Σε χαμηλά έως μέτρια επίπεδα μπορεί να προκαλέσει κόπωση, σύγχυση, αδυναμία, απώλεια μνήμης, ναυτία, απώλεια της όρεξης και της ακοής
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται ως ενισχυτικό οκτανίων σε καύσιμα βενζίνης, είναι σε θέση να διαλύσει τα χρώματα, διαλυτικά χρωμάτων και σιλικόνες στεγανωτικών

Διαλύτης:	Βενζόλιο (Benzol)
Χημικός τύπος:	C_6H_6
Άλλα ονόματα:	1,3,5-cyclohexatriene, benzene, phene
Φυσικές Ιδιότητες:	Είναι άχρωμο, ιδιαίτερα εύφλεκτο υγρό με «γλυκιά» μυρωδιά
Επικινδυνότητα:	Μπορεί να προκαλέσει καρκίνο, ερεθισμό στα μάτια και στο δέρμα, καθώς και κληρονομικές γενετικές βλάβες
Κοινές Εφαρμογές:	Χρησιμοποιείται κυρίως ως ενδιάμεσο για την παρασκευή άλλων χημικών ουσιών, μικρότερες ποσότητες βενζολίου χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ορισμένων ειδών ελαστικών, λιπαντικών, βαφών, απορρυπαντικών, ναρκωτικών, εκρηκτικών, και παρασιτοκτόνων

Διαλύτης:	Διοξάνιο (Dioxane)
Χημικός τύπος:	$C_4H_8O_2$
Άλλα ονόματα:	1,4-Dioxane, 1,4-Dioxacyclohexane
Φυσικές Ιδιότητες:	Άχρωμο, εύφλεκτο υγρό με ελαφρά γλυκιά οσμή και κατατάσσεται στους αιθέρες
Επικινδυνότητα:	Ερεθιστικό στα μάτια και στην αναπνοή
Κοινές Εφαρμογές:	Εκτός από τη κύρια χρήση του ως σταθεροποιητής για τη μεταφορά του 1,1,1-trichloroethane, χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία εφαρμογών ως διαλύτης, π.χ. σε μελάνια και κόλλες

1.4 Σκοποί και στόχοι παρούσας μελέτης

Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής είναι η μέτρηση του δείκτη διάθλασης των προαναφερθέντων οργανικών διαλυτών και (με βάση τα αποτελέσματα αυτά) η κατάστρωση εξισώσεων χρωματικής διασποράς. Αυτές οι μετρήσεις διεξάγονται σε μια σταθερή θερμοκρασία των 300K και σε πέντε διαφορετικά μήκη κύματος που καλύπτουν ολόκληρη την ορατή περιοχή του φάσματος, καθώς και το εγγύ υπέρυθρο φάσμα (450nm - 1551nm).

Ο δείκτης διάθλασης των οργανικών υγρών συναρτήσει του μήκους κύματος είναι μια σημαντική παράμετρος για διάφορες εφαρμογές στη φωτονική. Ενδεικτικά κάποιες από αυτές είναι:

- ο σχεδιασμός και η προσομοίωση οπτικών ινών με υγρό πυρήνα, ή με υγρό περίβλημα [7-10],
- η παραγωγή υπερταχέων παλμών (υπερσυνεχούς φάσματος) [11]
- έλεγχος των δομικών ιδιοτήτων νάνο-διαλυμάτων/αιωρημάτων/κολλοειδών [12]
- η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών εκπομπής laser βαφών (dye) και διαλυμάτων φθορίζοντων μορίων [13,14].
- οι οπτικές σταθερές των οργανικών υγρών χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θεωρητικών μοντέλων συσχέτισης δομής-ιδιοτήτων [15].

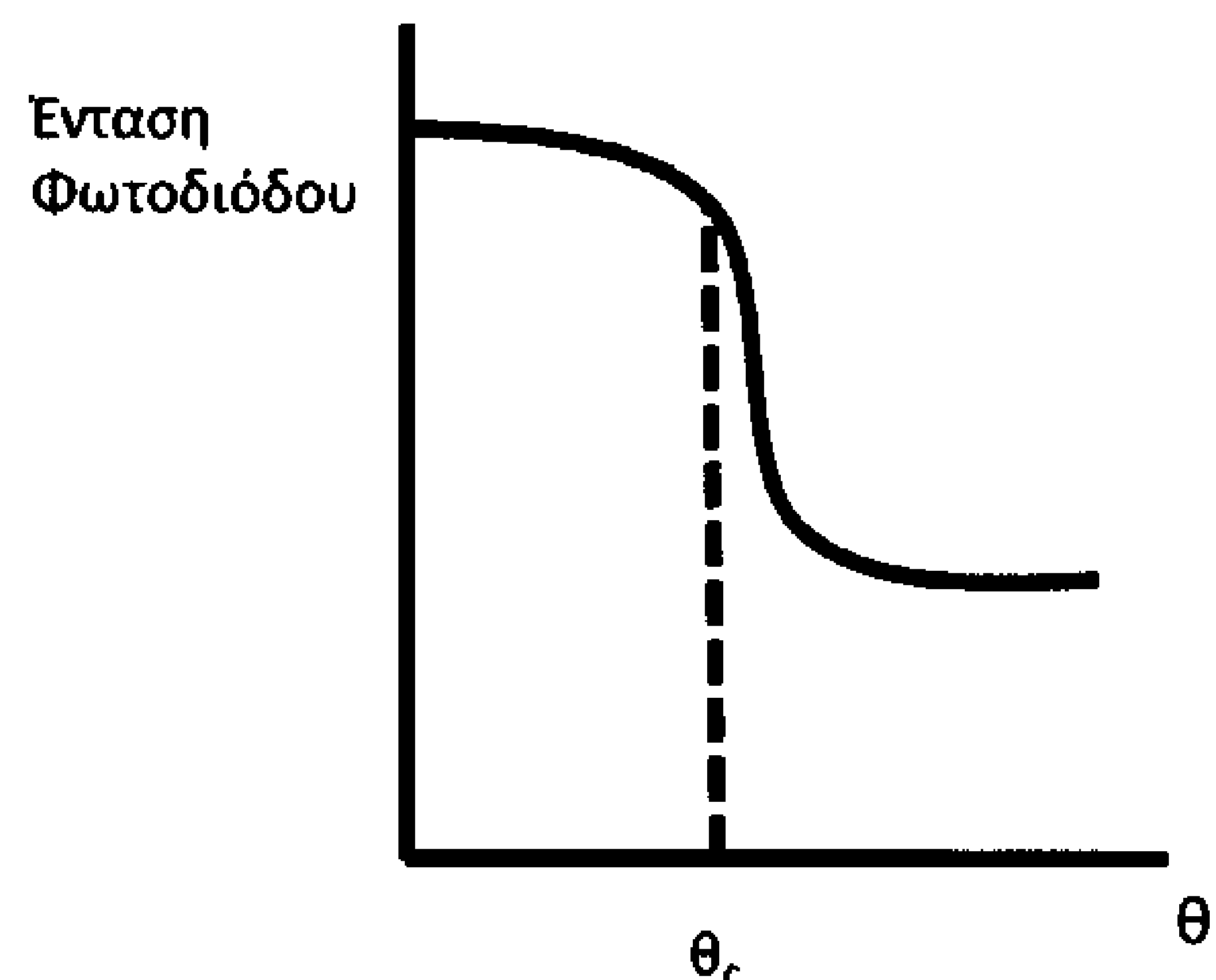
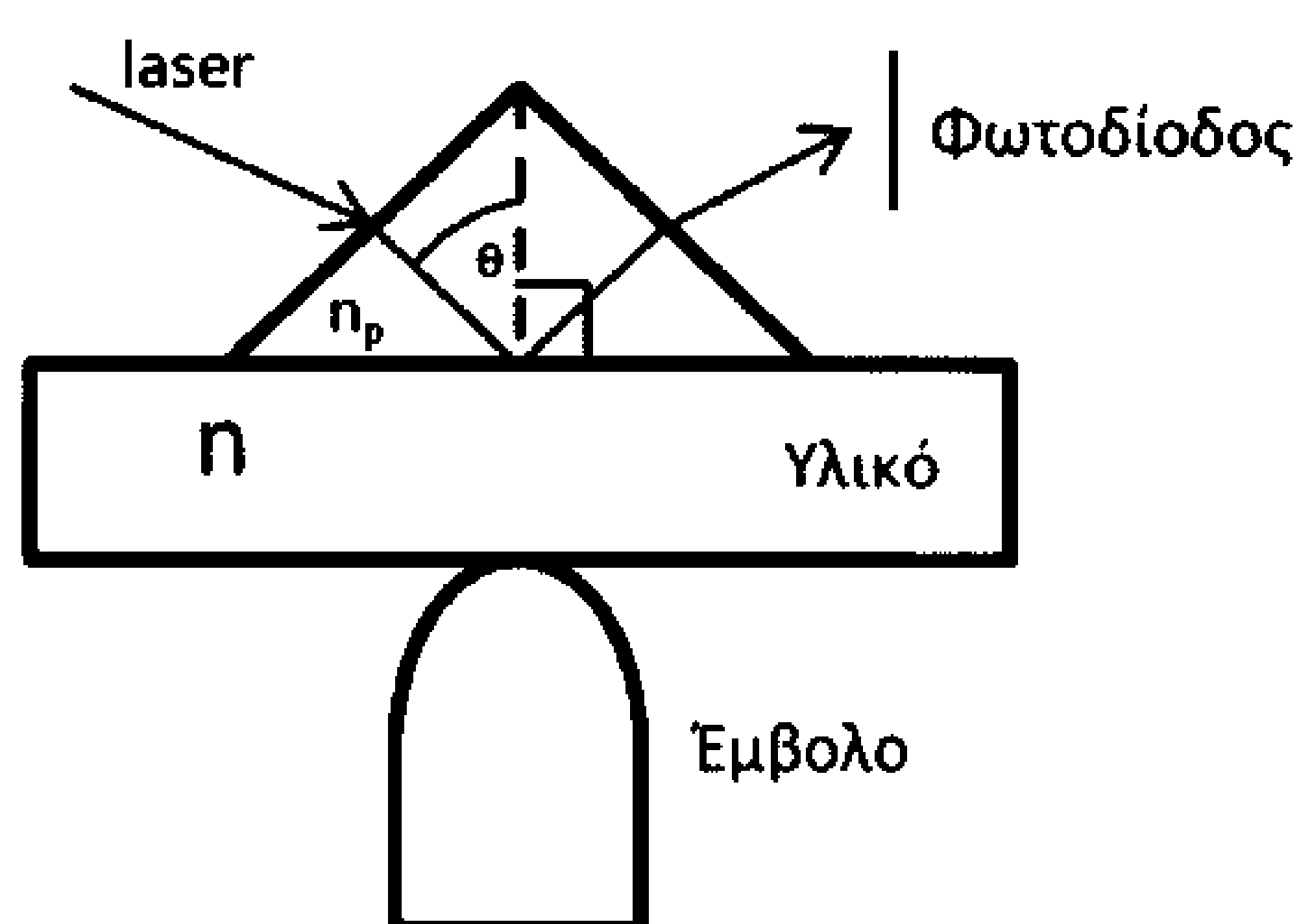
Σε σχέση με τα κίνητρα της παρούσης εργασίας, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά την ευρέως διαδεδομένη ανάγκη για δεδομένα του δείκτη διάθλασης των οργανικών υγρών, μέχρι σήμερα η βιβλιογραφία σε αυτόν τον τομέα παραμένει σχετικά φτωχή.

1.5 Μεθοδολογική προσέγγιση

Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα στο εργαστήριο Ηλεκτρικού χαρακτηρισμού υλικών και ηλεκτρικών διατάξεων του τμήματος Ηλεκτρονικής του Τ.Ε.Ι. Αθήνας. Χρησιμοποιήθηκε διαθλασίμετρο σύζευξης πρίσματος, μια διάταξη που στο παρελθόν έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του δείκτη διάθλασης στερεών υλικών [16]. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται στο σχήμα (1.3). Το προς μελέτη δείγμα έρχεται σε επαφή με τη βάση ενός πρίσματος με γνωστό

δείκτη διάθλασης n_p . Μια μονοχρωματική ακτίνα laser οδηγείται στη βάση του πρίσματος και στη διεπιφάνεια ανακλάται και κατευθύνεται προς την φωτοδιόδο που είναι τοποθετημένη στην έξοδο του πρίσματος. Η γωνία πρόσπτωσης ελέγχεται από μηχανικό σύστημα περιστροφής. Για ένα εύρος γωνιών πρόσπτωσης, το σύνολο της οπτικής ισχύος που προσπίπτει στη διεπιφάνεια ανακλάται (φαινόμενο ολικής εσωτερικής ανάκλασης) και η ένδειξη της φωτοδιόδου λαμβάνει μέγιστη τιμή. Για τις υπόλοιπες γωνίες πρόσπτωσης, ένα ποσοστό της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος διαθλάται στο προς μελέτη υλικό, με αποτέλεσμα η ένδειξη της φωτοδιόδου να λαμβάνει ελάχιστη τιμή. Με αυτό τον τρόπο, υπολογίζεται η κρίσιμη γωνία ολικής εσωτερικής ανάκλασης θ_c , η οποία προφανώς αντιστοιχεί στη γωνία εκείνη στην οποία η ένδειξη της φωτοδιόδου παρουσιάζει απότομη πτώση και δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n}{n_p}\right). \quad (1.12)$$



(A)

(B)

Σχήμα 1.5: (A) Διάγραμμα διαθλασίμετρου, (B) Καμπύλη έντασης φωτοδιόδου.

Το διαθλασίμετρο διαθέτει πέντε διαφορετικά laser που εκπέμπουν στο ορατό φως στα μήκη κύματος 450nm, 532nm, 632.8nm και στο υπέρυθρο στα 964nm και 1551nm. Η ακρίβεια των μετρήσεων του δείκτη διάθλασης φτάνει το τέταρτο δεκαδικό ψηφίο.

Η πειραματική αυτή διάταξη είναι σχεδιασμένη για μέτρηση στερεών υλικών και όχι υγρών. Μία πρώτη δυσκολία που έπρεπε να ξεπεραστεί, σχετιζόταν με τις

διαβρωτικές ιδιότητες των υπό εξέταση διαλυτών, καθώς επίσης και με την αδυναμία συγκράτησης των υγρών δειγμάτων πάνω στην κατακόρυφη επιφάνεια του πρίσματος. Για τη λύση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν διάφορα αυτοσχέδια συστήματα συγκράτησης (holders), τα οποία είχαν κυλινδρικό σχήμα με κενό εσωτερικό. Οι κύλινδροι αυτοί γέμιζαν με το υπό εξέταση υγρό και είχαν τη μία έδρα τους ανοιχτή. Η ανοιχτή αυτή έδρα εφάπτονταν με το πρίσμα, έτσι ώστε το υγρό να έρχεται σε άμεση επαφή με αυτό. Κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν διάφοροι holders από πλαστικό, λάστιχο και μέταλλο. Αναλόγως την διαβρωτικότητα του κάθε διαλύτη χρησιμοποιήθηκε και το καταλληλότερο υλικό.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων κατεβλήθη προσπάθεια ώστε η θερμοκρασία του δωματίου να παραμένει σταθερή και ίση με 300K. Ελήφθησαν πολλά σει μετρήσεων για κάθε διαλύτη, έτσι ώστε να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα και η ακρίβεια των μετρήσεων. Με βάση τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία, κατασκευάστηκαν εξισώσεις χρωματικής διασποράς που καλύπτουν το ορατό και κοντινό υπέρυθρο. Στη συνέχεια, οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον θεωρητικό υπολογισμό της διασποράς της ταχύτητας ομάδας (GVD). Τέλος χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα (και σε ορισμένες περιπτώσεις τις εξισώσεις διασποράς) και δεδομένα από την βιβλιογραφία για διαφορετικές θερμοκρασίες, έγινε υπολογισμός της εκτιμώμενης τιμής των θερμό-οπτικών συντελεστών (TOC), δηλαδή της μεταβολής του δείκτη διάθλασης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

Αξίζει να αναφερθεί πως στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα για 12 οργανικούς διαλύτες, για τους οποίους αποδείχθηκε ότι διαφορετικές μετρήσεις που ελήφθησαν σε διαφορετικές ημέρες, παρουσίαζαν μεταξύ τους αποκλίσεις οι οποίες δεν ξεπερνούσαν τη ακρίβεια της πειραματικής διάταξης. Πέρα από αυτούς τους 12 διαλύτες, μελετήθηκαν αρκετά ακόμα οργανικά υγρά που δεν παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία. Τέτοια υγρά (ακετόνη, δι-μεθυλ-σουλφοξείδιο (DMSO), 1,3-Προπανοδιόλη, γλυκερίνη, αιθυλεν-γλυκόλη, κ.α.) έδιναν μη-επαναλήψιμα αποτελέσματα, ένα γεγονός που δεν έχει καταστεί δυνατό να εξηγηθεί και αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής πρόσθετης μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Δείκτης διάθλασης και διασπορά του δ.δ. από 450nm έως 1551nm

2.1 Πειραματικές μετρήσεις του δείκτη διάθλασης

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα διαθλασίμετρο σύζευξης πρίσματος του οποίου η λειτουργία περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι μετρήσεις έγιναν σε πέντε διαφορετικά μήκη κύματος (450.0nm, 532.0nm, 632.8nm, 964.0nm, 1551.0nm) με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου. Η μέτρηση των διαλυτών έγινε σε σταθερή θερμοκρασία των 300K με ακρίβεια $\pm 1K$. Τα αποτελέσματα τελικά συγκεντρώθηκαν σε πίνακες όπου και έγινε ανάλυση των δεδομένων για τον κάθε διαλύτη ξεχωριστά (Παράρτημα 1). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των διαλυτών για το καθένα από τα πέντε μήκη κύματος.

Διαλύτης	450,0nm	532,0 nm	632.8 nm	964,0 nm	1551,0 nm
Διοξάνιο	1.4281	1.4224	1.4190	1.4149	1.4124
1,5 Πεντανο-διόλη	1.4533	1.4465	1.4419	1.4355	1.4311
1-Βουτανόλη	1.4031	1.3975	1.3941	1.3891	1.3858
1-Προπανόλη	1.3902	1.3851	1.3816	1.3770	1.3738
Ακετονιτρίλιο	1.3469	1.3422	1.3393	1.3361	1.3345
Αμυλική Αλκοόλη	1.4152	1.4095	1.4058	1.4008	1.3977
Βενζόλιο	1.5144	1.5011	1.4925	1.4816	1.4769
Τετραχλωράνθρακας	1.4674	1.4600	1.4551	1.4489	1.4464
Ισο-αμυλική Αλκοόλη	1.4122	1.4064	1.4029	1.3979	1.3946
Ισο-βουτανόλη	1.4007	1.3950	1.3917	1.3870	1.3836
Μεθανόλη	1.3330	1.3288	1.3259	1.3215	1.3172
Τολουένιο	1.5097	1.4973	1.4890	1.4783	1.4737

Πίνακας 2.1: Μέσος όρος πειραματικών μετρήσεων του δ.δ. των διαλυτών στα πέντε μήκη κύματος.

2.2 Θεωρητικές σχέσεις διασποράς

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα για την εξαγωγή των θεωρητικών σχέσεων διασποράς, με βάση την εξίσωση Schott:

$$n^2(\lambda) = A_0 + A_1 \cdot \lambda^2 + \frac{A_2}{\lambda^2} + \frac{A_3}{\lambda^4} + \frac{A_4}{\lambda^6}. \quad (2.1)$$

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συντελεστές (A_0 έως A_4) για τους δώδεκα οργανικούς διαλύτες. Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των εξισώσεων από τις οποίες στη συνέχεια εξήχθησαν οι πειραματικές καμπύλες για το κάθε υγρό και συγκρίθηκαν με τα όσα βιβλιογραφικά δεδομένα υπήρχαν διαθέσιμα.

Διαλύτης	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
Διοξάνιο	1.996073056	-0.00163203	0.00665705	6.00055E-05	7.70185·10 ⁻⁵
1,5 Πεντανο-διόλη	2.051562214	-0.00354681	0.01192405	-0.000350124	8.97124·10 ⁻⁵
1-Βουτανόλη	1.917816501	-0.00115077	0.01373734	-0.00194084	0.000254077
1-Προπανόλη	1.902808062	-0.00591365	-0.00508076	0.004330837	-0.000409934
Ακετονιτρίλιο	1.775716362	-1.045·10 ⁻⁵	0.01226691	-0.002996917	0.000424049
Αμυλική Αλκοόλη	1.954280294	-0.0018197	0.00906961	-0.00016629	6.7645·10 ⁻⁵
Βενζόλιο	2.170184597	0.00059399	0.02303464	-0.000499485	0.000178796
Τετραχλωράνθρακας	2.083275955	0.00087676	0.01600365	-0.001570583	0.000241473
Ισο-αμυλική Αλκοόλη	1.942931564	-0.00128447	0.01305097	-0.001683118	0.000233976
Ισο-βουτανόλη	1.913001067	-0.00152344	0.01303537	-0.00198394	0.000275162
Μεθανόλη	1.749798149	-0.00611501	-0.00044331	0.00242549	-0.000237745
Τολουένιο	2.169499678	-0.0016331	0.01401982	0.002165497	-8.55802·10 ⁻⁵

Πίνακας 2.2: Συντελεστές της σχέσης διασποράς για τους δώδεκα οργανικούς διαλύτες στους 300K.

Να σημειωθεί πως επιλύοντας τις εξισώσεις αυτές για τα μήκη κύματος της μέτρησης, προκύπτουν θεωρητικές τιμές του δείκτη διάθλασης οι οποίες συμφωνούν

με τις πειραματικές τιμές μέχρι και το τέταρτο δεκαδικό ψηφίο. Με δεδομένο πως η ακρίβεια της πειραματικής μέτρησης περιορίζεται στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο, μπορούμε να θεωρήσουμε πως το σφάλμα στην προσομοίωση είναι μηδενικό.

2.3 Γραφική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σύγκριση με βιβλιογραφικά δεδομένα

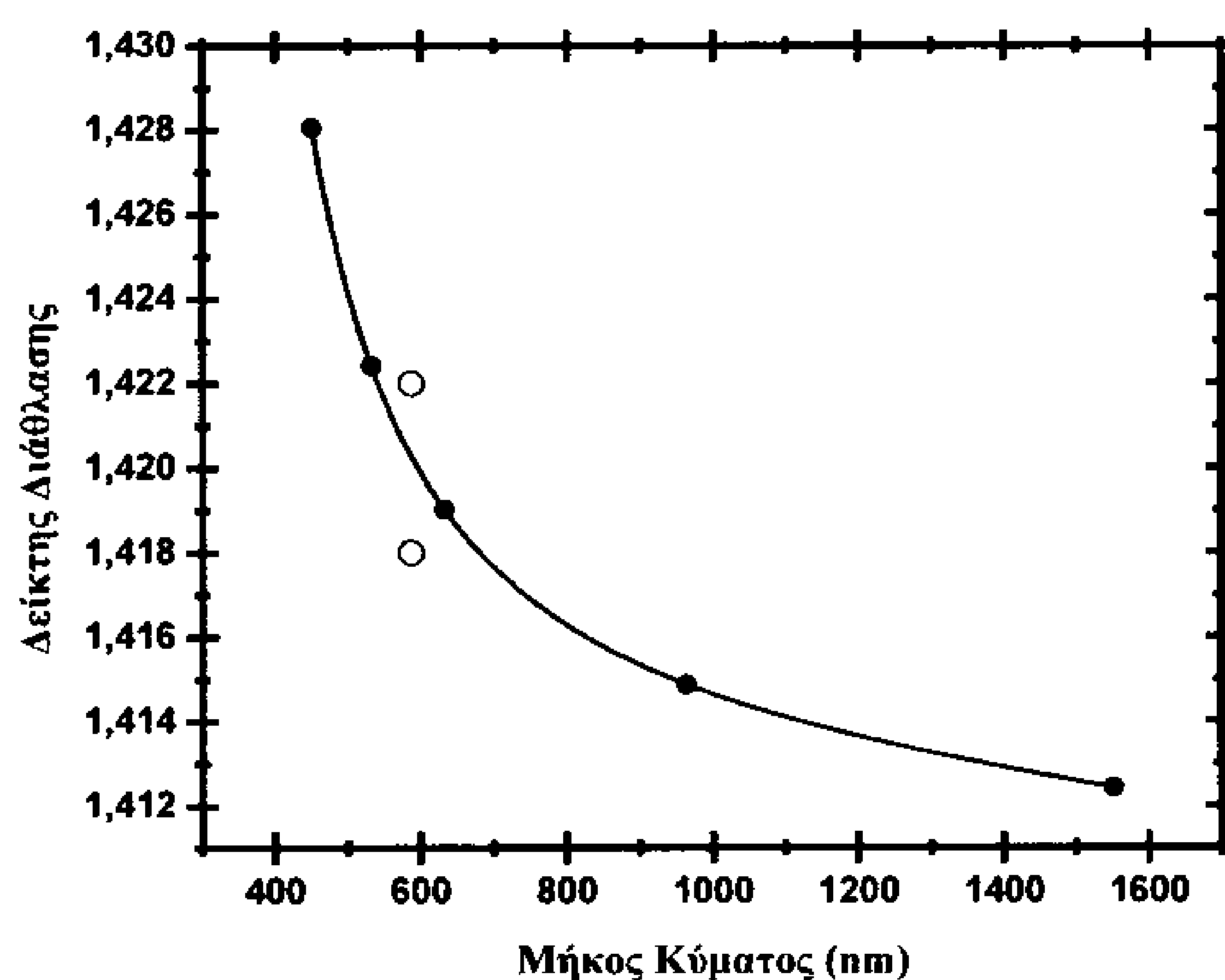
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις:

(α) των πειραματικών δεδομένων της παρούσας εργασίας και των αντίστοιχων εξισώσεων διασποράς, και

(β) πειραματικών δεδομένων και εξισώσεων (όπου αυτές ήταν διαθέσιμες) δημοσιευμένων σε προηγούμενες μελέτες άλλων ερευνητών.

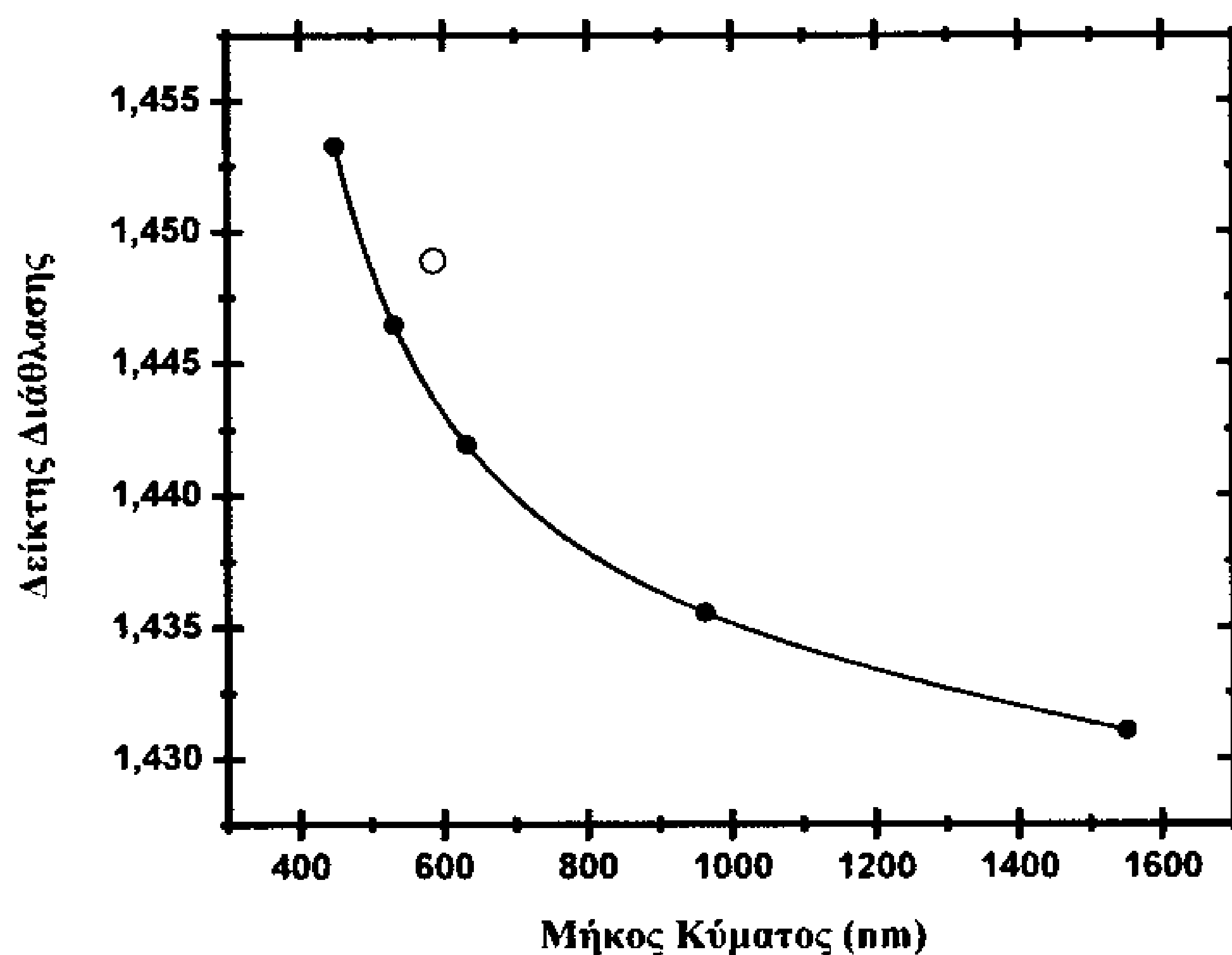
Με δεδομένο πως τα βιβλιογραφικά στοιχεία αντιστοιχούν σε μετρήσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες, τα διαγράμματα αυτά αποκαλύπτουν δύο βασικές πληροφορίες: (1) πιστοποιούν την ποιότητα της προσομοίωσης των πειραματικών δεδομένων που επιτυγχάνουν οι προτεινόμενες εξισώσεις διασποράς (fit-quality). (2) επιτρέπουν τη σύγκριση των δεδομένων της παρούσας εργασίας με δεδομένα προηγούμενων εργασιών, σε ελάχιστα διαφορετικές θερμοκρασίες. Να σημειωθεί πως από αυτή τη σύγκριση προκύπτει και ο υπολογισμός των θερμο-οπτικών συντελεστών, ο οποίος παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Διοξάνιο [17-20]



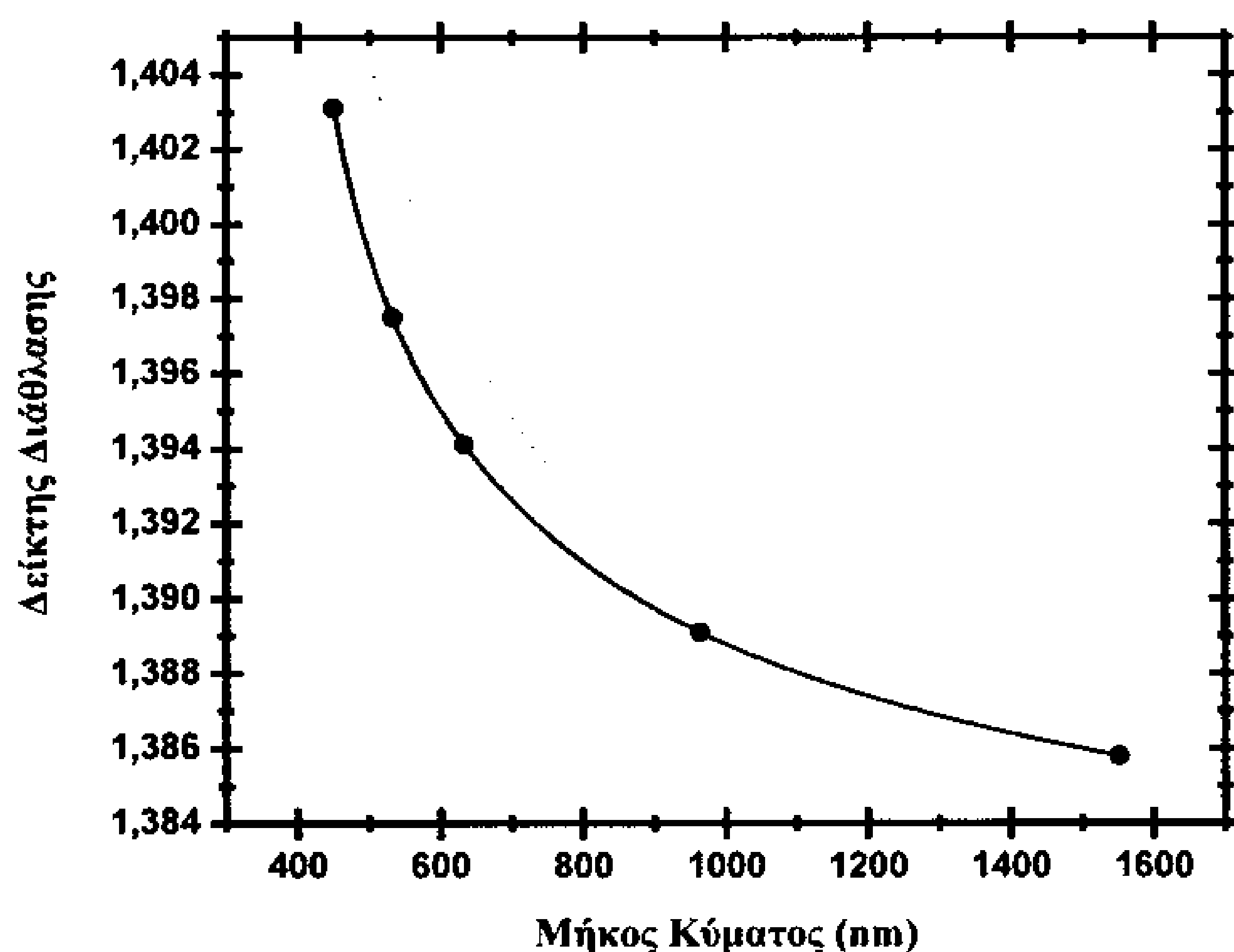
Σχήμα 2.1: Δείκτης διάθλασης του διοξάνιου συναρτήσει του μήκος κύματος. Συμπαγείς κύκλοι: Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. Συνεχής γραμμή: Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. Ανοιχτοί κύκλοι: Βιβλιογραφικά πειραματικά δεδομένα στους $T=293\text{K}$ (πάνω) και $T=313\text{K}$ (κάτω) [17].

1,5 Πεντανο-διόλη [21]



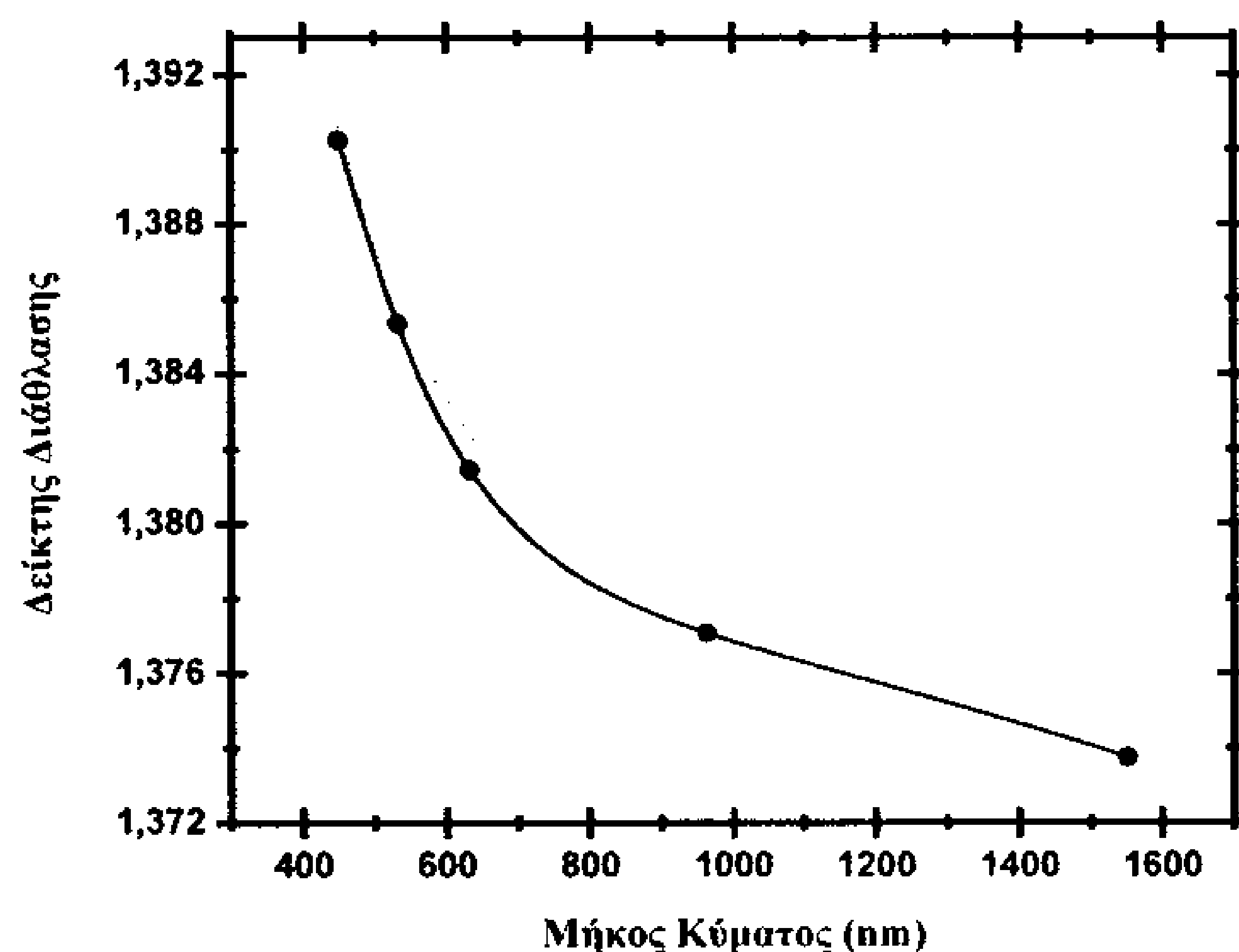
Σχήμα 2.2: Δείκτης διάθλασης της 1,5 Πεντανο-διόλης συναρτήσει του μήκος κύματος. Συμπαγείς κύκλοι: Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. Συνεχής γραμμή: Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. Ανοιχτός κύκλος: Βιβλιογραφικό πειραματικό δεδομένο στους $T=293\text{K}$ [21].

1-Βουτανόλη [22-26].



Σχήμα 2.3: Δείκτης διάθλασης της 1-Βουτανόλης συναρτήσει του μήκος κύματος. Συμπαγείς κύκλοι: Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. Συνεχής γραμμή: Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. Διακεκομμένη γραμμή: Η εξής βιβλιογραφική εξίσωση διασποράς για ($T=293\text{K}$, $\lambda=400\text{nm} - 800\text{nm}$) [22]: $n = 1.384715 + \frac{4960.733}{\lambda^2}$.

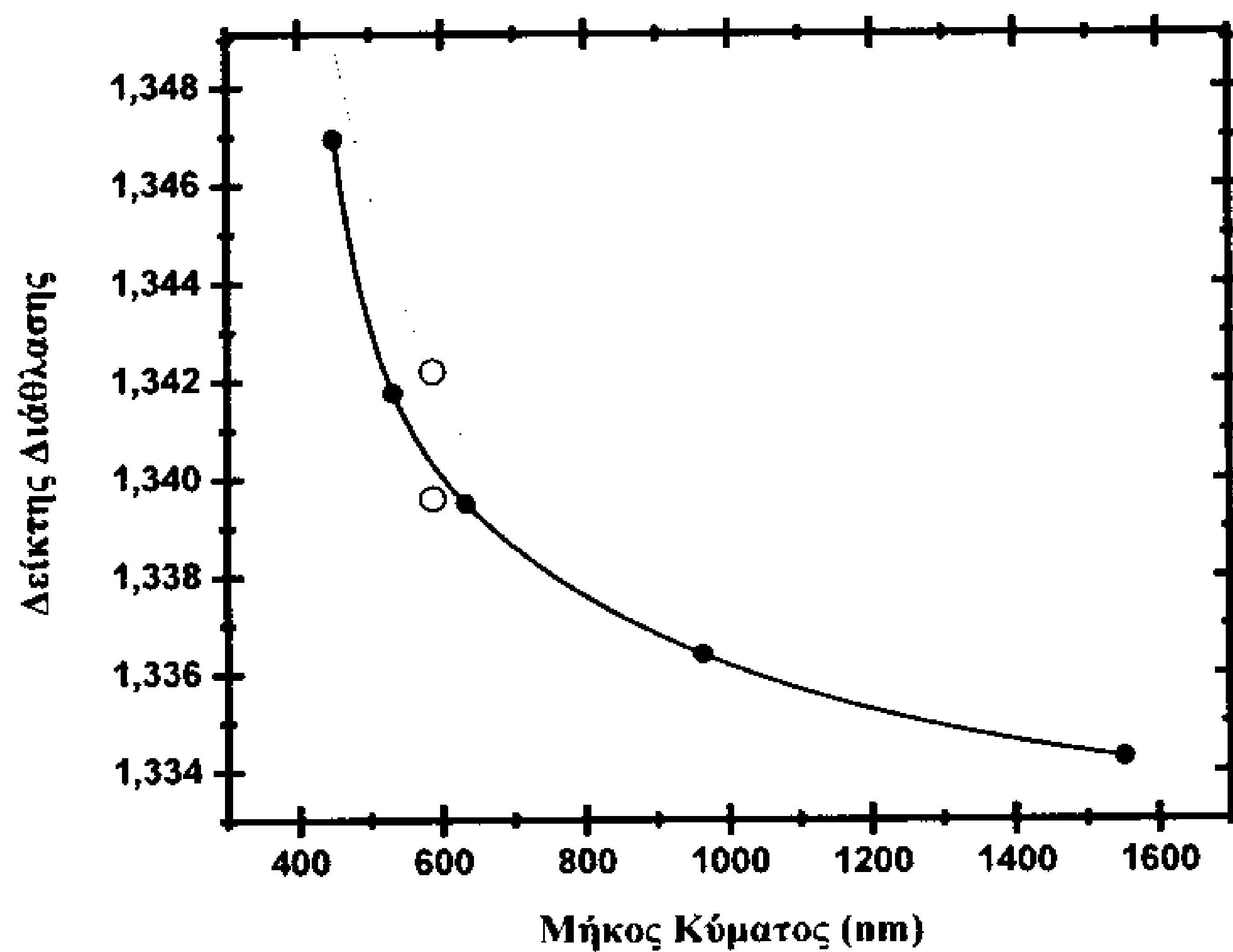
1-Προπανόλη [25-27]



Σχήμα 2.4: Δείκτης διάθλασης της 1- Προπανόλης συναρτήσει του μήκος κύματος. Συμπαγείς κύκλοι: Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. Συνεχής γραμμή: Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. Διακεκομμένη γραμμή: Η εξίσωση διασποράς για $T=298\text{K}$.

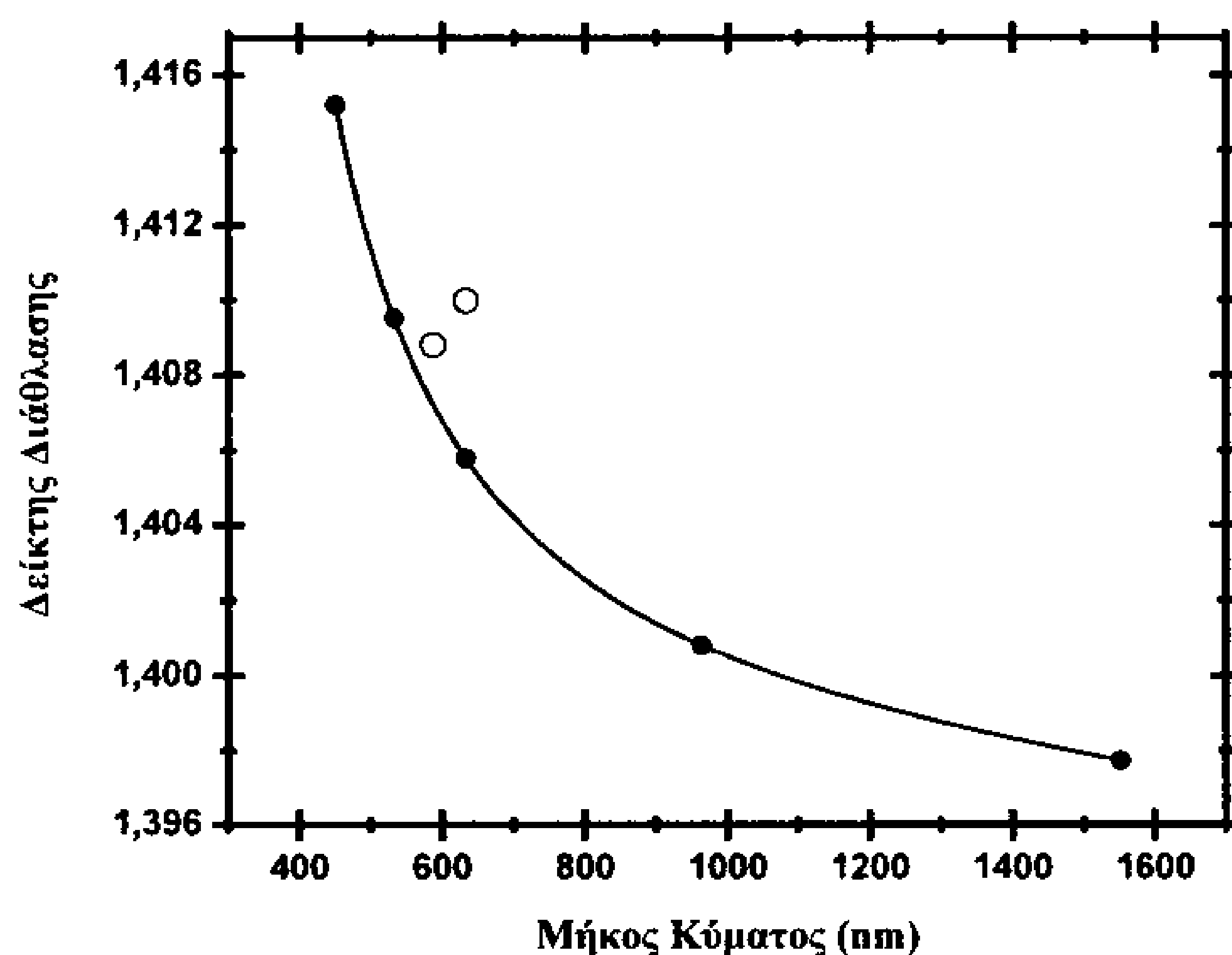
[27]. Η εξίσωση διασποράς για 298K στη φασματική περιοχή 435nm – 643nm σύμφωνα με την αναφορά [27] είναι: $n = 1.37438 + \frac{3.1253 \cdot 10^{-11}}{\lambda^2} - \frac{3.3733 \cdot 10^{-21}}{\lambda^4}$.

Ακετονιτρίλιο [28-32]



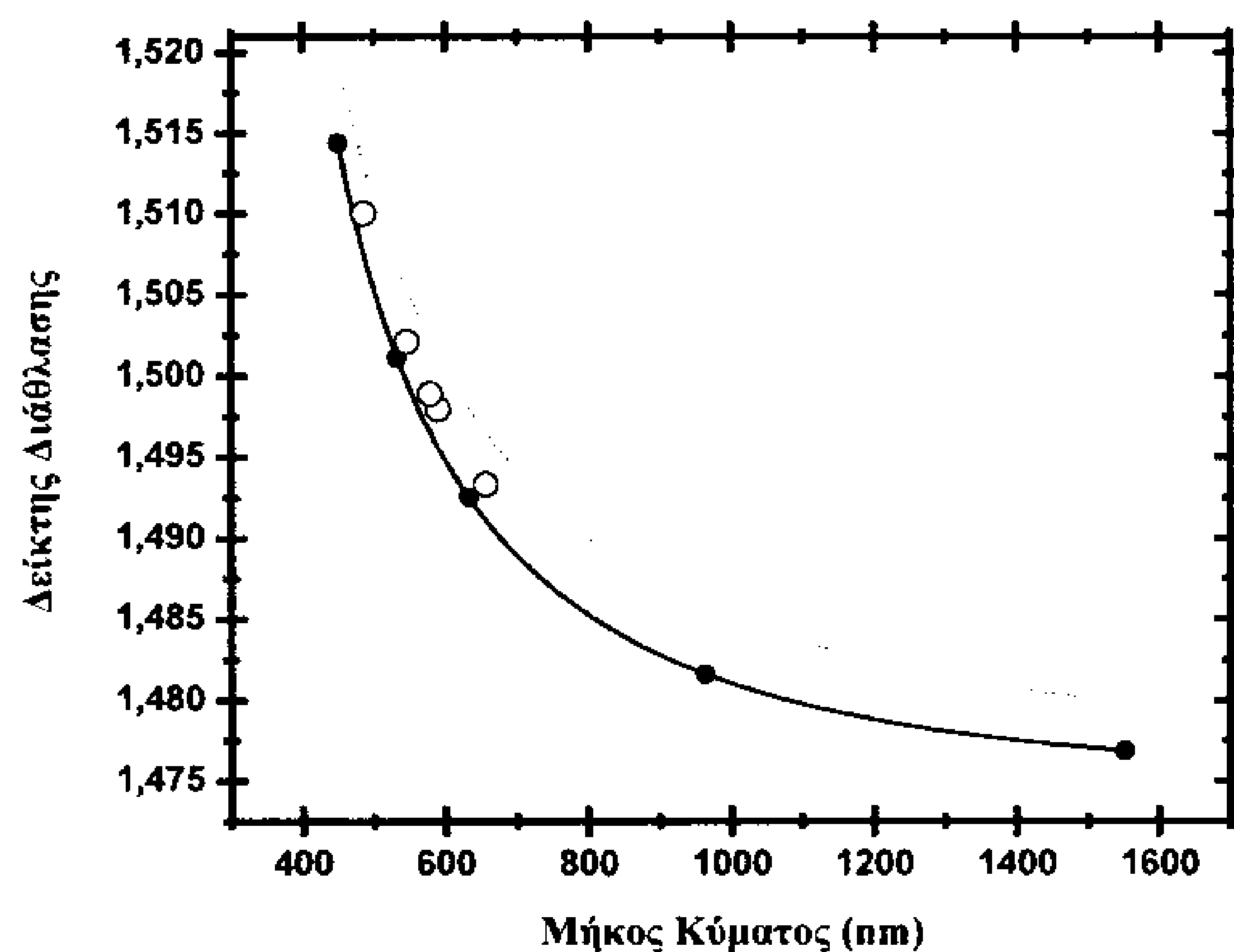
Σχήμα 2.5: Δείκτης διάθλασης του Ακετονιτρίλιου συναρτήσει του μήκος κύματος. *Συμπαγείς κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους T=300K. *Συνεχής γραμμή:* Η Schott διασπορά για T=300K. *Ανοιχτοί κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους T=298K (πάνω) και T=303K (κάτω) [28]. *Διακεκομμένη γραμμή:* Η εξίσωση διασποράς για T=295K [29]. Η εξίσωση διασποράς του Ακετονιτρίλιου για T=295K στη φασματική περιοχή 326nm – 644nm σύμφωνα με την αναφορά [29] είναι: $n = 1.33212 + \frac{3525.78231}{\lambda^2} - \frac{32631699.6}{\lambda^4} + \frac{2.267 \cdot 10^{12}}{\lambda^6}$.

Αμυλική Αλκοόλη [25, 26, 33]



Σχήμα 2.6: Δείκτης διάθλασης της Αμυλικής Αλκοόλης συναρτήσει του μήκος κύματος. *Συμπαγείς κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. *Συνεχής γραμμή:* Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. *Ανοιχτοί κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους $T=293\text{K}$ (πάνω [26]) και $T=298\text{K}$ (κάτω [33]).

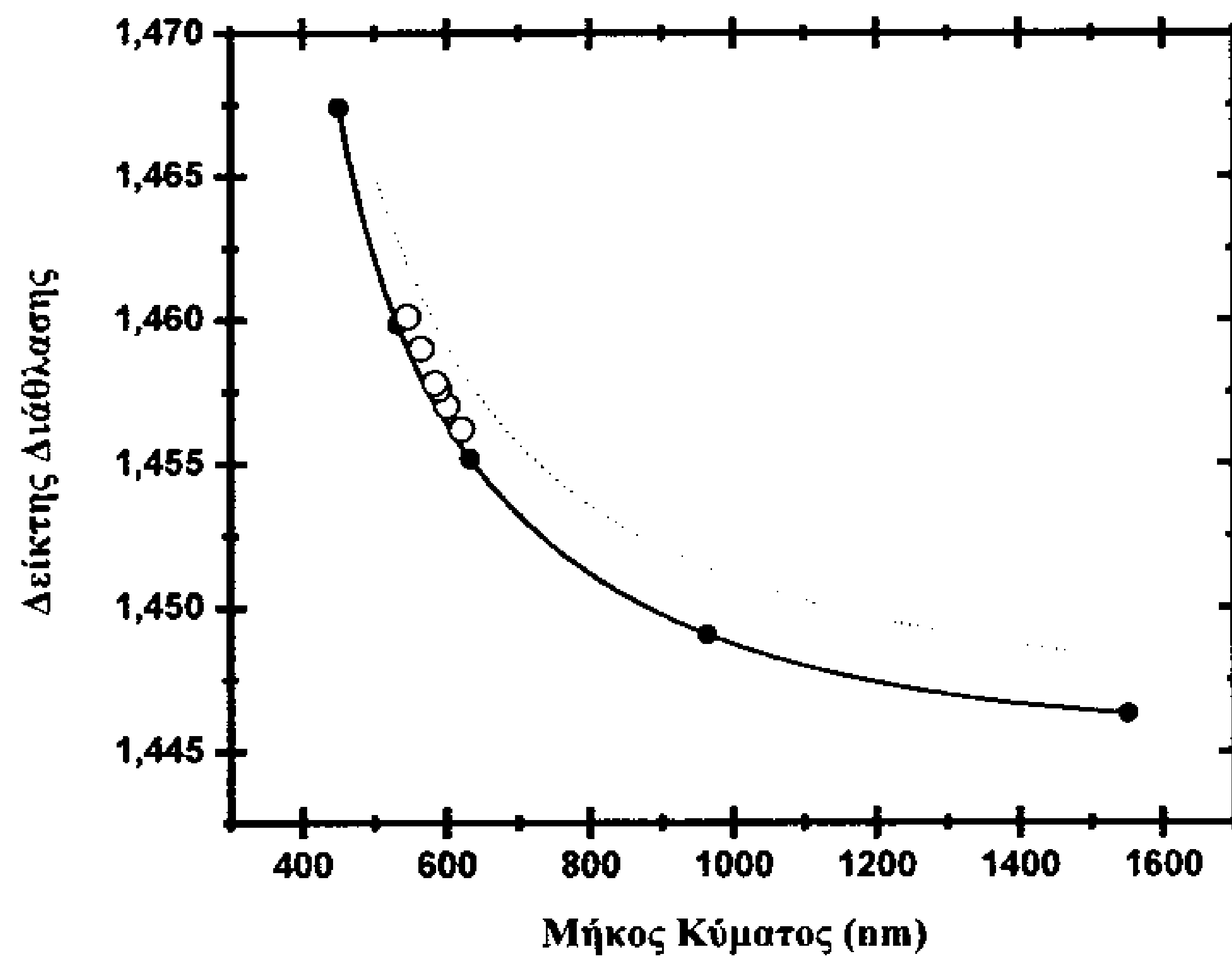
Βενζόλιο [34-36]



Σχήμα 2.7: Δείκτης διάθλασης του Βενζόλιου συναρτήσει του μήκος κύματος. *Συμπαγείς κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. *Συνεχής γραμμή:* Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. *Ανοιχτοί κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους $T=298\text{K}$ [34]. *Διακεκομμένη γραμμή:* Η εξίσωση διασποράς για $T=293\text{K}$ [35].

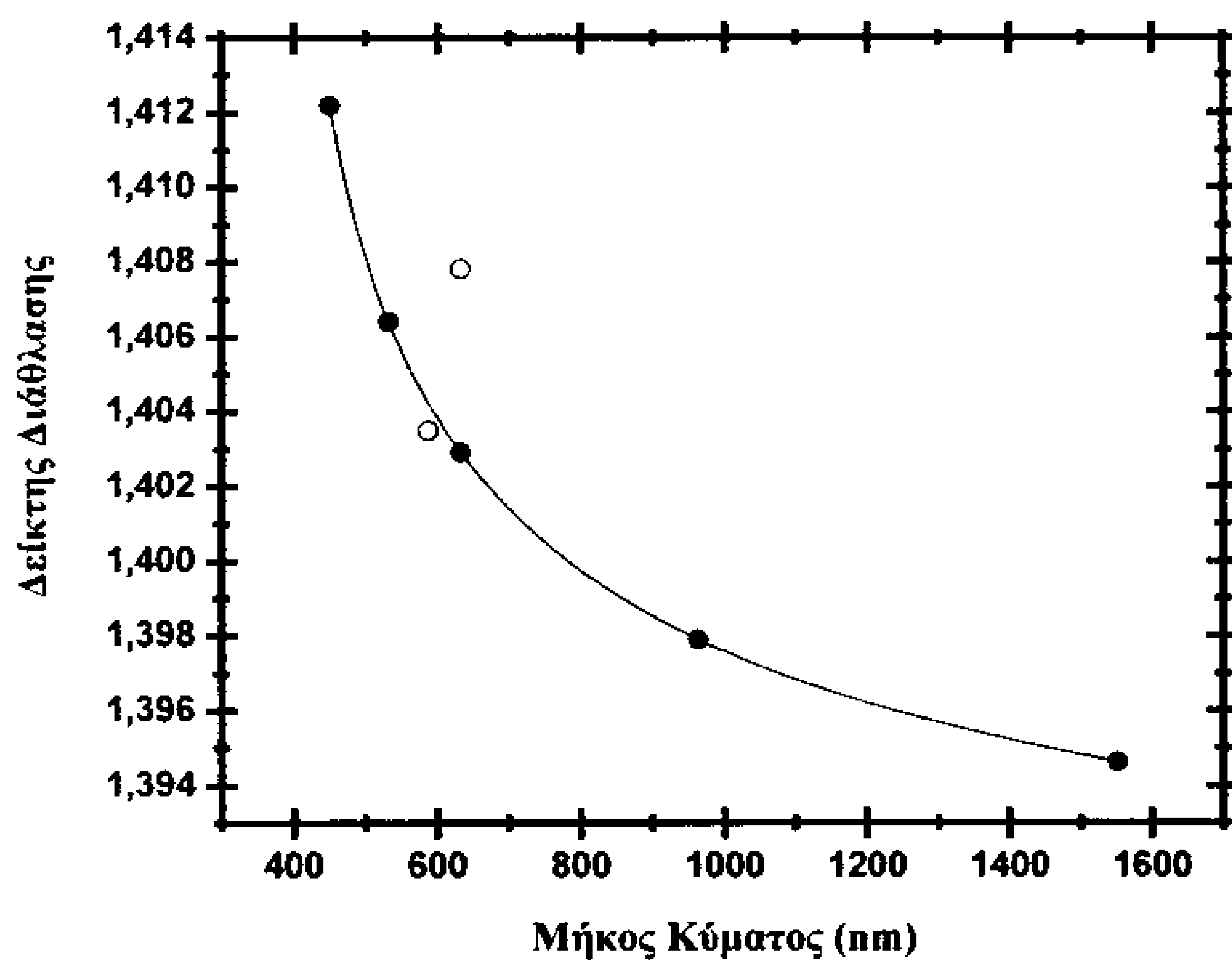
Η εξίσωση διασποράς του Βενζόλιου για $T=293\text{K}$ στη φασματική περιοχή $300\text{nm} - 2500\text{nm}$ σύμφωνα με την αναφορά [35] είναι: $n = 1.475922 + \frac{39671.57}{\lambda^2} - \frac{35.2538 \cdot 10^8}{\lambda^4} + \frac{28.5442 \cdot 10^{13}}{\lambda^6} - \frac{2.6163 \cdot 10^{18}}{\lambda^8}$.

Τετραχλωράνθρακας [34, 37-39]



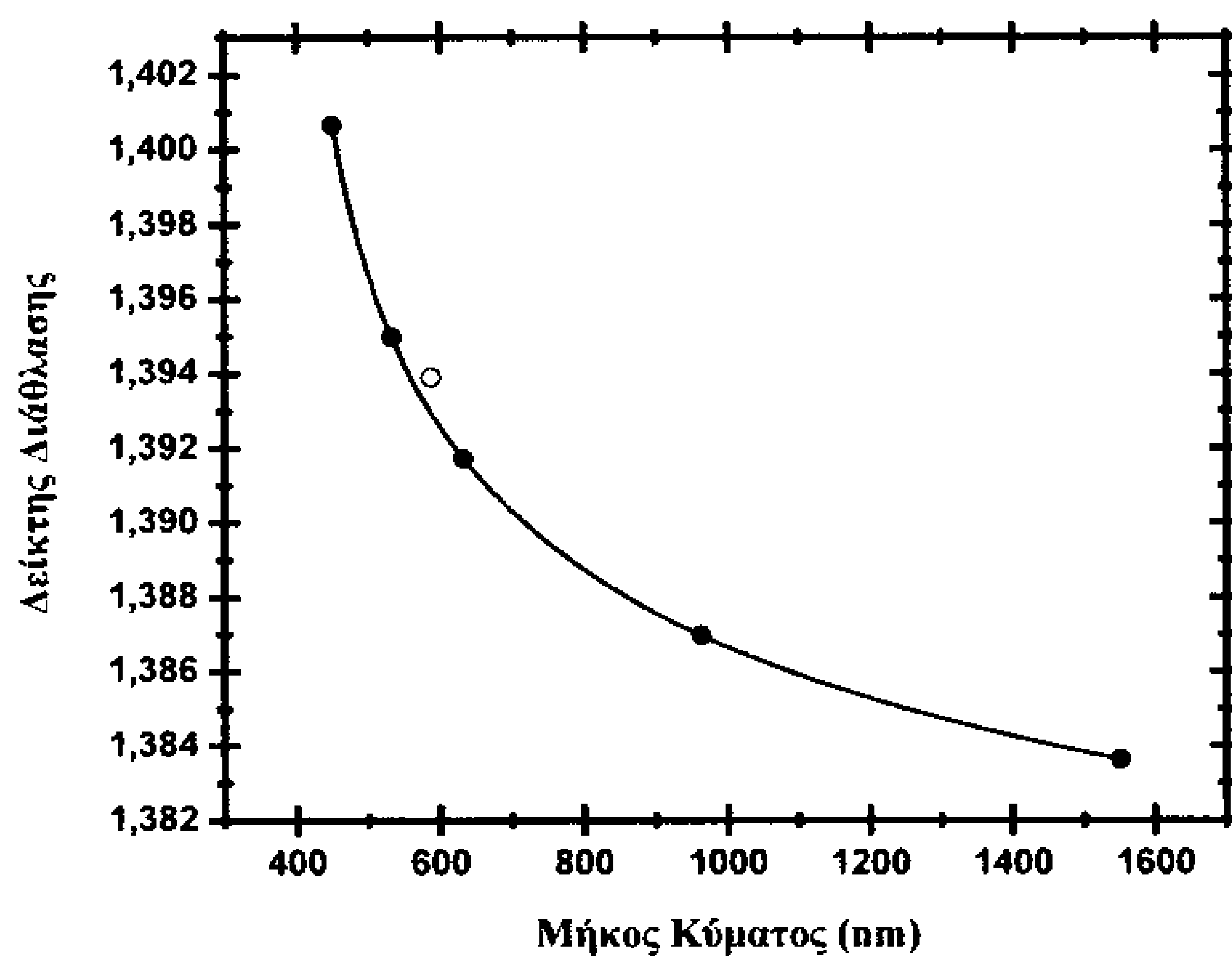
Σχήμα 2.8: Δείκτης διάθλασης του Τετραχλωράνθρακα συναρτήσει του μήκος κύματος. *Συμπαγείς κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. *Συνεχής γραμμή:* Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. *Ανοιχτοί κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους $T=298\text{K}$ [37]. *Διακεκομμένη γραμμή:* Η εξίσωση διασποράς για $T=293\text{K}$ [38]. Η εξίσωση διασποράς του Τετραχλωράνθρακα για $T=293\text{K}$ στη φασματική περιοχή $500\text{nm} - 1600\text{nm}$ σύμφωνα με την αναφορά [38] είναι: $n = 2.09503 + \frac{0.01102}{\lambda^2} + \frac{0.00050}{\lambda^4} - 0.00102 \cdot \lambda^2$.

Ισο-αμυλική Αλκοόλη [26, 40]



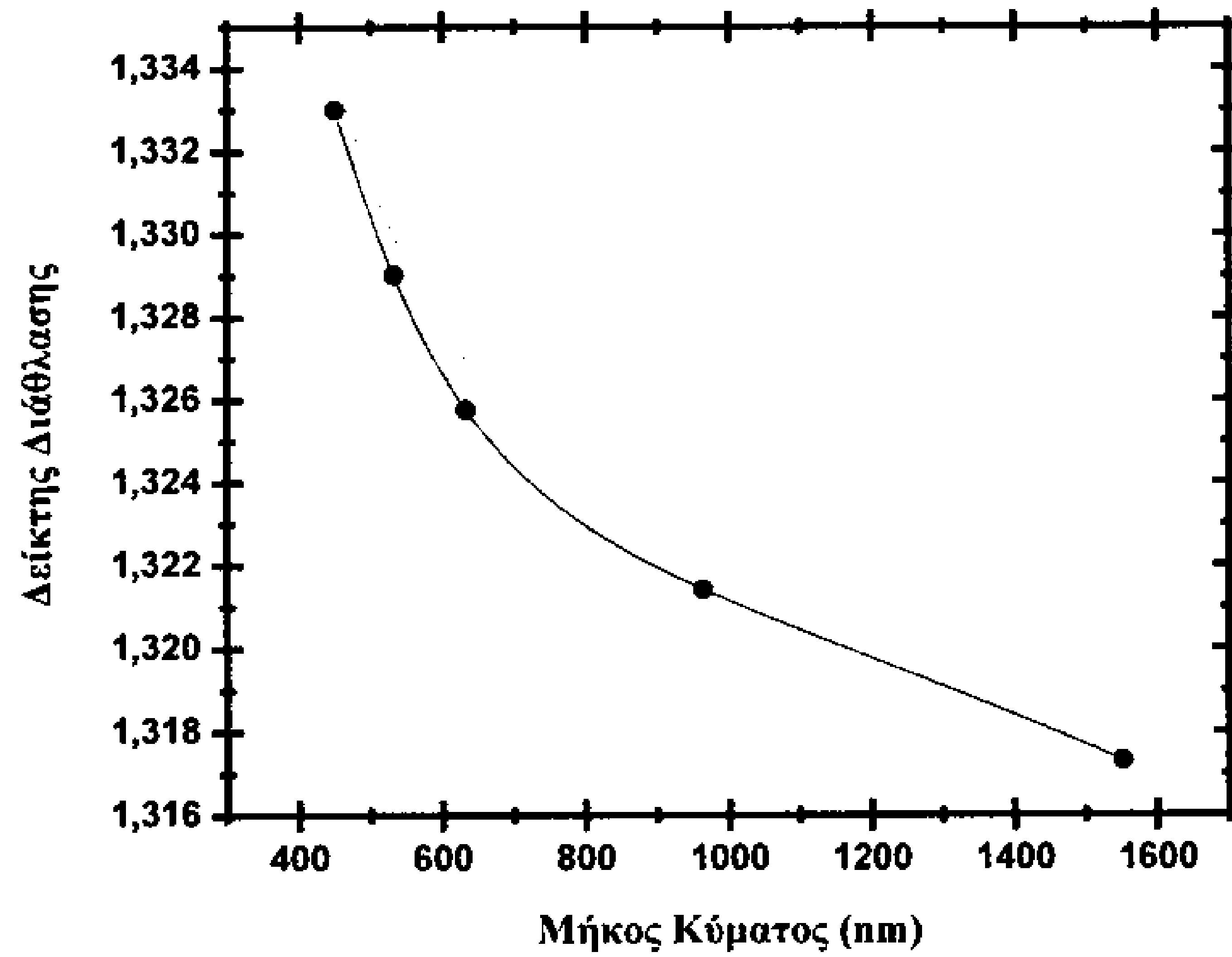
Σχήμα 2.9: Δείκτης διάθλασης της Ισο-αμυλικής Αλκοόλης συναρτήσει του μήκος κύματος. Συμπαγείς κύκλοι: Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. Συνεχής γραμμή: Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. Ανοιχτοί κύκλοι: Πειραματικά δεδομένα στους $T=293\text{K}$ (πάνω [26]) και $T=303\text{K}$ (κάτω [40]).

Ισοβουτανόλη [41]



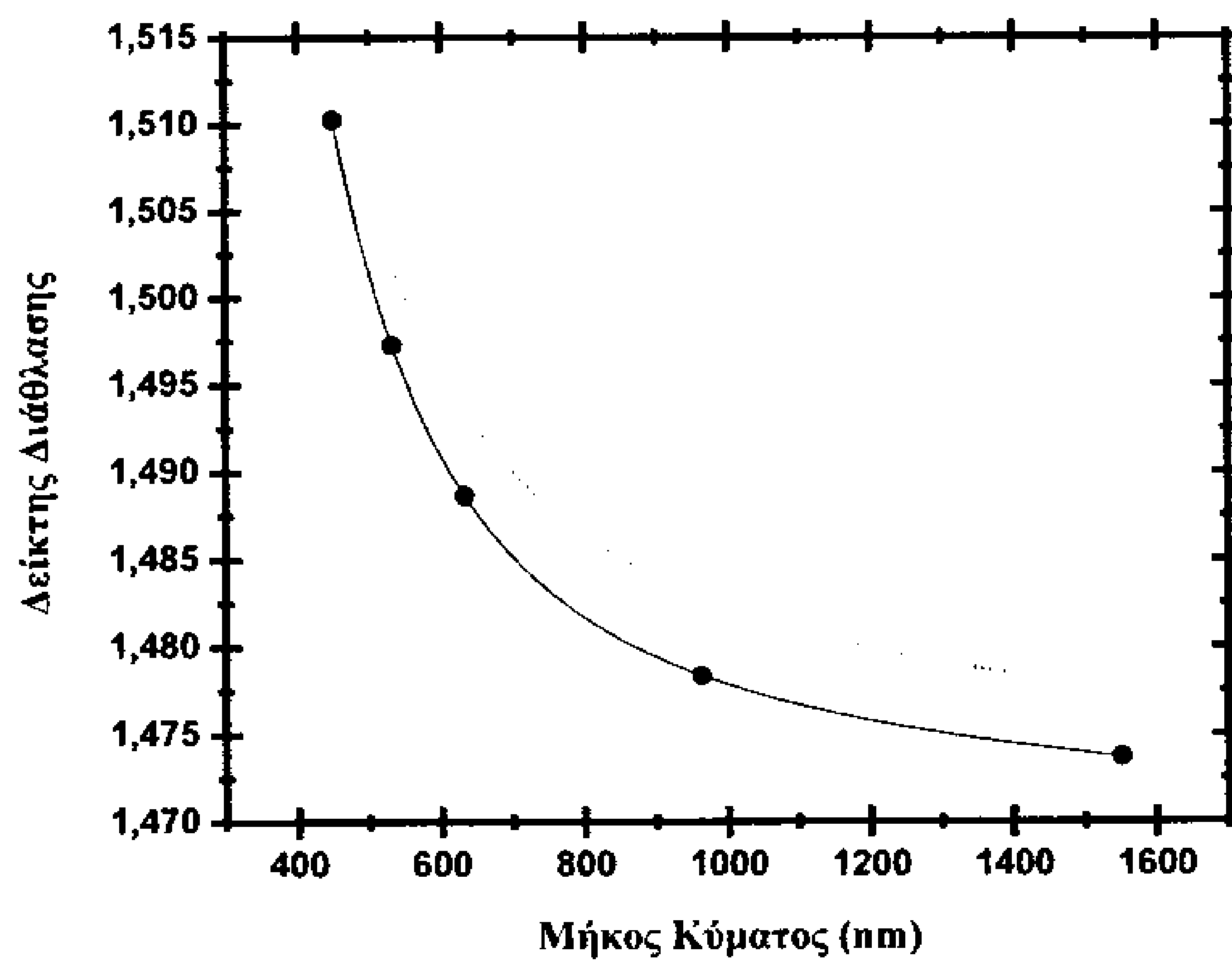
Σχήμα 2.10: Δείκτης διάθλασης της Ισοβουτανόλης συναρτήσει του μήκος κύματος. Συμπαγείς κύκλοι: Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. Συνεχής γραμμή: Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. Ανοιχτός κύκλος: Πειραματικό δεδομένο στους $T=298\text{K}$ [41].

Μεθανόλη [13, 29, 34, 36]



Σχήμα 2.11: Δείκτης διάθλασης της Μεθανόλης συναρτήσει του μήκος κύματος. *Συμπαγείς κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους $T=300\text{K}$. *Συνεχής γραμμή:* Η εξίσωση διασποράς Schott για $T=300\text{K}$. *Διακεκομμένη γραμμή:* Η εξίσωση διασποράς για $T=295\text{K}$ [29]. Η εξίσωση διασποράς της Μεθανόλης για $T=295\text{K}$ στη φασματική περιοχή $326\text{nm} - 644\text{nm}$ σύμφωνα με την αναφορά [29] είναι: $n = 1.3915 + \frac{3053.64419}{\lambda^2} - \frac{34163639.3011}{\lambda^4} + \frac{2.62128 \cdot 10^{12}}{\lambda^6}$.

Τολουένιο [29, 35-38]



Σχήμα 2.12: Δείκτης διάθλασης του Τολουένιου συναρτήσει του μήκος κύματος. *Συμπαγείς κύκλοι:* Πειραματικά δεδομένα στους

T=300K. *Συνεχής γραμμή*: Η εξίσωση διασποράς Schott για T=300K. *Διακεκομμένη γραμμή*: Η εξίσωση διασποράς για T=293K [38]. Η εξίσωση διασποράς του Τολουένιου για T=293K στη φασματική περιοχή 500nm – 1600nm σύμφωνα με την αναφορά [38] είναι: $n = 2.17873 + \frac{0.01886}{\lambda^2} + \frac{0.00086}{\lambda^4} - 0.00145 \cdot \lambda^2$.

2.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Στα γραφήματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα είναι σαφές ότι οι σχέσεις διασποράς που προτείνονται προσομοιώνουν τα πειραματικά δεδομένα με άριστη ακρίβεια. Γίνεται επίσης αντιληπτό ότι στις περιοχές ανάμεσα σε δύο διαδοχικές μετρήσεις, οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς εμφανίζουν γνησίως μονότονη συμπεριφορά, χωρίς τοπικά ακρότατα, και άρα η μορφή των καμπυλών αυτών μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή.

Επιπρόσθετα, στα γραφήματα αυτά επιχειρείται σύγκριση των αποτελεσμάτων με μετρήσεις και θεωρητικές σχέσεις διασποράς που εντοπίστηκαν για τους διαλύτες αυτούς στη βιβλιογραφία. Η σύγκριση αυτή οδηγεί σε ένα πλήθος χρήσιμων συμπερασμάτων. Κατ' αρχάς, γίνεται σαφές πως η παρούσα εργασία καθίσταται η πληρέστερη και συστηματικότερη διαθέσιμη μελέτη της διασποράς του δείκτη διάθλασης σε ολόκληρο το ορατό φάσμα και σημαντικό τμήμα του υπέρυθρου, για ένα πλήθος οργανικών υγρών. Ταυτόχρονα, αναδεικνύεται το γεγονός ότι οι παρούσες πειραματικές μετρήσεις και προτεινόμενες εξισώσεις, είναι απόλυτα συμβατές με προηγούμενες βιβλιογραφικές μετρήσεις και εξισώσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες κατάτι διαφορετικές. Συγκεκριμένα, παρατηρείται συστηματικά ότι προηγούμενες μετρήσεις άλλων ερευνητών σε χαμηλότερες (υψηλότερες) θερμοκρασίες, αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες (μικρότερες) τιμές του δείκτη διάθλασης, και μάλιστα με αξιοσημείωτα «συμμετρικό» τρόπο. Αξίζει να αναφερθεί πως εξαίρεση σε αυτό τον κανόνα αποτελεί η ισο-βουτανόλη, για την οποία εντοπίστηκε βιβλιογραφική εξίσωση διασποράς [36] η οποία απέκλινε έντονα από την εξίσωση που προτείνεται στην παρούσα μελέτη. Πιθανολογείται ότι η αιτία αυτής της μεγάλης απόκλισης είναι το γεγονός ότι η βιβλιογραφική εξίσωση για την ισο-βουτανόλη καταστρώθηκε με μόλις δύο πειραματικά σημεία, πράγμα που μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ασφαλείς και έγκυρες τις εδώ προβλέψεις. Η σύγκριση των μετρήσεων της παρούσας εργασίας με προηγούμενες βιβλιογραφικές μετρήσεις, όχι

μόνο επιβεβαιώνει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, αλλά παρέχει και τη δυνατότητα υπολογισμού των θερμο-οπτικών συντελεστών, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Θερμο-οπτικοί Συντελεστές

3.1 Εισαγωγή

Θερμο-οπτικός συντελεστής (thermo-optic coefficient, TOC) ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής του δείκτη διάθλασης συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας (dn/dT). Ο θερμο-οπτικός συντελεστής είναι μία ακόμα παράμετρος που μεταβάλλεται με το μήκος κύματος. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν στην παρούσα εργασία με βιβλιογραφικά δεδομένα σε διαφορετικές θερμοκρασίες, επιτρέπουν τον υπολογισμό των θερμο-οπτικών συντελεστών σε διάφορα μήκη κύματος. Γνώση των τιμών των θερμο-οπτικών συντελεστών είναι σημαντική, γιατί αυτή η παράμετρος (α) συνδέεται με άλλες ιδιότητες του υλικού (κυρίως με το συντελεστή θερμικής διαστολής), (β) επιτρέπει την εκτίμηση της τιμής του δείκτη διάθλασης σε θερμοκρασίες διαφορετικές από αυτές στις οποίες υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις, και (γ) προσφέρει μία δυνατότητα εκτίμησης της ευαισθησίας που έχουν οπτικές διατάξεις σε μεταβολές της θερμοκρασίας κατά το χρόνο λειτουργίας τους.

3.2 Υπολογισμός θερμο-οπτικού συντελεστή

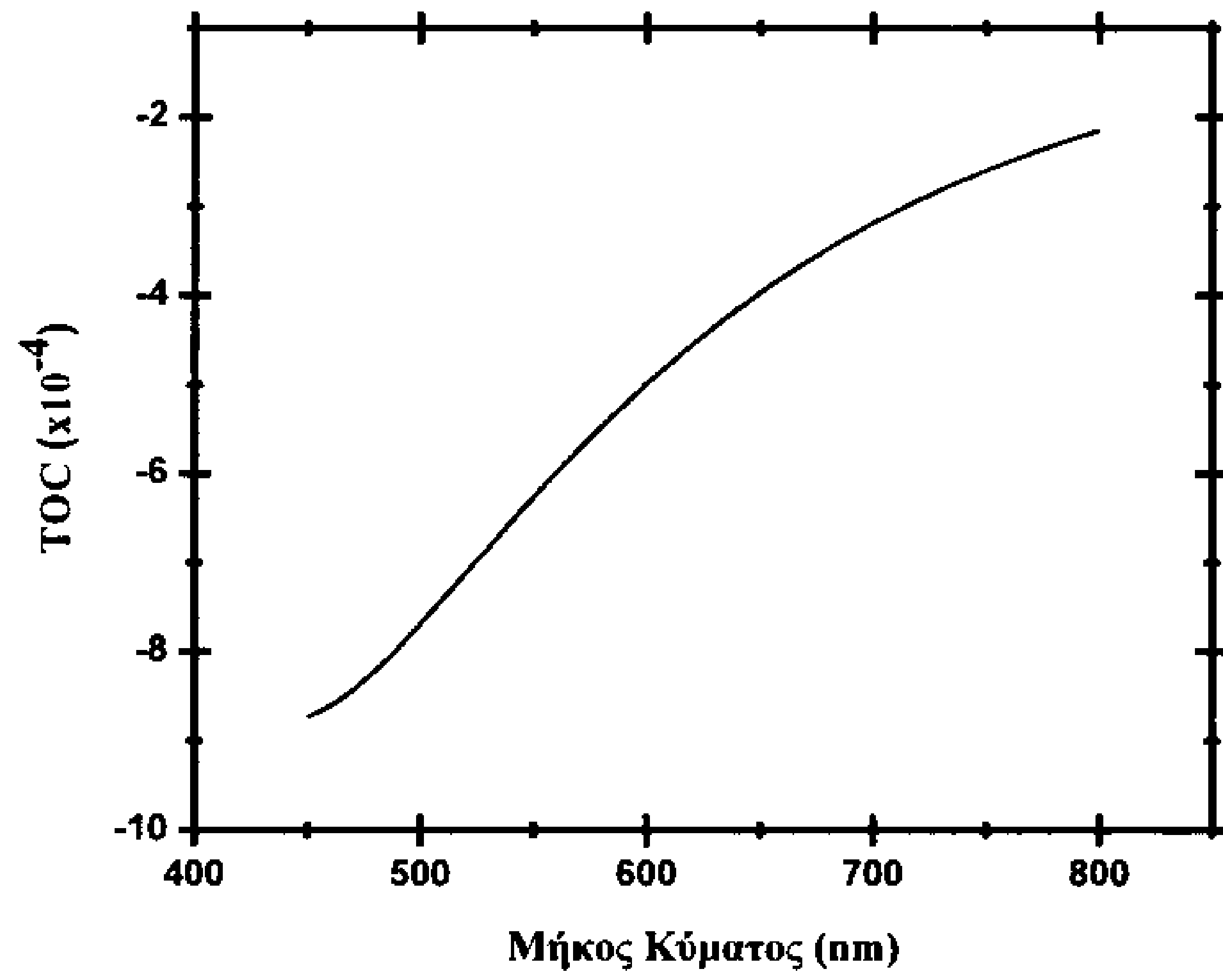
Για πέντε από τους δώδεκα διαλύτες υπό μελέτη, δεν εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία εξισώσεις διασποράς, αλλά μόνο διακριτά πειραματικά δεδομένα του δείκτη διάθλασης σε διάφορες θερμοκρασίες (βλέπε προηγούμενο κεφάλαιο). Οι βιβλιογραφικές αυτές μετρήσεις αντιστοιχούν σε δύο κοινά μήκη κύματος: στη γραμμή Fraunhofer (587.6nm) και στη γραμμή εκπομπής του laser HeNe (632.8nm). Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται αυτά τα βιβλιογραφικά δεδομένα, μαζί με τις αντίστοιχες αναφορές, καθώς επίσης και οι τιμές του δείκτη διάθλασης που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία (στους 300K). Με βάση αυτή τη συλλογή δεδομένων, υπολογίστηκαν άμεσα οι τιμές των θερμο-οπτικών συντελεστών, οι οποίες και παρουσιάζονται στην τελευταία στήλη του ίδιου πίνακα.

Διαλύτης	λ (nm)	Δεδομένα βιβλιογραφίας			Δ.Δ. στους 300K	TOC (K^{-1})
		Ref.	T (K)	Δ.Δ.		
Διοξάνιο	587.6	[17]	293	1.422	1.4203	$-2.0 \cdot 10^{-4}$
		[17]	313	1.418		
1,5-Πεντανο-διόλη	587.6	[21]	293	1.4489	1.4436	$-7.5 \cdot 10^{-4}$
Αμυλική Αλκοόλη	587.6	[33]	298	1.4088	1.4072	$-8.1 \cdot 10^{-4}$
	632.8	[26]	293	1.40998	1.4058	$-6.0 \cdot 10^{-4}$
Ισο-Αμυλική Αλκοόλη	587.6	[40]	303	1.4035	1.40423	$-2.4 \cdot 10^{-4}$
	632.8	[26]	293	1.4078	1.40291	$-7.0 \cdot 10^{-4}$
Ισο-βουτανόλη	587.6	[41]	298	1.3939	1.3929	$-4.8 \cdot 10^{-4}$

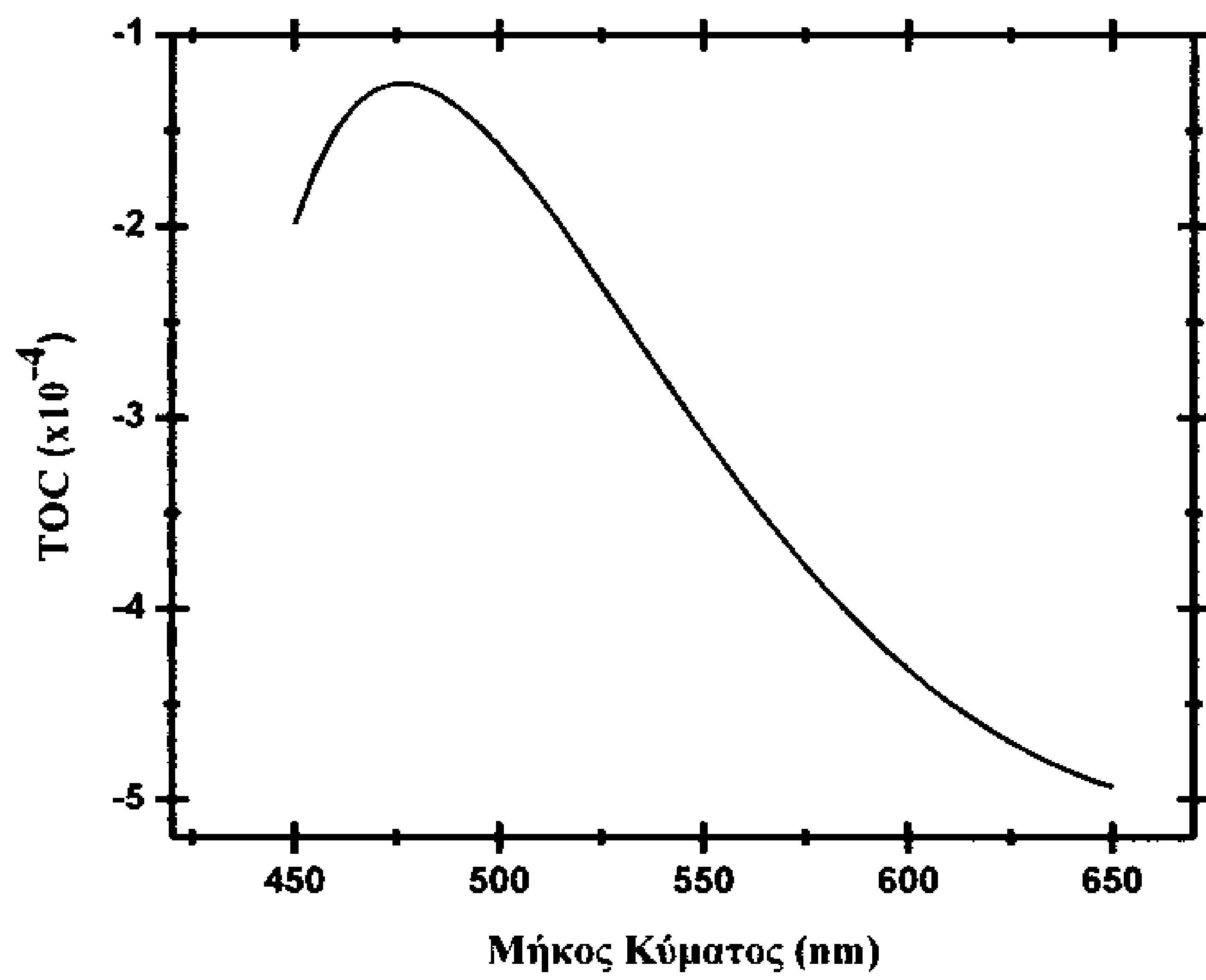
Πίνακας 3.1: Εκτιμώμενες τιμές του TOC για τους πέντε διαλύτες.

Για τους υπόλοιπους επτά διαλύτες εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία εξισώσεις διασποράς σε εύρος μηκών κύματος, το οποίο περιέχει τμήμα ή ολόκληρο το φάσμα των μετρήσεων που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία. (Στη δεύτερη περίπτωση ανήκουν μόνο το βενζόλιο, το τολουένιο και ο τετραχλωράνθρακας.) Στην περίπτωση αυτών των επτά διαλυτών, υπήρχε η δυνατότητα υπολογισμού όχι μόνο διακριτών τιμών του θερμο-οπτικού συντελεστή, αλλά ο προσδιορισμός της διασποράς του θερμο-οπτικού συντελεστή.

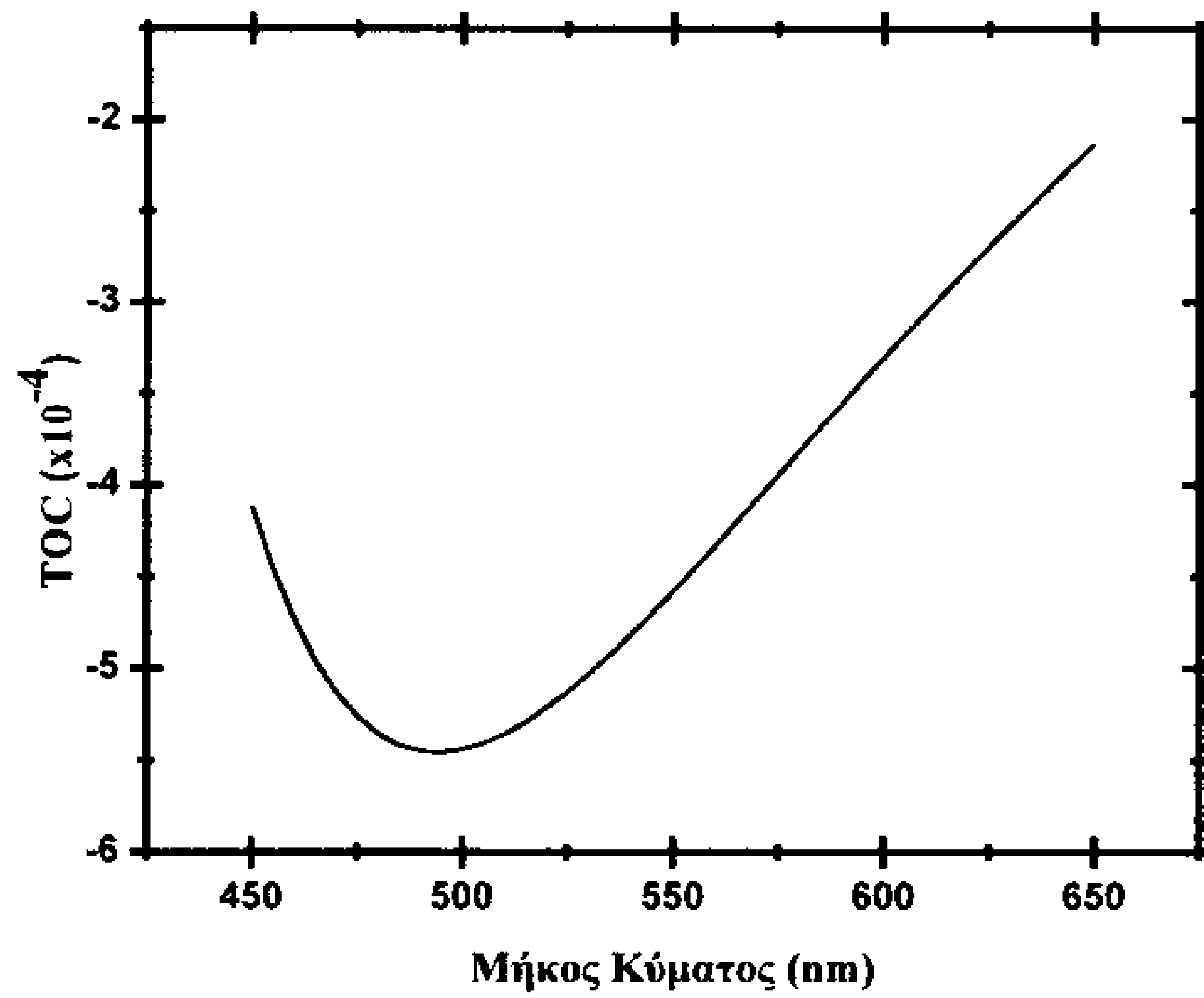
Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από αυτή τη μελέτη παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα.



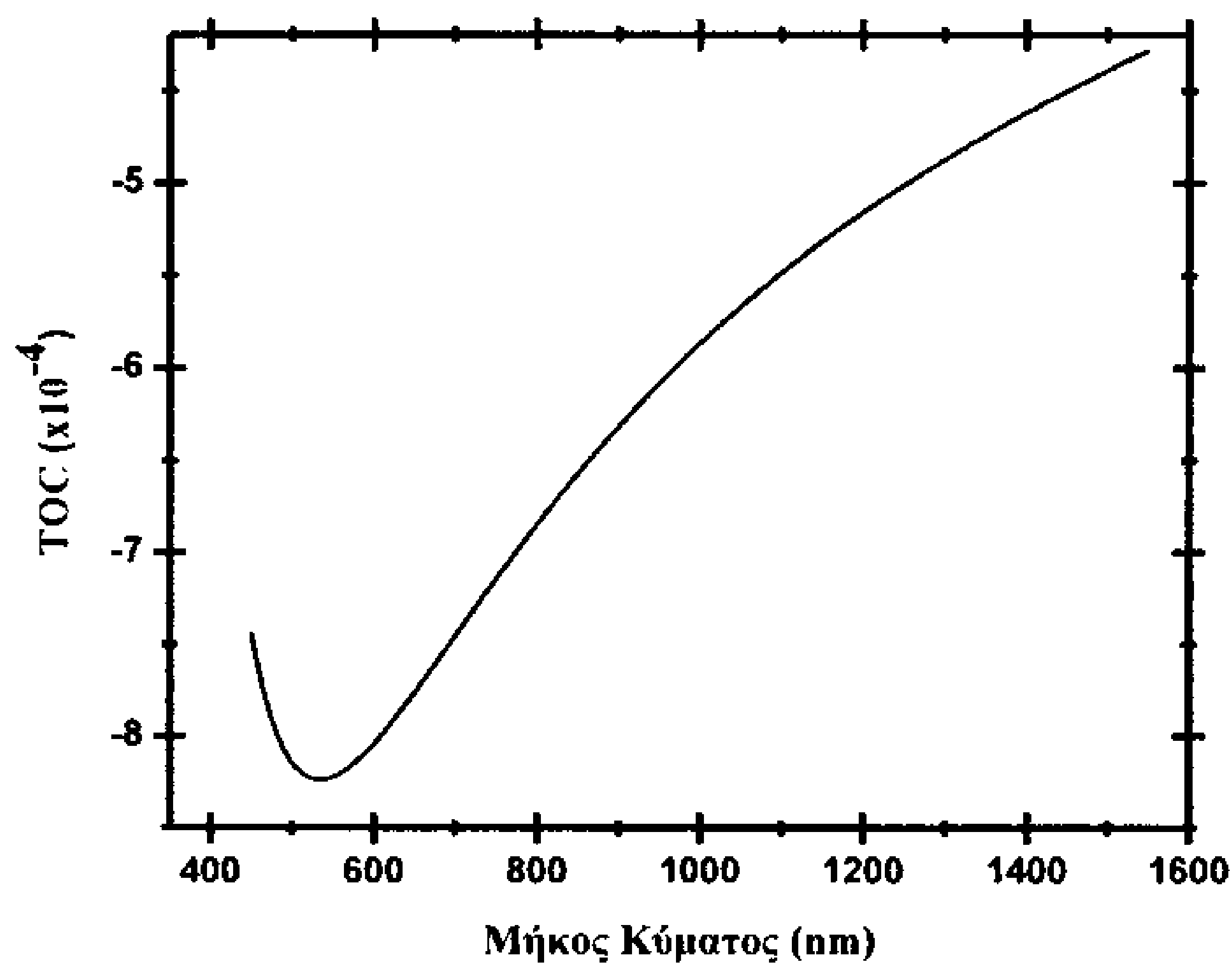
Σχήμα 3.1: Εκτιμώμενος θερμο-οπτικός συντελεστής της 1-Βουτανόλης (σε σύγκριση με αναφ.[22]).



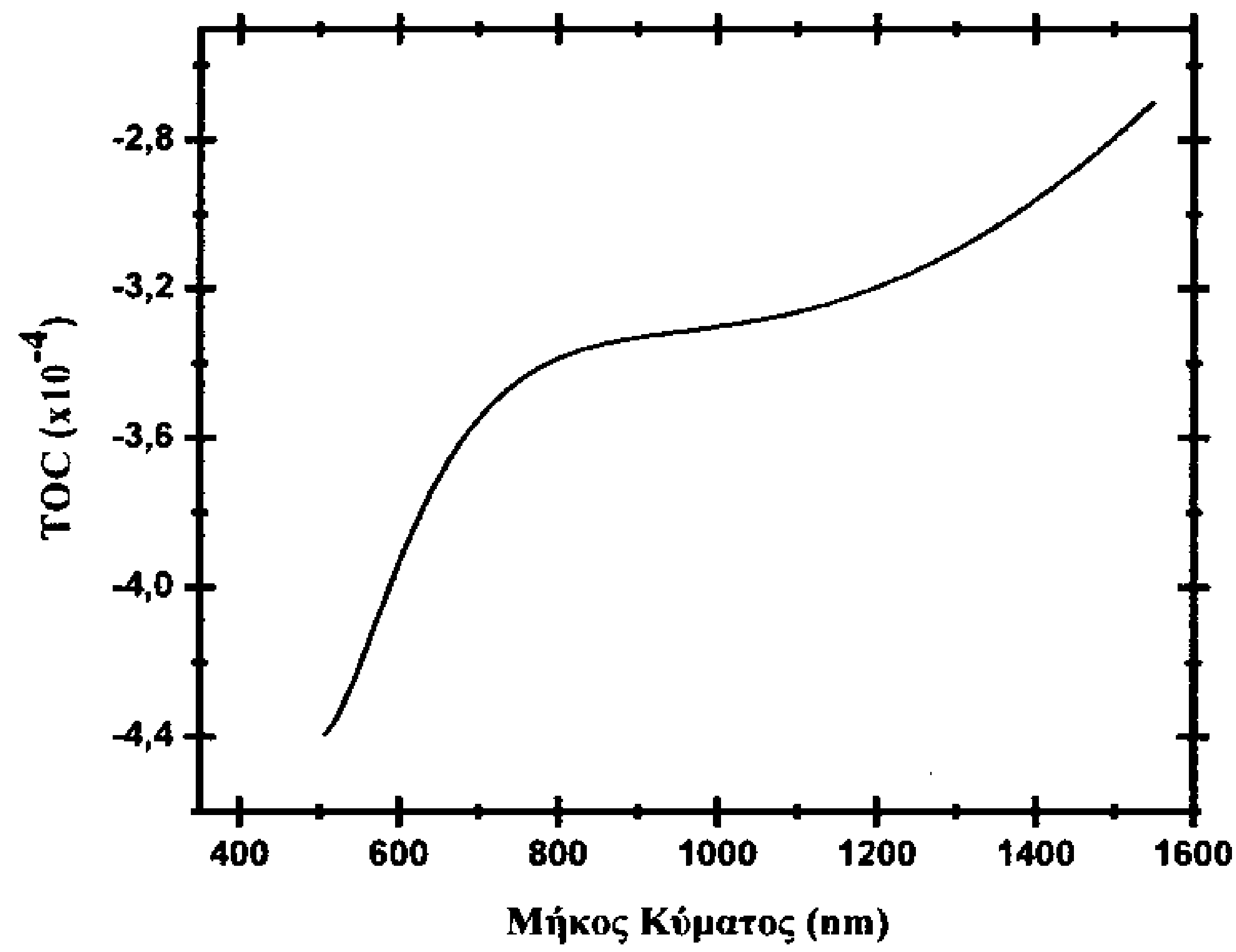
Σχήμα 3.2: Εκτιμώμενος θερμο-οπτικός συντελεστής της 1-Προπανόλης (σε σύγκριση με αναφ.[27]).



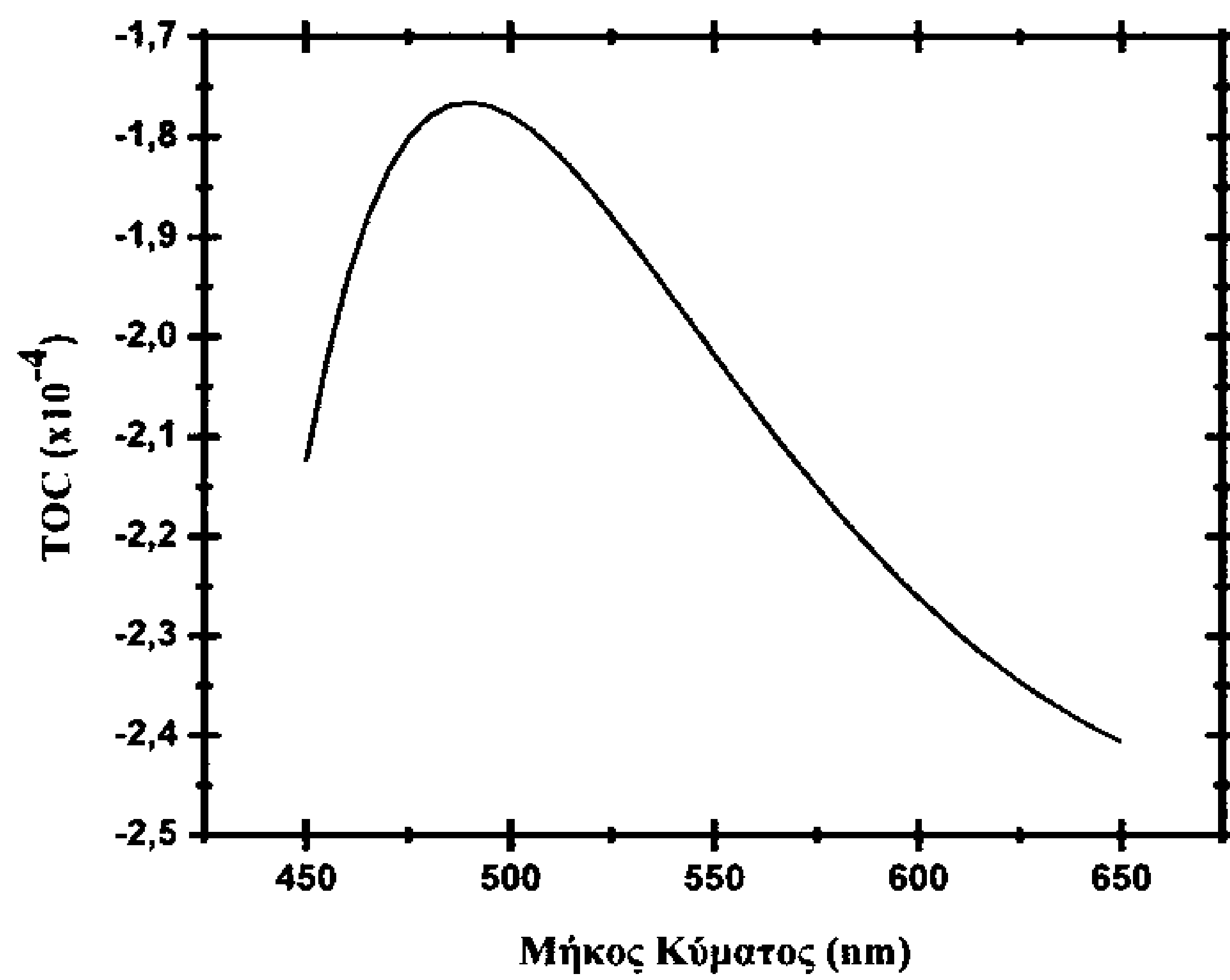
Σχήμα 3.3: Εκτιμώμενος θερμο-οπτικός συντελεστής του Ακετονιτρίλιου (σε σύγκριση με αναφ.[29]).



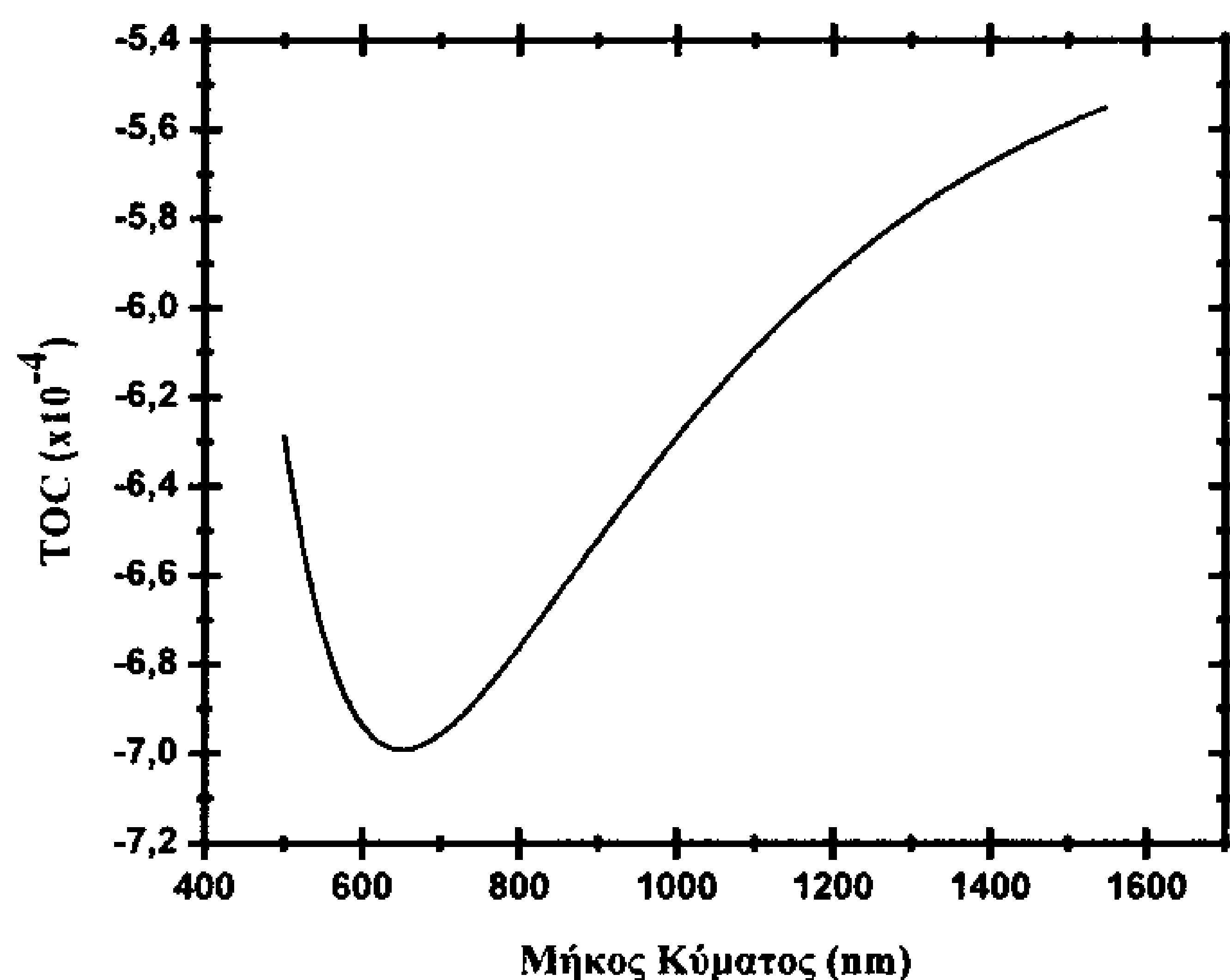
Σχήμα 3.4: Εκτιμώμενος θερμο-οπτικός συντελεστής του Βενζόλιου (σε σύγκριση με αναφ.[35]).



Σχήμα 3.5: Εκτιμώμενος θερμο-οπτικός συντελεστής του Τετραχλωράνθρακα (σε σύγκριση με αναφ.[38]).



Σχήμα 3.6: Εκτιμώμενος θερμο-οπτικός συντελεστής της Μεθανόλης (σε σύγκριση με αναφ.[29]).



Σχήμα 3.7: Εκτιμώμενος θερμο-οπτικός συντελεστής του Τολουένιου (σε σύγκριση με αναφ.[38]).

3.3 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα μπορεί να εξαχθεί ένα πλήθος χρήσιμων συμπερασμάτων. Κατ' αρχάς, παρατηρείται πως σε όλα τα μήκη κύματος, όλοι οι διαλύτες παρουσιάζουν αρνητικούς θερμο-οπτικούς συντελεστές, πράγμα που υποδηλώνει μείωση του δείκτη διάθλασης με αύξηση της θερμοκρασίας. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενη και να συσχετισθεί με το γεγονός ότι αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση του όγκου και άρα μείωση της πυκνότητας του υγρού. Συγκεκριμένα, οι τιμές του θερμο-οπτικού συντελεστή κυμάνθηκαν προσεγγιστικά από $-10^{-3}K^{-1}$ ως $-10^{-4}K^{-1}$, παρατήρηση που φανερώνει ότι μία μεταβολή κατά $10^{\circ}C$ συνεπάγεται αλλαγή στο δεύτερο ή τρίτο δεκαδικό ψηφίο του δείκτη διάθλασης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, παρατηρήθηκε ακόμη πως, κατ' απόλυτη τιμή, ο θερμο-οπτικός συντελεστής εμφανίζει μικρότερες τιμές στο υπέρυθρο και μεγαλύτερες στο ορατό (εξαιρέση αποτελούν η προπανόλη και η μεθανόλη). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως στις περισσότερες περιπτώσεις η διασπορά του θερμο-οπτικού συντελεστή εμφανίζει μη-μονότονη συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, τοπικά ακρότατα εμφανίζονται στην περιοχή του ορατού φάσματος. Σε αυτή την παρατήρηση, δεν έχει αποδοθεί κάποια

σαφής θεωρητική ερμηνεία, και άρα το φαινόμενο αυτό χρήζει περαιτέρω πειραματικής και θεωρητικής διερεύνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

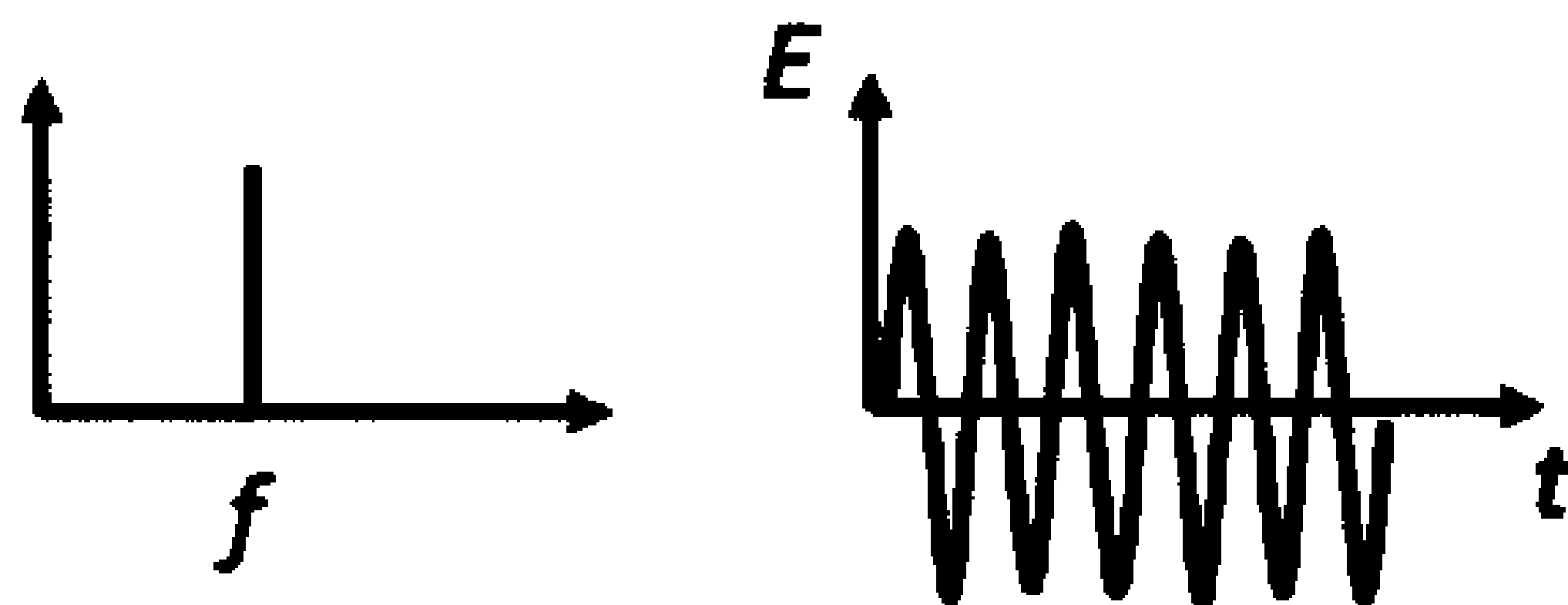
Ενδεικτική εφαρμογή: Διασπορά ταχύτητας ομάδας

4.1 Εισαγωγικές έννοιες: Ταχύτητα φάσης και ταχύτητα ομάδας

Είναι γνωστό πως μια μονοχρωματική (δηλαδή μια μονοσυχνотική) δέσμη φωτός χαρακτηρίζεται από μία συχνότητα f (άρα και ένα μήκος κύματος λ) και ταξιδεύει στο χώρο με μία ταχύτητα, η οποία ονομάζεται ταχύτητα φάσης u_p (ή απλούστερα ταχύτητα του φωτός c) και δίνεται από τον τύπο:

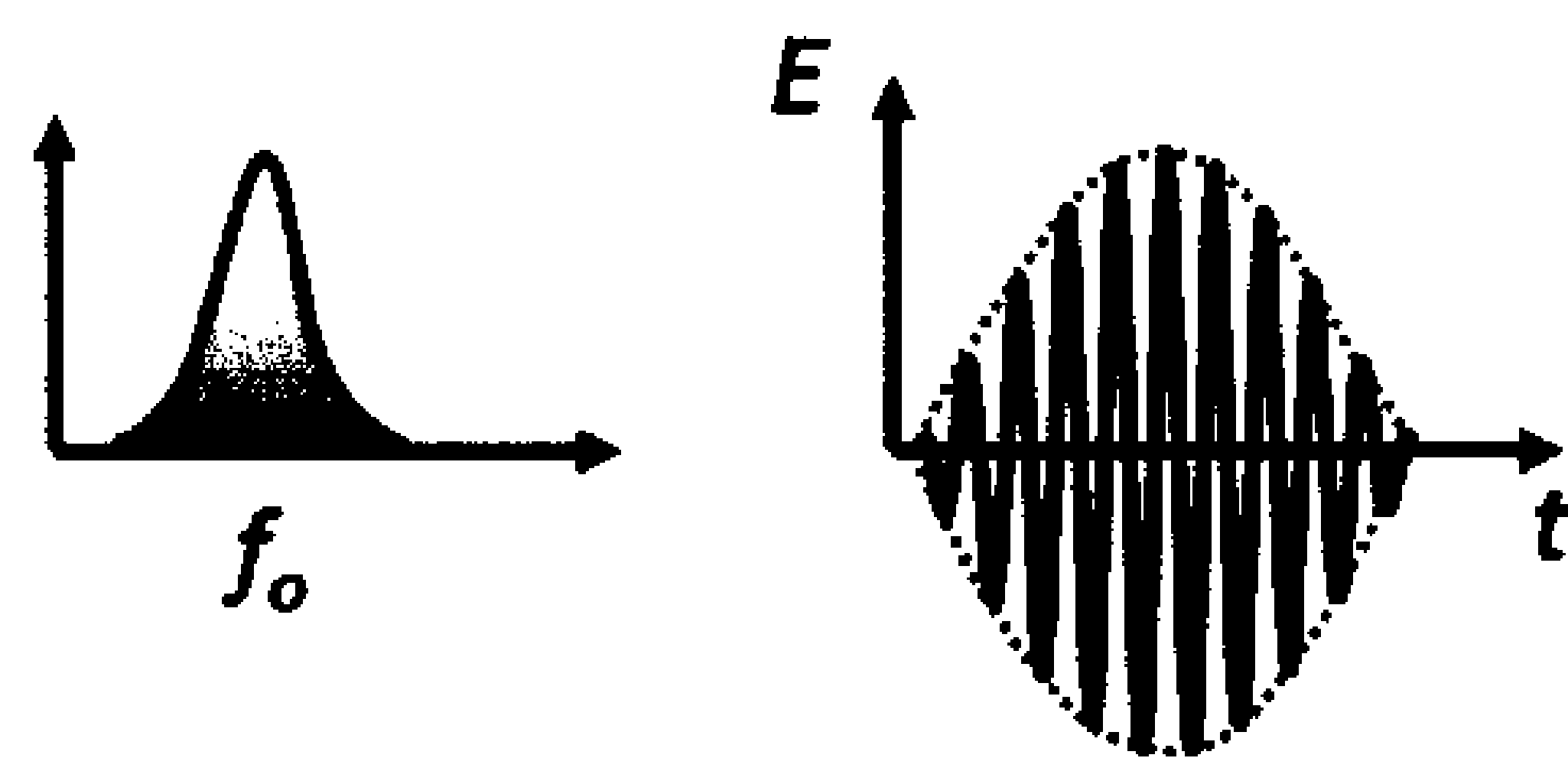
$$c = u_p = \lambda \cdot f = \frac{\omega}{k}, \quad \text{όπου } \omega = 2\pi f \text{ και } k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.1)$$

Σε αυτή την περίπτωση, η δέσμη φωτός μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα απλής ημιτονικής μορφής (σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση μονοχρωματικής δέσμης φωτός: Φάσμα (αριστερά) και ημιτονοειδής ταλάντωση του ηλεκτρικού πεδίου (δεξιά).

Πολλές πηγές φωτός (και κυρίως τα παλμικά laser), δεν παρέχουν μονοχρωματική ακτινοβολία, αλλά αντίθετα παράγουν φως, το φάσμα του οποίου περιέχει ένα εύρος συχνοτήτων (ας υποθέσουμε με κεντρική συχνότητα f_0). Σε αυτή την περίπτωση, η υπέρθεση ημιτονικών κυμάτων με διαφορετικές συχνότητες παράγει ένα συνολικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα που έχει τη μορφή «διακροτήματος» (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση ευρυφασματικής δέσμης φωτός: Φάσμα (αριστερά) και ταλάντωση του ηλεκτρικού πεδίου (δεξιά) με μορφή «διακροτήματος» (παλμός). Με διακεκομμένη γραμμή η περιβάλλουσα.

Σε αυτή την περίπτωση, είναι σαφές πως η ταχύτητα φάσης μπορεί να συσχετιστεί μόνο με την ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν οι ανεξάρτητες ημιτονικές συνιστώσες του οπτικού σήματος και όχι με την υπέρθεσή τους (δηλαδή, όχι με το συνολικό κύμα). Κατά συνέπεια, η ταχύτητα διάδοσης του παλμού προσδιορίζεται μέσω της ταχύτητας με την οποία διαδίδεται στο χώρο η περιβάλλουσα του συνολικού κύματος. Η ταχύτητα της περιβάλλουσας ονομάζεται ταχύτητα ομάδας και δίνεται από τη σχέση:

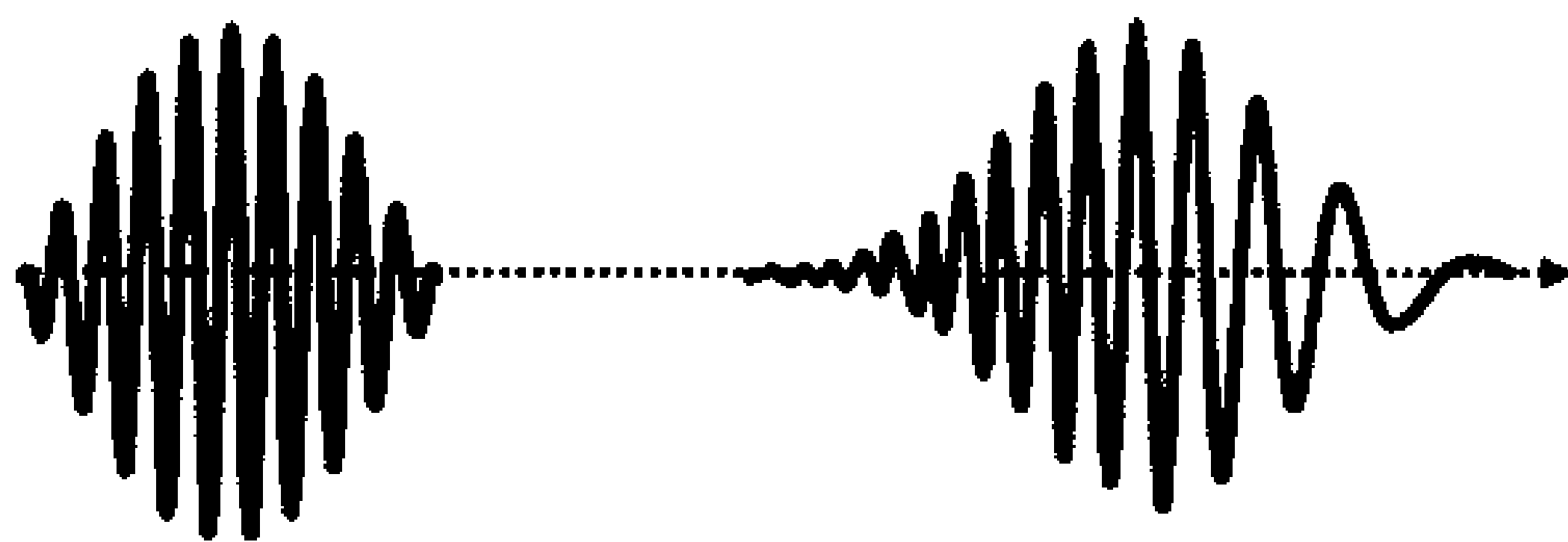
$$u_g = \frac{d\omega}{dk}. \quad (4.2)$$

Από τις σχέσεις 4.1 και 4.2, είναι σαφές πως σε ένα μέσο χωρίς διασπορά του δείκτη διάθλασης όλες οι συνιστώσες του κύματος ταξιδεύουν με την ίδια ταχύτητα φάσης, ενώ ακόμα η περιβάλλουσα κινείται με ταχύτητα ομάδας που είναι ίση με την (κοινή για όλες τις συνιστώσες) ταχύτητα φάσης:

$$u_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d}{dk}(ck) = c = u_p. \quad (4.3)$$

Όταν όμως ο παλμός ταξιδεύει σε μέσο με διασπορά, τότε οι επιμέρους συνιστώσες του κινούνται με διαφορετική ταχύτητα φάσης. Στη συνηθέστερη περίπτωση (ομαλή διασπορά) ο δείκτης διάθλασης του μέσου αυξάνει καθώς αυξάνει η συχνότητα, ή διαφορετικά η ταχύτητα φάσης κάθε συνιστώσας μειώνεται καθώς αυξάνει η συχνότητα. Συνεπώς, η διασπορά του μέσου έχει ως αποτέλεσμα οι υψηλές

συχνότητες να «αργοπορούν» και οι χαμηλές συχνότητες να «προπορεύονται», ένα φαινόμενο που απεικονίζεται στο σχήμα 4.3.



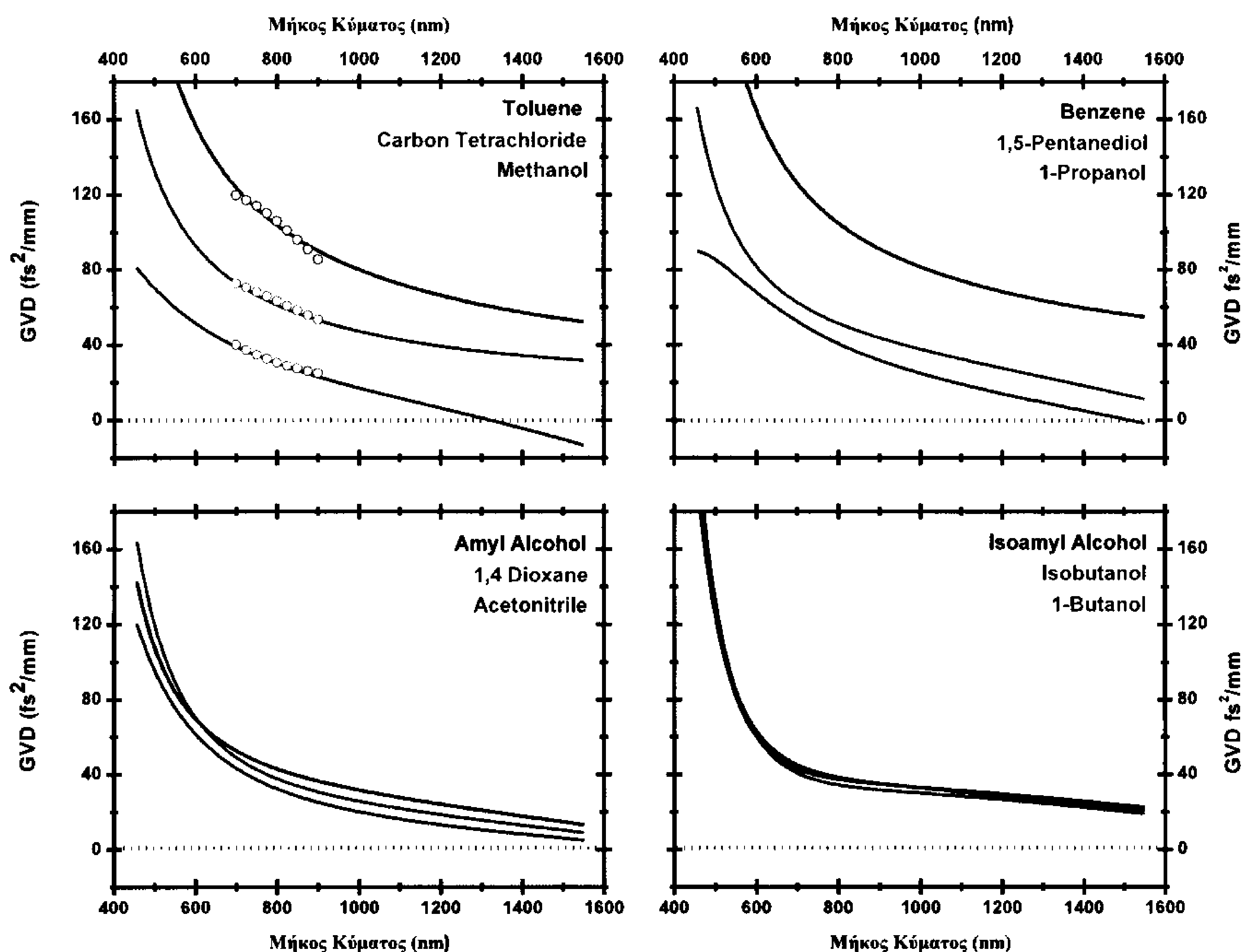
Σχήμα 4.3: Διεύρυνση της περιβάλλουσας του παλμού καθώς αυτός διαδίδεται σε μέσο ομαλής διασποράς.

Είναι σαφές πως εξαιτίας της χρωματικής διασποράς, ο παλμός διαδιδόμενος αλλάζει τη μορφή του, και συγκεκριμένα διευρύνεται. Το φαινόμενο αυτό ποσοτικοποιείται μέσω του μεγέθους της διασποράς της ταχύτητας ομάδας (group velocity dispersion ή GVD), η οποία ορίζεται ως:

$$GVD = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{u_g} \right) = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{dk}{d\omega} \right) = \frac{d^2k}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \cdot \frac{d^2n(\lambda)}{d\lambda^2}. \quad (4.4)$$

4.2 Υπολογισμός διασποράς ταχύτητας ομάδας

Στην προηγούμενη ενότητα, εξηγήθηκε ότι η διασπορά ταχύτητας ομάδας είναι μια σημαντική παράμετρος που συνδέεται με τη διάδοση παλμών laser σε διάφανα υλικά. Πρόσφατα έχουν δημοσιευθεί δύο εκθέσεις με τον πειραματικό προσδιορισμό του GVD σε υγρά δείγματα [45,46]. Συγκεκριμένα στην εργασία της αναφοράς [45] μετρήθηκαν τρεις από τους διαλύτες που χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία, σε διάφορα μήκη κύματος στο εύρος 700nm-900nm, με άμεσα συγκρίσιμα αποτελέσματα όπως φαίνεται στο σχήμα (4.3). Με την χρήση της εξίσωσης Cauchy που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το GVD των δώδεκα διαλυτών μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από τη σχέση (4.3). Στο σχήμα (4.3) φαίνονται οι θεωρητικές καμπύλες για τον κάθε οργανικό διαλύτη ξεχωριστά, καθώς και η σύγκριση τριών από αυτούς με βιβλιογραφικά δεδομένα.



Σχήμα 4.3: Θεωρητικές τιμές της διασποράς ταχύτητας ομάδας (συνεχείς γραμμές). Βιβλιογραφικά δεδομένα πειραματικών τιμών [45] (ανοιχτοί κύκλοι).

4.3 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Από τους υπολογισμούς και τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο διάγραμμα (4.3) μπορεί να εξαχθεί ένα πλήθος χρήσιμων συμπερασμάτων. Η τιμή της διασποράς της ταχύτητας ομάδας λαμβάνει τυπικές τιμές της τάξης των $\sim 100 \text{fs}^2/\text{mm}$ στην περιοχή του ορατού, ενώ μειώνεται στην περιοχή κάτω από $\sim 50 \text{fs}^2/\text{mm}$ καθώς το μήκος κύματος πλησιάζει το τηλεπικοινωνιακό μήκος κύματος στο υπέρυθρο. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό πως η διασπορά της ταχύτητας ομάδας μηδενίζεται σε δύο περιπτώσεις: σε ένα μήκος κύματος 1320nm (1515nm) για την μεθανόλη και την προπανόλη, αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτών των δύο διαλυτών, και για όλα τα μεγαλύτερα μήκη κύματος στο υπέρυθρο, η διασπορά της ταχύτητας ομάδας λαμβάνει αρνητικές τιμές. Συγκεκριμένα, αρνητικές τιμές της διασποράς της ταχύτητας ομάδας φτάνουν μέχρι και τα $-13.4 \text{fs}^2/\text{mm}$ για τη μεθανόλη.

Εξ όσων γνωρίζουμε, είναι η πρώτη φορά που προβλέπονται μηδενικές και αρνητικές τιμές στη διασπορά της ταχύτητας ομάδας σε κοινά υγρά. Η παρατήρηση αυτή, είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς προβλέπεται η δυνατότητα διάδοσης υπερταχέων παλμών laser χωρίς διεύρυνση (στα μήκη κύματος όπου $GVD=0$). Επιπρόσθετα, προτείνεται η δυνατότητα χρήσης αυτών των δύο υγρών διαλυτών σε εφαρμογές συμπίεσης παλμών, οι οποίοι προηγούμενα είχαν υποστεί διεύρυνση (σε μήκη κύματος όπου $GVD<0$).

Τέλος, τα γραφήματα στο σχήμα (4.3) αναδεικνύουν ότι οι θεωρητικές μας προβλέψεις είναι σε άριστη συμφωνία με πειραματικά δεδομένα που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία. Ενδεικτικά, σε ένα μήκος κύματος 800nm, υπολογίστηκαν θεωρητικά τιμές της διασποράς της ταχύτητας ομάδας ίσες με $103.7\text{fs}^2/\text{mm}$, $61.2\text{fs}^2/\text{mm}$ και $30.0\text{fs}^2/\text{mm}$ για το τολουένιο, τον τετραχλωράνθακα και τη μεθανόλη, αντίστοιχα. Στο ίδιο μήκος κύματος, οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές της βιβλιογραφίας ήταν ίσες με $105.7\text{fs}^2/\text{mm}$, $63.1\text{fs}^2/\text{mm}$ και $30.4\text{fs}^2/\text{mm}$. Αυτό επιβεβαιώνει ότι στην παρούσα εργασία υπήρξε μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις, τέτοια ώστε να υπάρχει ταύτιση των θεωρητικών υπολογισμών της τιμής του GVD με αυτές των πειραματικών της βιβλιογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή μετρήθηκε ο δείκτης διάθλασης δώδεκα οργανικών διαλυτών και τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή εξισώσεων διασποράς, για τον θεωρητικό υπολογισμό του θερμο-οπτικού συντελεστή καθώς και τον υπολογισμό της διασποράς ταχύτητας ομάδας που είναι και μια ενδεικτική εφαρμογή των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης εργασίας. Τα βασικά συμπεράσματα αυτής της μελέτης συνοψίζονται ως εξής.

Αποδείχτηκε ότι τα πειραματικά δεδομένα προσομοιώνονται με άριστη ακρίβεια από τις σχέσεις διασποράς που εξήχθησαν. Είναι αντιληπτό ότι στις περιοχές ανάμεσα σε δύο διαδοχικές μετρήσεις, οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς εμφανίζουν γνησίως μονότονη συμπεριφορά, χωρίς τοπικά ακρότατα, και άρα η μορφή των καμπυλών αυτών μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή. Επίσης λόγω της μεγάλης επαναληψιμότητας των μετρήσεων και από την σύγκριση τους με την βιβλιογραφία εξήχθησαν πολύτιμα συμπεράσματα. Αρχικά η εργασία αυτή καλύπτει πλήρως την μελέτη της διασποράς του δείκτη διάθλασης δώδεκα διαλυτών σε ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος από 450nm – 1551nm στο οποίο περιλαμβάνεται ολόκληρο το ορατό φάσμα και ένα μέρος του υπέρυθρου. Συγχρόνως παρατηρήθηκε ότι οι πειραματικές μετρήσεις και οι εξισώσεις που εξήχθησαν είναι άμεσα συγκρίσιμες με παλιότερες βιβλιογραφικές μετρήσεις και εξισώσεις προηγούμενων μελετών που διεξήχθησαν σε διαφορετικές αλλά πολύ κοντινές στους 300K θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε συμμετρία στις αυξομειώσεις του δείκτη διάθλασης όπου σε υψηλότερες θερμοκρασίες οι τιμές του μειώνονται και αντίστοιχα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες αυξάνονται.

Πέρα από το την σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με αντίστοιχες μετρήσεις της βιβλιογραφίας για ευνόητους λόγους όπως την επαλήθευση των μετρήσεων δόθηκε η δυνατότητα να υπολογιστεί ο θερμο-οπτικός συντελεστής των διαλυτών. Παρατηρήθηκε πως και οι δώδεκα διαλύτες παρουσίασαν αρνητικούς θερμο-οπτικούς συντελεστές. Γίνεται δηλαδή σαφές πως ο δείκτης διάθλασης μειώνεται με την

αύξηση της θερμοκρασίας, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού είναι γνωστό ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση του όγκου και άρα μείωση της πυκνότητας του υγρού. Γίνεται αντιληπτό πως με μια μεταβολή της τάξης των 10°C παρατηρείται αλλαγή στο δεύτερο ή τρίτο δεκαδικό ψηφίου του δείκτη διάθλασης.

Παρατηρήθηκε πως η διασπορά του θερμό-οπτικού συντελεστή εμφανίζει μη μονότονη συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα στο ορατό φάσμα εμφανίζονται τοπικά ακρότατα. Αυτή η συμπεριφορά του θερμό-οπτικού συντελεστή δεν έχει εξηγηθεί και χρήζει περαιτέρω ανάλυση και μελέτη.

Τελικώς υπολογίστηκε η διασπορά ταχύτητας ομάδας για τον κάθε διαλύτη και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα. Όπως ότι το GVD παίρνει τιμές περίπου της τάξης των $\sim 100\text{fs}^2/\text{mm}$ στην περιοχή του ορατού και μειώνεται στην περιοχή κάτω από $\sim 50\text{fs}^2/\text{mm}$ καθώς το μήκος κύματος πλησιάζει το τηλεπικοινωνιακό μήκος κύματος στο υπέρυθρο.

Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός πως για δυο διαλύτες, την μεθανόλη στο μήκος κύματος των 1320nm και για την προπανόλη στο μήκος κύματος των 1515nm η διασπορά ταχύτητας ομάδας μηδενίστηκε. Είναι λοιπόν σαφές πως για τους δυο αυτούς διαλύτες σε μεγαλύτερα μήκη κύματος η τιμή του GVD γίνεται αρνητική, φτάνοντας μέχρι και τα $-13.4\text{fs}^2/\text{mm}$ για τη μεθανόλη, κάτι που μέχρι στιγμής δεν έχει αναφερθεί πουθενά στη βιβλιογραφία για κοινούς διαλύτες. Αυτό είναι σημαντικό, γιατί μπορεί να γίνει δυνατή η διάδοση υπερταχέων παλμών laser χωρίς διεύρυνση στα μήκη κύματος όπου $\text{GVD}=0$.

Επιπροσθέτως για το τολουένιο, τον τετραχλωράνθρακα και τη μεθανόλη που εντοπίστηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα, παρατηρήθηκε ταύτιση αποτελεσμάτων σε πλήθος μηκών κύματος. Αυτή η εξαιρετική αναπαραγωγή πειραματικών δεδομένων με χρήση των εξισώσεων χρωματικής διασποράς που προτάθηκαν σε αυτή την εργασία, αποτελεί ισχυρό επιχείρημα υπέρ της αξιοπρόσεχτης ακρίβειας των μετρήσεών μας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στις σελίδες που ακολουθούν παρατίθενται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις του δείκτη διάθλασης που έγιναν κατά την διάρκεια της εργασίας για τον κάθε διαλύτη ξεχωριστά σε κάθε ένα από τα πέντε μήκη κύματος.

1,5 Πεντανο-διόλη

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,4525	1,4456	1,4419	1,4359	1,4311
	1,4527	1,4461	1,4415	1,4359	1,4327
	1,4539	1,4460	1,4421	1,4359	1,4313
	1,4525	1,4465	1,4421	1,4361	1,4315
	1,4536	1,4463	1,4415	1,4357	1,4311
	1,4534	1,4472	1,4417	1,4356	1,4311
	1,4537	1,4467	1,4417	1,4350	1,4306
	1,4534	1,4461	1,4415	1,4350	1,4308
	1,4532	1,4470	1,4423	1,4354	1,4311
	1,4525	1,4468	1,4421	1,4352	1,4310
	1,4537	1,4467	1,4421	1,4356	1,4311
	1,4536	1,4463	1,4421	1,4356	1,4310

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,4533	1,4525	1,4539	0,0008	0,0006
532	1,4465	1,4456	1,4472	0,0009	0,0007
632,8	1,4419	1,4415	1,4423	0,0004	0,0004
964	1,4355	1,4350	1,4361	0,0005	0,0006
1551	1,4311	1,4306	1,4315	0,0005	0,0004

1-Βουτανόλη

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,4035	1,3976	1,3943	1,3892	1,386
	1,4032	1,3971	1,3943	1,3892	1,3856
	1,403	1,3972	1,3937	1,3889	1,3856
	1,403	1,3974	1,3937	1,3887	1,3854
	1,403	1,3972	1,3939	1,3892	1,3858
	1,4026	1,3978	1,3941	1,3889	1,3853
	1,4032	1,3976	1,3941	1,3896	1,3862
	1,4034	1,398	1,3943	1,3894	1,3862

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,4031	1,4026	1,4035	0,0005	0,0004
532	1,3975	1,3971	1,3980	0,0004	0,0005
632,8	1,3941	1,3937	1,3943	0,0003	0,0003
964	1,3891	1,3887	1,3896	0,0004	0,0005
1551	1,3858	1,3853	1,3862	0,0005	0,0004

1-Προπανόλη

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,3896	1,3853	1,3804	1,3763	1,3727
	1,3901	1,3848	1,3813	1,3769	1,3736
	1,3903	1,3855	1,3816	1,3772	1,374
	1,3905	1,3851	1,3818	1,3772	1,374
	1,3899	1,3851	1,3811	1,3769	1,3733
	1,3899	1,3851	1,3813	1,3769	1,3736
	1,3907	1,3857	1,382	1,3776	1,3744
	1,3909	1,3861	1,382	1,3776	1,3744

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,3902	1,3896	1,3909	0,0006	0,0007
532	1,3853	1,3848	1,3861	0,0005	0,0008
632,8	1,3814	1,3804	1,3820	0,0010	0,0006
964	1,3771	1,3763	1,3776	0,0008	0,0005
1551	1,3738	1,3727	1,3744	0,0011	0,0007

Ακετονιτρίλιο

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,3464	1,3419	1,339	1,3362	1,3339
	1,3466	1,3421	1,3394	1,3361	1,3342
	1,3473	1,3422	1,3398	1,336	1,3346
	1,3475	1,3409	1,3398	1,3373	1,3344

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,3470	1,3464	1,3475	0,0006	0,0005
532	1,3418	1,3409	1,3422	0,0009	0,0004
632,8	1,3395	1,3390	1,3398	0,0005	0,0003
964	1,3364	1,3360	1,3373	0,0004	0,0009
1551	1,3343	1,3339	1,3346	0,0004	0,0003

Αμυλική Αλκοόλη

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,4164	1,4100	1,4063	1,4010	1,3981
	1,4162	1,4107	1,4064	1,4012	1,3981
	1,4145	1,4089	1,4048	1,4006	1,3974
	1,4147	1,4086	1,4057	1,4008	1,3974
	1,4145	1,4093	1,4057	1,4008	1,3975
	1,4147	1,4095	1,4059	1,4006	1,3975
	1,4153	1,4093	1,4057	1,4006	1,3979
	1,4153	1,4098	1,4057	1,4008	1,3979

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,4152	1,4145	1,4164	0,0007	0,0012
532	1,4095	1,4086	1,4107	0,0009	0,0012
632,8	1,4058	1,4048	1,4064	0,0010	0,0006
964	1,4008	1,4006	1,4012	0,0002	0,0004
1551	1,3977	1,3974	1,3981	0,0003	0,0004

Βενζόλιο

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,5157	1,5020	1,4931	1,4829	1,4778
	1,5154	1,5020	1,4930	1,4826	1,4777
	1,5133	1,5012	1,4933	1,4809	1,4761
	1,5142	1,5008	1,4926	1,4816	1,4767
	1,5142	1,5007	1,4925	1,4814	1,4767
	1,5132	1,5007	1,4916	1,4812	1,4763
	1,5149	1,5012	1,4921	1,4812	1,4772
	1,5142	1,5008	1,4919	1,4811	1,4765
	1,5145	1,5008	1,4926	1,4816	1,4767

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,5144	1,5132	1,5157	0,0012	0,0013
532	1,5011	1,5007	1,5020	0,0004	0,0009
632,8	1,4925	1,4916	1,4933	0,0009	0,0008
964	1,4816	1,4809	1,4829	0,0007	0,0013
1551	1,4769	1,4761	1,4778	0,0008	0,0009

Τετραλωράνθρακας

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,4679	1,4599	1,4558	1,4490	1,4461
	1,4679	1,4601	1,4556	1,4490	1,4463
	1,4669	1,4592	1,4546	1,4487	1,4459
	1,4669	1,4595	1,4547	1,4489	1,4463
	1,4674	1,4604	1,4551	1,4492	1,4466
	1,4674	1,4599	1,4553	1,4496	1,4466

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,4674	1,4669	1,4679	0,0005	0,0005
532	1,4598	1,4592	1,4604	0,0006	0,0006
632,8	1,4552	1,4546	1,4558	0,0006	0,0006
964	1,4491	1,4487	1,4496	0,0004	0,0005
1551	1,4463	1,4459	1,4466	0,0004	0,0003

Διοξάνιο

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,4289	1,4278	1,4276	1,4278	1,4282
	1,4228	1,4223	1,4228	1,4219	1,4223
	1,4199	1,4190	1,4190	1,4187	1,4185
	1,4159	1,4150	1,4150	1,4144	1,4141
	1,4134	1,4125	1,4127	1,4120	1,4115

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,4281	1,4276	1,4289	0,0005	0,0008
532	1,4224	1,4219	1,4228	0,0005	0,0004
633	1,4190	1,4185	1,4199	0,0005	0,0009
964	1,4149	1,4141	1,4159	0,0008	0,0010
1551	1,4124	1,4115	1,4134	0,0009	0,0010

Ισο-βουτανόλη

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,4003	1,3945	1,3913	1,3867	1,3835
	1,4001	1,3943	1,3912	1,3869	1,3835
	1,4008	1,3950	1,3915	1,3871	1,3838
	1,4006	1,3958	1,3917	1,3869	1,3836
	1,4008	1,3949	1,3919	1,3869	1,3836
	1,4008	1,3950	1,3919	1,3869	1,3836
	1,4010	1,3952	1,3921	1,3871	1,3836
	1,4008	1,3952	1,3921	1,3872	1,3838

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,4007	1,4001	1,4010	0,0006	0,0004
532	1,3950	1,3943	1,3958	0,0007	0,0008
632,8	1,3917	1,3912	1,3921	0,0005	0,0004
964	1,3870	1,3867	1,3872	0,0003	0,0002
1551	1,3836	1,3835	1,3838	0,0001	0,0002

Ισο-αμυλική Αλκοόλη

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,4118	1,4060	1,4030	1,3979	1,3945
	1,4122	1,4062	1,4030	1,3981	1,3947
	1,4124	1,4062	1,4032	1,3981	1,3948
	1,4125	1,4069	1,4032	1,3979	1,3948
	1,4118	1,4067	1,4023	1,3974	1,3945
	1,4118	1,4066	1,4026	1,3976	1,3943
	1,4125	1,4067	1,4030	1,3981	1,3947
	1,4124	1,4060	1,4030	1,3981	1,3947

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,4122	1,4118	1,4125	0,0004	0,0003
532	1,4064	1,4060	1,4069	0,0004	0,0005
632,8	1,4029	1,4023	1,4032	0,0006	0,0003
964	1,3979	1,3974	1,3981	0,0005	0,0002
1551	1,3946	1,3943	1,3948	0,0003	0,0002

Μεθανόλη

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,3330	1,3295	1,3257	1,3215	1,3172
	1,3334	1,3291	1,3259	1,3215	1,3174
	1,3336	1,3299	1,3267	1,3222	1,3178
	1,3336	1,3295	1,3265	1,3222	1,3180
	1,3324	1,3280	1,3250	1,3207	1,3167
	1,3323	1,3278	1,3250	1,3207	1,3167
	1,3334	1,3285	1,3252	1,3207	1,3169
	1,3328	1,3282	1,3250	1,3209	1,3167
	1,3324	1,3280	1,3252	1,3211	1,3172
	1,3323	1,3289	1,3253	1,3211	1,3171

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο.-Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,3329	1,3323	1,3336	0,0006	0,0007
532	1,3287	1,3278	1,3299	0,0009	0,0012
632,8	1,3256	1,3250	1,3267	0,0006	0,0011
964	1,3213	1,3207	1,3222	0,0006	0,0009
1551	1,3172	1,3167	1,3180	0,0005	0,0008

Τολουένιο

Μήκος κύματος	450	532	632,8	964	1551
Δ. Δ.	1,5111	1,4971	1,4875	1,4778	1,4731
	1,5111	1,4967	1,4873	1,4778	1,4731
	1,5113	1,4981	1,4897	1,479	1,4741
	1,5109	1,4981	1,4894	1,479	1,4739
	1,5104	1,4981	1,4896	1,4785	1,4741
	1,5103	1,4979	1,4889	1,4787	1,4737
	1,5099	1,4967	1,4884	1,4782	1,4738
	1,5094	1,4967	1,4885	1,4783	1,4738
	1,5103	1,4971	1,4887	1,4782	1,4739
	1,5101	1,4972	1,4885	1,478	1,4738
	1,5092	1,4967	1,4884	1,4783	1,4736
	1,5092	1,4969	1,4887	1,4782	1,4734

Μήκος κύματος	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	Μ.Ο. -Ε.Τ.	Μ.Τ.-Μ.Ο
450	1,5103	1,5092	1,5113	0,0011	0,0010
532	1,4973	1,4967	1,4981	0,0006	0,0008
632,8	1,4886	1,4873	1,4897	0,0013	0,0011
964	1,4783	1,4778	1,4790	0,0005	0,0007
1551	1,4737	1,4731	1,4741	0,0006	0,0004

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] S. Singh, "Refractive index measurement and its applications", *Physica Scripta*, **65**, pp167-180 (2002).
- [2] B. P. Chandra and C. Bhaiya, "A simple, accurate alternative to minimum deviation method of determining the refractive index of liquids", *Am. J. Phys.* **51** (2), pp160-161 (1983).
- [3] E. Moreel, C. de Greef and R. Finsy, "Laser light refractometer", *Applied Optics* **23**, Issue 17, pp3010-3013 (1984).
- [4] D. D. Jenkins, "Refractive indices of solutions", *Phys. Educ.* **17**, pp82-83 (1982).
- [5] S. Singh, "An inexpensive method for the measurement of refractive index of liquids using a He-Ne laser and a thin reflecting glass plate or mercury as a reflecting surface", Accepted for publication in *Physics Education* (2001).
- [6] L. Lin, L. Du, "Measuring the refractive index of liquid and gas by Mie scattering", International Institute of Informatics and Systemics, http://www.iiis.org/CDs2012/CD2012SCI/IMETI_2012/PapersPdf/FA207OA.pdf.
- [7] F. M. Cox, A. Argyros, and M. C. J. Large, "Liquid-filled hollow core microstructured polymer optical fiber", *Opt. Express* **14**, pp4135-4140 (2006).
- [8] Y. Zhu, X. Chen, Y. Xu, and Y. Xia, "Propagation properties of single-mode liquid-core optical fibers with subwavelength diameter", *J. Lightwave Technol.* **25**, pp3051-3056 (2007).
- [9] R. Zhang, J. Teipel, X. Zhang, D. Nau, and H. Giessen, "Group velocity dispersion of tapered fibers immersed in different liquids", *Opt. Express* **12**, pp1700-1707 (2004).

- [10] T. Gissibl, M. Vieweg, M.M. Vogel, M. Aboud Ahmed, T. Graf, and H. Giessen, "Preparation and characterization of a large mode area liquid-filled photonic crystal fiber: transition from isolated to coupled spatial modes", *Appl. Phys. B* **106**, pp521-527 (2012).
- [11] J. Liu, H. Schroeder, S. L. Chin, R. Li, and Z. Xu, "Nonlinear propagation of fs laser pulses in liquids and evolution of supercontinuum generation", *Opt. Express* **13**, pp10248-10259 (2005).
- [12] S. Leekumjorn, S. Gullapalli, and M. S. Wong, "Understanding the solvent polarity effects on surfactant-capped nanoparticles", *J. Phys. Chem. B* **116**, pp13063-13070 (2012).
- [13] M. E. Lusty and M. H. Dunn, "Refractive indices and thermo-optical properties of dye laser solvents", *Appl. Phys. B* **44**, pp193-198 (1987).
- [14] D. Toptygin, "Effects of the solvent refractive index and its dispersion on the radiative decay rate and extinction coefficient of a fluorescent solute", *J. Fluoresc.* **13**, pp201-210 (2003).
- [15] A. R. Katritzky, S. Sild, and M. Karelson, "General quantitative structure-property relationship treatment of the refractive index of organic compounds", *J. Chem. Inf. Comput. Sci.* **38**, pp840-844 (1998).
- [16] K. Moutzouris, G. Hloupis, I. Stavarakas, D. Triantis, and Ming-Hsien Chou, "Temperature-dependent visible to near-infrared optical properties of 8 mol% Mg-doped lithium tantalate", *Opt. Mater. Express* **1**, pp458-465 (2011).
- [17] M. Gupta, I. Vibhu and J.P. Shukla, "Refractive index, molar refraction deviation and excess molar volume of binary mixtures of 1,4-dioxane with carboxylic acids", *Physics and Chemistry of Liquids*, **48**, No. 4, pp415-427 (August 2010).

- [18] Edward S. Amis , Arthur R. Choppin , Frank L. Padgitt, "Temperature and Composition Coefficients of the Density, Refractive Index, and Viscosity of the Methyl Alcohol—Dioxane System", *J. Am. Chem. Soc.* **64** (5), pp1207–1212 (1942).
- [19] Dnyaneshwar S. Wankhede, "Refractive indices for binary mixture of propylene carbonate", *International Journal of Chemistry Research*, **2**, Issue 2, pp23-26 (2011).
- [20] O. Iulian, A. Stefaniu, O. Ciocirlan and O. Croitoru, "Property prediction for binary and ternary systems with water, 1,4-Dioxane and Ethylene Glycol. II. Refractive index", *Revue Roumaine de Chimie* **55**(8), pp475-480 (2010).
- [21] E. W. Flick, *Industrial solvent's handbook* (Noyes Data Corporation Publ., 1998).
- [22] H. El-Kashef, "The necessary requirements imposed on polar dielectric laser dye solvents", *Physica B.* **279**, pp295-301 (2000).
- [23] B.E.deCominges, M. M. Piñeiro, L. Mosteiro, E. Mascato, M.M.Mato, T. P. Iglesias and J. L. Legido, "Temperature dependence of thermophysical properties of octane+1-Butanol", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. **70**, pp217–227 (2002).
- [24] G. Ritzoulis, D. Missopolinou, S. Doulami, and C. Panayiotou, "Relative Permittivities, Densities, Refractive Indices and Ultrasound Velocities of the Binary Systems of γ -Butyrolactone with Methanol, Ethanol, 1-Butanol, and 1-Octanol", *J. Chem. Eng. Data* **45**, pp636-641 (2000).
- [25] A. Rodriguez, J. Canosa, and J. Tojo, Density, "Refractive Index, and Speed of Sound of Binary Mixtures (Diethyl Carbonate+ Alcohols) at Several Temperatures", *J. Chem. Eng. Data* **46**, pp1506-1515 (2001).
- [26] R.N. O'Brien, D. Quon, "Refractive Index of Some Alcohols and Saturated Hydrocarbons at 6328 Å.", *J. Chem. Eng. Data*, **13** (4), pp517–517 (1968).

- [27] J.P. Hawranek, N. Michniewicz, W. Wrzeszcz, M. Pajdowska, "Infrared dispersion of liquid 1-propanol", *Journal of Non-Crystalline Solids*, **353**, pp4555–4559 (2007).
- [28] Gal Openhaim, Eli Grushka, "Temperature-dependent refractive index issues using a UV–visible detector in high-performance liquid chromatography", **942**, pp63–71 *Journal of Chromatography A* (2001).
- [29] Ida Z. Kozma, Patrizia Krok, and Eberhard Riedle, "Direct measurement of the group-velocity mismatch and derivation of the refractive-index dispersion for a variety of solvents in the ultraviolet", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. **22**, No. 7, pp1479–1485 (2005).
- [30] Wanghua Xiang, Bing Zhang, "Coincidence spherical surface F-P interferometer measure the refractive index and density of liquid experimental study", *Academic Journal of Tianjin University*, vol. 40, no. 1, pp83-87, (2007).
- [31] J. R. Krivacic and D. W. Urry, "Ultraviolet and Visible Refractive Indices of Spectro-Quality Solvents", *Analytical Chemistry*, Vol. **42**, No. 6, pp596-599 (May 1970).
- [32] Farid I. El-Dossoki, "Refractive Index and Density Measurements for Selected Binary Protic-Protic, Aprotic-Aprotic, and Aprotic-Protic Systems at Temperatures from 298.15K to 308.15K", *Journal of the Chinese Chemical Society* **54**, pp1129-1137 (2007).
- [33] R. M. keda, R. Kepner, and A. D. Webb, "Densities, Refractive Indices, and Rotations of Mixtures of Active Amyl and Isoamyl Alcohols", *Analytical Chemistry*, Vol **28**, No. 8, pp1335- 1336 (August 1956).
- [34] S.Wood, S. Langer, and R. Battino, "Refractive Index and Dispersion of the Benzene-Methanol System", *The journal of chemical physics*, Vol. **32**, No. 5, pp1389-1393 (May 1960).

[35] A. Samoc, "Dispersion of refractive properties of solvents: Chloroform, toluene, benzene, and carbon disulfide in ultraviolet, visible, and near-infrared", *Journal of applied physics*, Vol. **94**, No. 9, pp6167-6174 (1 November 2003).

[36] Hassan El-Kashef, "Study of the refractive properties of laser dye solvents: toluene, carbon disulphide, chloroform, and benzene", *Optical Materials* **20**, pp81–86 (2002).

[37] P. Perez, T. E. Block, and C. M. Knobler, "Refractive Index and Dielectric Constant of Mixtures of Carbon Tetrachloride with Benzene, p-Xylene, and Mesitylene", *Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol. **16**, No. 3, pp333-335 (1971).

[38] S. Kedenburg, M. Vieweg, T. Gissibl, and H. Giessen, "Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near infrared spectral region", *Optical Materials Express* Vol. **2**, No. 11, pp1588-1611 (1 November 2012).

[39] S. Ghosal, J. L. Ebert, S. A. Self, "The infrared refractive indices of CHBr_3 , CCl_4 and CS_2 ", *Infrared Physics*, Vol. **34**, Issue 6, pp621–628 (December 1993).

[40] M. Nath Roy, R. Shyam Sah, P. Pradhan, "Densities, Viscosities, Sound Speeds, Refractive Indices, and Excess Properties of Binary Mixtures of Isoamyl Alcohol with Some Alkoxyethanols", *International Journal of Thermophysics* **31**, pp316–326 (2010).

[41] S. Chen, Q. Lei, and W. Fang, "Density and Refractive Index at 298.15 K and Vapor–Liquid Equilibria at 101.3 kPa for Four Binary Systems of Methanol, n-Propanol, n-Butanol, or Isobutanol with N-Methylpiperazine", *J. Chem. Eng. Data* **47** (4), pp811–815 (2002).

[42] M. Niggemann, A. Katerkamp, "Intrinsic fiber optical gas sensor based on surface Plasmon resonance spectroscopy", *SPIE*, pp303-311, (1995).

[43] Guoguang Mu, Yuanling Zhan, Optics, Beijing: People Education Press, (1978).

[44] Hong-Wei Chen, Chuen-Lin Tien, Wen Fung Liu, "The Measurement of Liquid Refractive Index by D-shaped Fiber Bragg Grating", 2007 IEEE/LEOS International Conference, Aug.12, pp119-120, (2007).

[45] P. Devi, V. V. Lozovoy, and M. Dantus, "Measurement of group velocity dispersion of solvents using 2-cycle femtosecond pulses: Experiment and theory," AIP Advances 1, 032166 (2011).

[46] T. D Scarborough, C. Petersen and C. J. G. J. Uiterwaal, "Measurements of the GVD of water and methanol and laser pulse characterization using direct imaging methods," New J. Phys. 10, 103011 (2008).

[47] E. Stoubou, "A comparative study and optimization of empirical equations of chromatic dispersion in crystal materials", (2012).