

Οι Αισθητήρες Γενικά

Οι αισθητήρες βασίζονται σε μετατροπή των δεδομένων του υπό εξέταση φυσικού μεγέθους σε ένα ηλεκτρικό, ηλεκτρονικό ή οπτοηλεκτρονικό σήμα.

Ετσι, μπορούμε να πούμε πως οι αισθητήρες διακρίνονται σε ηλεκτρονικούς ή οπτοηλεκτρονικούς. Στους ηλεκτρονικούς, είναι βολικό η ένδειξη του φυσικού μεγέθους υπό εξέταση να παρέχεται σε ψηφιακή ένδειξη.

Για τους ως άνω δύο λόγους,, θα εστιάσουμε την προσοχή μας σε αυτά τα δύο είδη αισθητήρων.

Όσον αφορά τους οπτοηλεκτρονικούς αισθητήρες, αυτοί συχνά λειτουργούν με βάση το γνωστό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο αναπτύσσουμε αναλυτικότερα παρακάτω. Ο τρόπος που λειτουργεί, με βάση το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ο αισθητήρας είναι ο ακόλουθος: Κάθε φωτοηλεκτρόνιο μπορεί να συμματάσχει σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα που οδεύει από την κάθοδο προς την άνοδο. Το ρεύμα μπορεί να μετρηθεί με αξιοπιστία υπό την προϋπόθεση ότι ο θόρυβος είναι πολύ μικρότερος και υπό την πρόσθετη προϋπόθεση ότι το ρεύμα μπορεί να ψηφιοποιηθεί ή να μετατραπεί μέσω ενός μετατροπέα *ρεύμα→τάση* και στη συνέχεια να ψηφιοποιηθεί. Για να δώσει ο ψηφιοποιητής το αποτέλεσμα μίας μέτρησης ενός αναλογικού μεγέθους, πρέπει αυτό να είναι μεγαλύτερο από το λεγόμενο least significant bit. Σε περίπτωση ασθενών σημάτων είναι απαραίτητο να προηγηθεί ενίσχυση του σήματος ώστε το προκύπτον ενισχυμένο αναλογικό σήμα να ταιριάζει με την δυναμική περιοχή του αναλογικοψηφιακού μετατροπέα (Analog to Digital Converter ή ADC). Μία δυνατότητα ενίσχυσης του σήματος προκύπτει με την χρησιμοποίηση του λεγόμενου *φωτοπολλαπλασιαστή ή του υβριδικού φωτοπολλαπλασιαστή* που θα μας απασχολήσουν πιο κάτω. Ας δούμε λοιπόν τα θέματα που αφορούν τους οπτικούς ή οπτοηλεκτρονικούς αισθητήρες. Πριν ξεκινήσουμε αυτό το εδάφιο, δίνουμε ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία για Τα ADCs: Ένα ADC μπορεί να έχει 12 ή 16 bits και έτσι, στην δεύτερη περίπτωση, η μέγιστη αναμενόμενη ένδειξη θα είναι 2^{16} .

Οπτοηλεκτρονικοί αισθητήρες

Διακρίνουμε τους εξής:

Φωτοδίοδοι, φωτοτρανζίστορ, φωτοκύτταρα, φωτοπολλαπλασιαστές, υβριδικοί Φωτοπολλαπλασιαστές , Charged Coupled Devices , φωτοδίοδοι χιονοστοιβάδας; (avalanche photodiodes) ,κ.α. Σε αυτούς υπάρχει μία ακόμα κατηγοριοποίηση με βάση τη δυνατότητα των να έχουν χωρική ευαισθησία. Στην καταφατική περίπτωση έχουμε μονοδιάστατη ή διδιάστατη συστοιχία οπτικών αισθητήρων, έκαστος των οποίων είναι γνωστός ως *εικονοκύτταρο* ή *εικονοκυψέλη* (pixel).

Οπτικοί μικρο-νανο αισθητήρες- Διάλεξη 1 (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

Εισαγωγή στη Φυση του φωτός ως αντικείμενο μέτρησης με οπτικούς αισθητήρες

Φυση του Φωτος -Συχνότητα του φωτος

Εξήγηση του Νόμου Μάξγουελ που περιέχει το ρεύμα μετατόπισης

- Κλασική άποψη της ακτινοβολίας

Άποψη της ακτινοβολίας από τη σκοπιά της Κβαντικής Οπτικής . Αντίστοιχη σχέση αβεβαιότητας για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Καταστάσεις H/M πεδίου με πολύ μικρή αβεβαιότητα ως προς τη φάση (συμπιεσμένη κατάσταση..Squeezed state)

Λειτουργία Laser όσον αφορά τους επιτρεπόμενους διαμήκεις τρόπους ταλάντωσης.

Στατιστική φωτονίων που εξέρχονται από ένα λέιζερ και η δέσμη ελαττώνεται με κατάλληλο φίλτρο. Στατιστική Poisson, και αποκλίσεις από αυτήν. Έννοια του Photon bunching.

(«Φωτονική»)

Άθρωπος που πρώτος επενοήσε την έννοια της κβαντώσεως και κατά συνέπεια οδήγησε στην έννοια των φωτονίων ήταν ο Μαξ Πλανκ:



THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 1918



Max Planck
(23 April 1858-4 October 1947)
Prize share: 1/1

*"in recognition of the services he rendered to
the advancement of Physics by his discovery of
energy quanta".*

Figure 1.

Ωστόσο, και άλλοι συνεβάλαν σε αυτή την προοδο όπως Einstein , ο οποίος εξήγησε το Φωτοηλεκτρικό φαινομενο, Hertz (ιδετε Figure 2) κ.α.

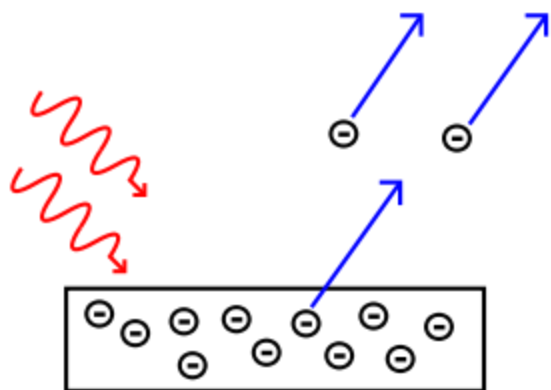


Figure 2: Simplified picture of the photoelectron effect. Image used with permission from Wikipedia. (Ανακαλυφθηκε από τον Heinrich Hertz). Λεπτομέρειες στην αναφορά [1].

Από την αναφορά [1] βλέπουμε την λεπτομερή πειραματική μελέτη του θαθητη του Hertz, Lennard :

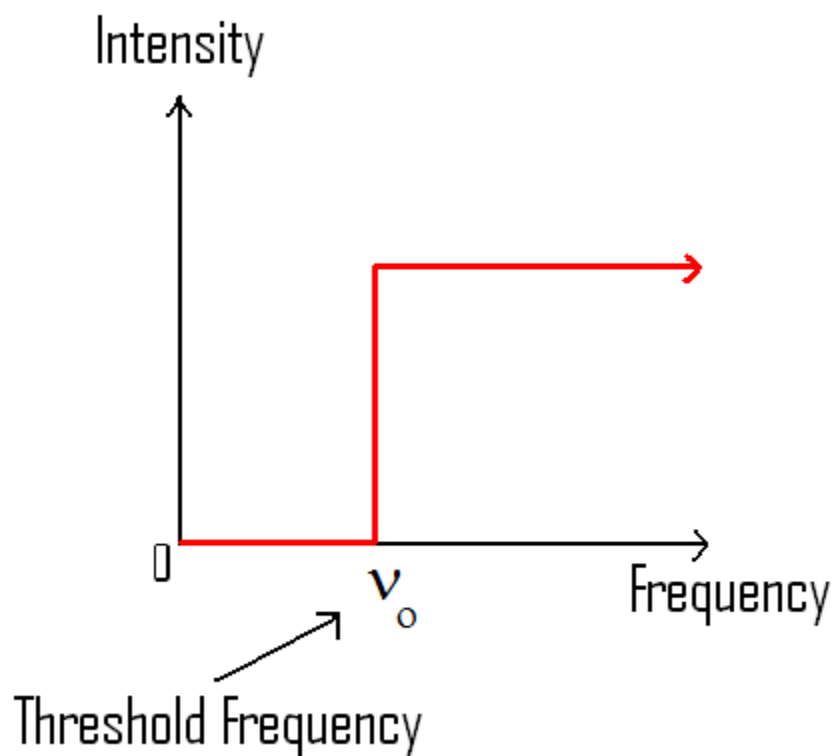


Figure 3.

Ότι δηλαδή, για δεδομένο υλικό της καθόδου, υπήρχε ένα κατωφλι συχνότητας, ν_0 ανω του οποίου το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να συμβεί. Με άλλα λόγια, για συχνότητες μικρότερες, δεν παρατηρείται.

Λεπτομέρεις της πειραματικής του διάταξης φαίνονται στο Σχήμα (Figure 4)

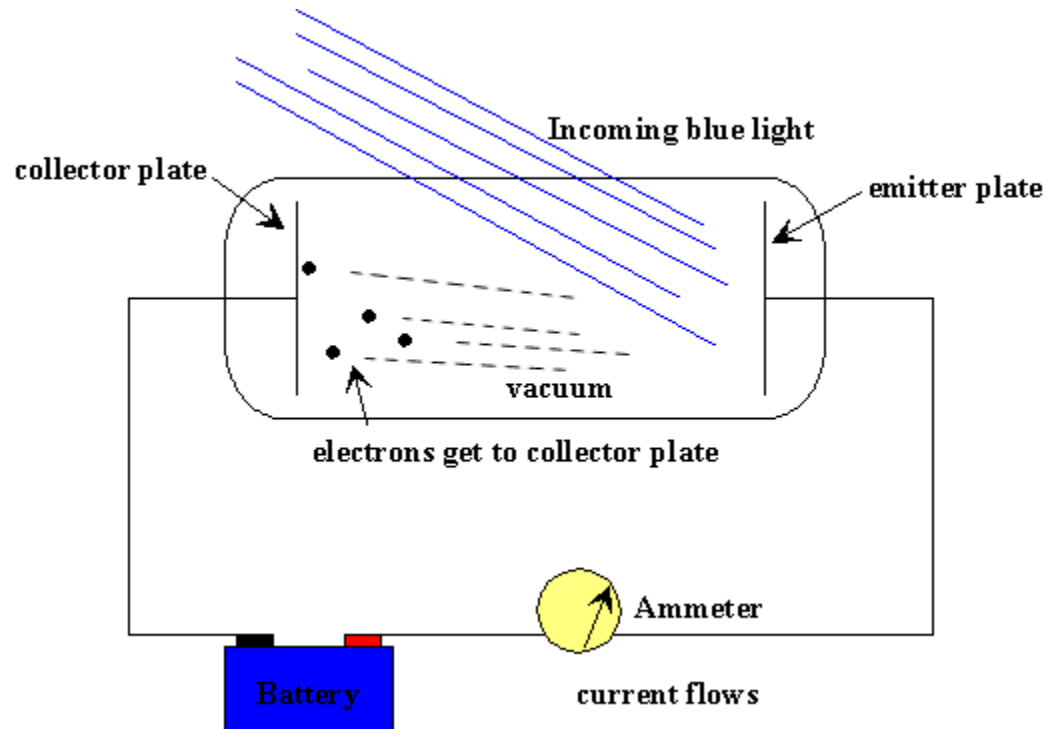


Figure 4. Lenard's photoelectric experiment with high-energy blue light. The battery represents the potential Lenard used to charge the collector plate negatively, which would actually be a variable voltage source. Since the electrons ejected by the blue light are getting to the collector plate, the potential supplied by the battery is less than V_{stop} , for blue light.

Το φαινόμενο **κατωφλίου** φαίνεται στο Σχήμα (Figure 5) με ερυθρό φως

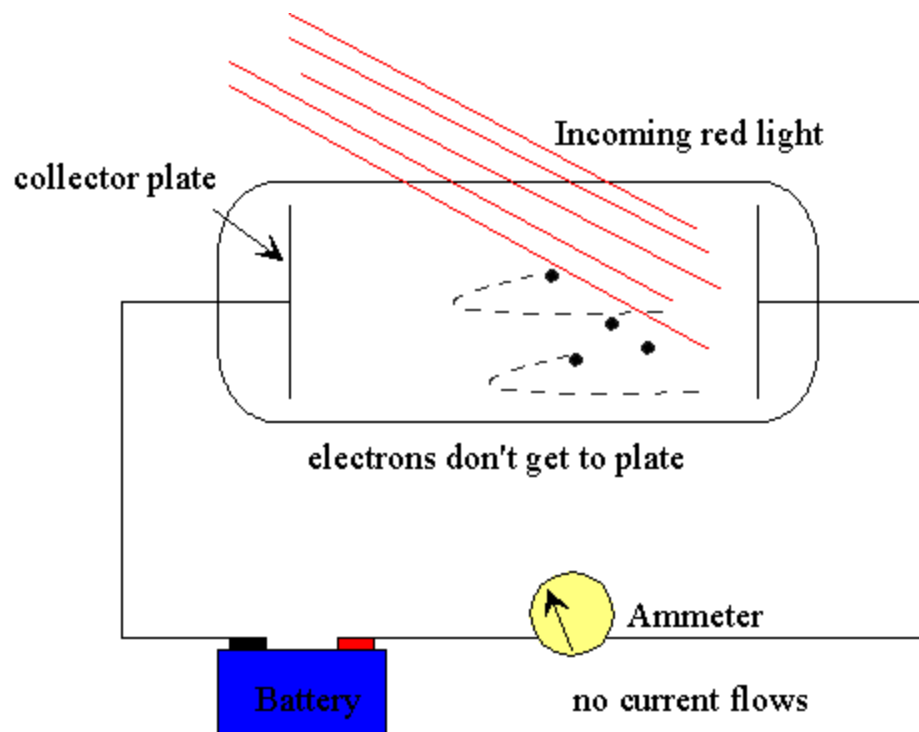


Figure 5. Lenard's photoelectric experiment with low-energy red light. Since the electrons ejected by the blue light are not getting to the collector plate, the potential supplied by the battery exceeds V_{stop} for red light.

Ορισμένα σχολία και επιφυλάξεις φαίνονται παρακάτω στην Αγγλική γλώσσα:

"This was, however, a fairly qualitative conclusion --- the energy measurements were not very reproducible, because they were extremely sensitive to the condition of the surface, in particular its state of partial oxidation. In the best vacuum available at that time, significant oxidation of a fresh surface took place in tens of minutes. The details of the surface are crucial because the fastest electrons emitted are those from right at the surface, and their binding to the solid depends strongly on the nature of the surface --- is it pure metal or a mixture of metal and oxygen atoms?"

Οπτικοί αισθητήρες – Μετρούν φως όπως και άλλα φυσικά μεγέθη (απόσταση, συχνότητα, ταχύτητα, μάζα κλπ)

Η ανίχνευση φωτός, έχει βάση το γνωστό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο

αναπτύσσουμε αναλυτικότερα παρακάτω. Ο τρόπος που λειτουργεί, με βάση το φωτοηλεκτρικό

φαινόμενο, ο αισθητήρας είναι ο ακόλουθος: Κάθε φωτοηλεκτρόνιο μπορεί να

συμμετάσχει σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα που οδεύει από την κάθοδο προς την

άνοδο. Το ρεύμα μπορεί να μετρηθεί με αξιοπιστία υπό την προϋπόθεση ότι ο θόρυβος είναι πολύ μικρότερος και υπό την πρόσθετη προϋπόθεση ότι το ρεύμα μπορεί να ψηφιοποιηθεί ή να μετατραπεί μέσω ενός μετατροπέα *ρεύμα→τάση* και στη συνέχεια να ψηφιοποιηθεί. Για να δώσει ο ψηφιοποιητής το αποτέλεσμα μίας μέτρησης ενός αναλογικού μεγέθους, πρέπει αυτό να είναι μεγαλύτερο από το λεγόμενο least significant bit. Σε περίπτωση ασθενών σημάτων είναι απαραίτητο να προηγηθεί ενίσχυση του σήματος ώστε το προκύπτον ενισχυμένο αναλογικό σήμα να ταιριάζει με την δυναμική περιοχή του αναλογικοψηφιακού μετατροπέα (Analog to Digital Converter ή ADC). Μία δυνατότητα ενίσχυσης του σήματος προκύπτει με την χρησιμοποίηση του λεγόμενου *φωτοπολλαπλασιαστή ή του υβριδικού φωτοπολλαπλασιαστή* που θα μας απασχολήσουν πιο κάτω. Ας δούμε λοιπόν τα θέματα που αφορούν τους οπτικούς ή οπτοηλεκτρονικούς αισθητήρες. Πριν ξεκινήσουμε αυτό το εδάφιο, δίνουμε ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία για Τα ADCs: Ένα ADC μπορεί να έχει 12 ή 16 bits και έτσι, στην δεύτερη περίπτωση, η μέγιστη αναμενόμενη ένδειξη θα είναι 2^{16} .

Εφαρμογές νανοαισθητήρων:

Με την βοήθεια νανοαισθητήρων μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την ποιότητα

Οπτικών φραγμάτων (ίδτετε αρχείο FabricationHighResolutionGrating.pdf).

*The profiles of the grating were measured by an **atomic force microscope (AFM)** using a high aspect ratio silicon based tip (AR5T made by NANOSENSORS, Switzerland). The tip is designed with a tip radius less than 15 nm and a tip half cone angle smaller than 2.8° .*

- Γιατί είναι χρήσιμο να φτάσουμε στη νανοτεχνολογία και νανοαισθητήρες;
- Ποιος είναι ο δρόμος προς τους νανοαισθητήρες ;
- Περίθλαση Κοντινού και Μακρινού Πεδίου
- Συμβολόμετρο Φάμπρυ-Περό
- Εξίσωση Helmholtz για κοντινό πεδίο
- Θεωρήσεις κβαντικής ηλεκτροδυναμικής
- δι-φωτονική απεικόνιση
- CCD Sensors

<http://www.neuro.gatech.edu/groups/potter/papers/tpabto.pdf>

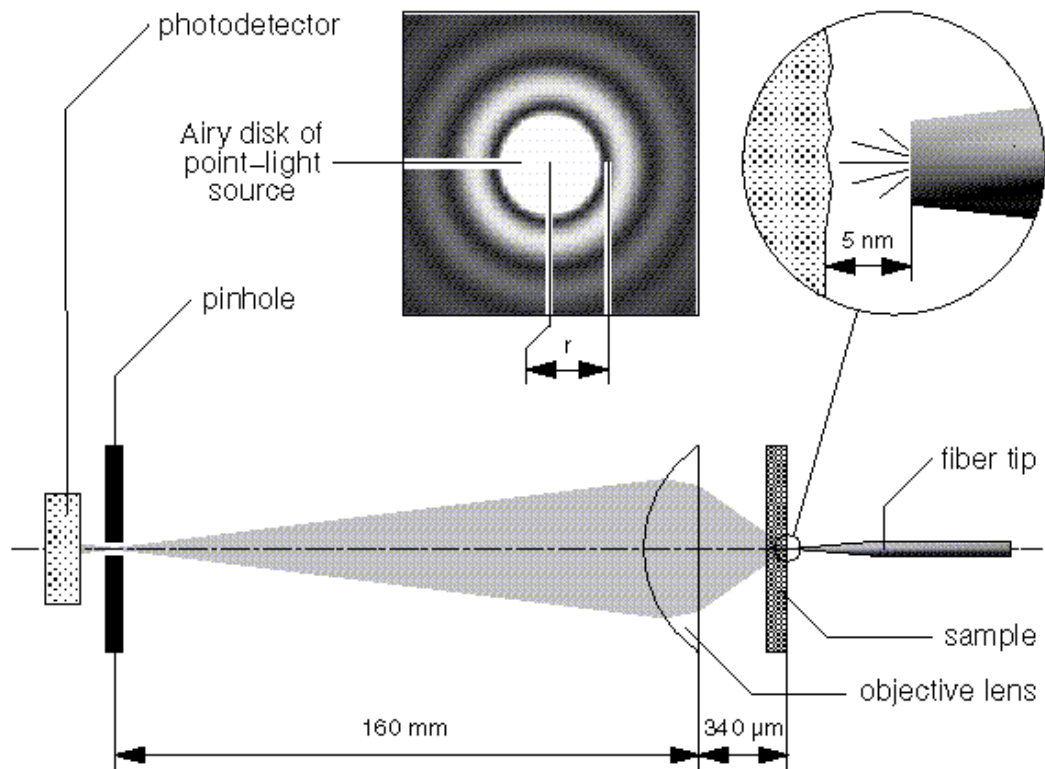
Πως κατασκευάζονται οι Μικροαισθητήρες και Νάνοαισθητήρες;

Εναλλακτικά προς το Atomic Force microscope μπορεί να χρησιμοποιηθεί το SNOM

Rev. Sci. Instrum. 66(6), 3569-3575 (1995), G. Tarrach et al.

Design and construction of a versatile scanning near-field optical microscope for fluorescence imaging of single molecules, G. Tarrach, M.

<http://monet.physik.unibas.ch/~tarrach/rsi95/rsi95.html>



SNOM – Magneto-optical characterization:

Χρήση Οπτικών αισθητήρων για μέτρηση άλλων μεγεθών

Παραδείγματα έχουμε από αισθητήρες που επιτρέπουν την μέτρηση μεγάλων μαγνητικών σε άτομα (βασισμένων σε φαινόμενο Zeeman) και ηλεκτρικών πεδίων (βασισμένων στο φαινόμενο Stark), (αναφορές [2], [3])

Κλιμακωτοί Φασματικοί αισθητήρες:

Αυτοί βασίζονται κυρίως σε οπτικά φράγματα. Αυτά επιτρέπουν την καταγραφή ενός μέρους μόνο του ορατού φάσματος ενώ συχνά απαιτείται σε εφαρμογές η δυνατότητα καταγραφής ευρύτερης

φασματικής περιοχής, π.χ. από 200 nm ως 1000 nm, και ταυτοχρόνως με υψηλή διακριτική ικανότητα της τάξης του $1 \text{ \AA}$. Αυτή η ανάγκη ικανοποιείται με τα λεγόμενα *κλιμακωτά φράγματα* (echelle gratings). Ως γνωστόν, η διακριτική ικανότητα ενός οπτικού φράγματος δίνεται από την έκφραση:

$$\lambda/\Delta\lambda = m N,$$

Χρήση dSLR φωτογραφικής μηχανής για καταγραφή φασμάτων

Η μεγάλη χωρική διακριτική ικανότητα μιάς **dSLR** μας επιτρέπει να καταγράψουμε με ακρίβεια και ταχύτητα οπτικά φάσματα. Ο τρόπος λειτουργίας είναι, με λίγες γραμμές, ο εξής: Το προς ανάλυση φως εισέρχεται σε ένα κλειστό θάλαμο που περιέχει ένα κοίλο οπτικό φράγμα.

Το φάσμα αναλύεται και απεικονίζεται στην φωτογραφική μηχανή, με μία *παράμετρο πλακός* (γραμμική μεταβολή (Δx) ανά μεταβολή μήκους κύματος ($\Delta\lambda$)), $\Delta x/\Delta\lambda$ της τάξης των $32 \text{ }\mu\text{m}/\text{\AA}$. . Αν τώρα, έκαστο εικονοκύτταρο έχει γραμμική διάσταση περίπου $5 \text{ }\mu\text{m}$, παρατηρούμε πως φασματικές δομές εύρους $1 \text{ \AA}$ αναλύονται πολύ εύκολα .

2.1.1 Γωνιακή και γραμμική διασπορά

Κάθε τύπος μέσου διασποράς χαρακτηρίζεται από τη γωνιακή διασπορά A , που ορίζεται ως $\frac{d\beta}{d\lambda}$, όπου $d\beta$ είναι η γωνιακή διαφορά μεταξύ δύο ακτίνων με διαφορά μήκους κύματος $d\lambda$ που βγαίνουν ή ανακλώνται από το μέσο. Η γωνιακή διασπορά σχετίζεται μόνο με το μέσο διασποράς και είναι ανεξάρτητη από το είδος της διάταξης στην οποία θα χρησιμοποιηθεί αυτό. Όταν το μέσο διασποράς αποτελεί μέρος ενός οπτικού συστήματος, τα χαρακτηριστικά και των δύο συνδυάζονται, για να καθορίσουν τη γραμμική διασπορά του συστήματος, $\frac{dl}{d\lambda}$, όπου dl είναι η απόσταση στο εστιακό επίπεδο ανάμεσα σε δύο ακτίνες με διαφορά μήκους κύματος $d\lambda$. Αν η προσπίπτουσα δέσμη στο μέσο διασποράς είναι παράλληλη, τότε η γραμμική διασπορά δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dl}{d\lambda} = f_2 \frac{d\beta}{d\lambda} = f_2 A, \quad (2.1)$$

όπου f_2 είναι η εστιακή απόσταση των οπτικών που χρησιμοποιούνται, για να

όπου f_2 είναι η εστιακή απόσταση των οπτικών που χρησιμοποιούνται, για να συγκεντρώσουν την περιθλώμενη δέσμη στον ανιχνευτή.

2.1.2 Παράγοντας πλακός ή αντίστροφη γραμμική διασπορά

Ο παράγοντας πλακός (Plate factor) ή αντίστροφη γραμμική διασπορά (Reciprocal linear dispersion) αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός φασματομέτρου, συμβολίζεται με P και ορίζεται από τη σχέση:

$$P = \frac{1}{f_2 A}. \quad (2.2)$$

Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι Å/mm ή nm/mm.

2.1.3 Όριο διακριτικής ικανότητας και φασματική αναλυτική ισχύς

Αν θεωρήσουμε ένα φασματόμετρο με σχισμή εισόδου w που φωτίζεται από φωτόνια με δύο διαφορετικά μήκη κύματος λ και $\lambda + \delta\lambda$, τότε η εικόνα της σχισμής για κάθε μήκος κύματος θα έχει πλάτος w' και από την εξίσωση (2.1) η απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των δύο εικόνων θα είναι

$$\Delta l = f_2 A \Delta\lambda. \quad (2.3)$$

Ορίζουμε το όριο της διακριτικής ικανότητας $\delta\lambda$ ως τη διαφορά μήκους κύματος για την οποία $\Delta l = w'$, δηλαδή τέτοιο, ώστε οι απεικονίσεις της σχισμής στον ανιχνευτή για κάθε μήκος κύματος να είναι οριακά διακριτές σύμφωνα με το κριτήριο του Nyquist¹ [24]. Από τις εξισώσεις (2.1), (2.2) και (2.3) προκύπτει ότι

$$\delta\lambda = \frac{d\lambda}{dl}(\Delta l) = Pw' \quad (2.4)$$

Η φασματική αναλυτική ισχύς (spectral resolving power) R είναι αδιάστατο

Η φασματική αναλυτική ισχύς (spectral resolving power) R είναι αδιάστατο μέγεθος και μετρά το όριο της διακριτικής ικανότητας που μπορεί να πετύχει ένα δοσμένο φασματόμετρο. Ορίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}. \quad (2.5)$$

Με βάση την εξίσωση φράγματος ανάκλασης,

$$d(\sin\alpha + \sin\beta) = m\lambda$$

η γωνιακή διασπορά γράφεται

$$A = d\beta/d\lambda = m/(d \cos\beta) = mN/\cos\beta$$

όπου N η γραμμική πυκνότητα χαραγών

$$A = \frac{\sin \beta + \sin \alpha}{\lambda \cos \beta}. \quad (2.11)$$

Από την εξίσωση (2.10) βλέπουμε ότι η γωνιακή διασπορά για δεδομένη τάξη m είναι συνάρτηση της γωνίας β και της πυκνότητας χαραγών N . Ενώ από την εξίσωση (2.11) γίνεται αντιληπτό, ότι για να μεταβληθεί η γωνιακή διασπορά, χρειάζεται να αλλάξει η γωνία περίθλασης ή/και να χρησιμοποιηθεί ένα άλλο φράγμα. Από την εξίσωση (2.11) για δεδομένο μήκος κύματος η γωνιακή διασπορά φαίνεται ότι εξαρτάται μόνο από τις γωνίες α και β ανεξάρτητα από το m και το N . Έτσι η επιθυμητή γωνιακή διασπορά μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς συνδυασμούς του m και του N , υπό την προϋπόθεση ότι οι γωνίες παραμένουν αμετάβλητες και το γινόμενο $m \cdot N$ σταθερό. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην κατασκευή φραγμάτων ειδικά σχεδιασμένων να επιτυγχάνουν μεγάλες γωνιακές διασπορές κάνοντας τις γωνίες α και β μεγάλες. Αυτά τα φράγματα καλούνται κλιμακωτά, ενώ τα τυπικά φράγματα πρώτης ή δεύτερης τάξης, για να ξεχωρίζουν, καλούνται συχνά *echellette*. Για τα κλιμακωτά φράγματα θα ειπωθούν περισσότερα στην επόμενη παράγραφο.

Η αναλυτική ισχύς στο όριο της διακριτικής ικανότητας ενός φράγματος

Η αναλυτική ισχύς στο όριο της διακριτικής ικανότητας ενός φράγματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_0 = mNW, \quad (2.12)$$

όπου W το ολικό πλάτος του φράγματος. Αντικαθιστώντας από την εξίσωση του φράγματος (2.9) προκύπτει και η παρακάτω σχέση για την αναλυτική ισχύ συναρτήσει των γωνιών α και β :

$$R_0 = \frac{W}{\lambda} (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (2.13)$$

Από αυτή τη σχέση βλέπουμε ότι το R είναι ανάλογο με το πλάτος του φράγματος για ένα δεδομένο ζεύγος γωνιών α, β . Επίσης, ο αριθμητής της σχέσης έχει και μία γεωμετρική ερμηνεία είναι η διαφορά δρόμου ανάμεσα στις δύο ακραίες ακτίνες της δέσμης που καλύπτει το πλάτος του φράγματος, και η αναλυτική ισχύς είναι ο αριθμός των μηκών κύματος που περιλαμβάνονται σε αυτή τη διαφορά.

[1]

[https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_\(McQuarrie_and_Simon\)/01%3A_The_Dawn_of_the_Quantum_Theory/1.3%3A_Photoelectric_Effect_Explained_with_Quantum_Hypothesis](https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_(McQuarrie_and_Simon)/01%3A_The_Dawn_of_the_Quantum_Theory/1.3%3A_Photoelectric_Effect_Explained_with_Quantum_Hypothesis)

[2] Atoms in a magnetic field

<https://www.st-andrews.ac.uk/~dc43/PH4021/Lectures%2014-17%20EXTERNAL%20MAGNETIC%20FIELDS.pdf>

[3] All-Optical Sensing of the Components of the Internal Local Electric Field in Proteins M. Drobizhev, IEEE Photonics J. 2012 October ; 4(5): 1996–2001