

Φασματοσκοπία φθορισμού χρονικής ανάλυσης με την τεχνική **Time Correlated Single Photon Counting**

1. Σύνοψη-σκοπός του πειράματος

Με τις τεχνικές φασματοσκοπίας χρονικής ανάλυσης είναι δυνατή η εύρεση του χρόνου ζωής των διεγερμένων καταστάσεων των υπό μελέτη δειγμάτων. Στο πείραμα, ο φοιτητής θα έρθει σε επαφή με τις έννοιες του φθορισμού και του χρόνου ζωής καθώς και της τεχνικής φασματοσκοπίας **Time Correlated Single Photon Counting** η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του χρόνου ζωής δειγμάτων που εκπέμπουν στο ορατό με χρονική ανάλυση ~ 50ps. Στο πείραμα θα γίνει πειραματική μελέτη χαρακτηριστικών υλικών και επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, θα γίνει μελέτη της χρωστικής κουμαρίνης 30 σε διάφορους διαλύτες με διαφορετικό ιξώδες και πολικότητα.

2. Πειραματική διάταξη

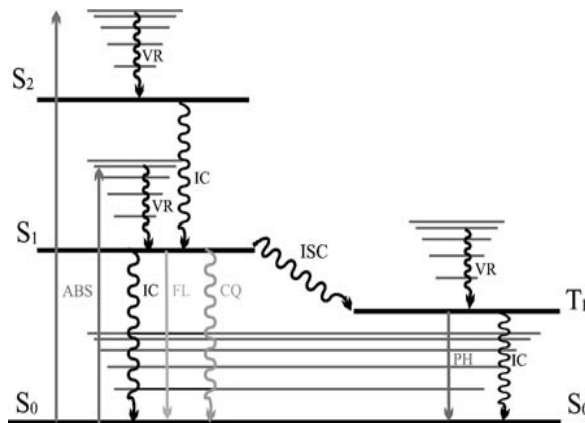
Η πειραματική διάταξη αποτελείται από παλμικά διοδικά laser στα 400 και 470 nm, σύστημα τοποθέτησης υγρών και στερεών δειγμάτων, μονοχρωμάτορα, φωτοπολλαπλασιαστή, ηλεκτρονικά αυτοματισμού και καταμέτρησης φωτονίων, φίλτρα, φακούς, κάτοπτρα και πολωτές.

3. Εισαγωγή

Η φασματοσκοπία φθορισμού αποτελεί ένα σημαντικό επιστημονικό εργαλείο στη Φυσική, στη Χημεία, στη Βιολογία και στην Επιστήμη των Υλικών. Ο φθορισμός ενός μορίου είναι η αυθόρμητη εκπομπή φωτός λόγω μεταβάσεων από μία διεγερμένη απλή ηλεκτρονιακή στάθμη (συνήθως την S_1) σε μια δονητική κατάσταση της θεμελιώδους ηλεκτρονιακής στάθμης, δηλαδή μεταβάσεις της μορφής $S_{1,0} \rightarrow S_{0,v}$. Σπουδαιότερες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τον φθορισμό είναι η ένταση σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, $I(\lambda)$, το φάσμα εκπομπής (δηλαδή η εξάρτηση της έντασης εκπομπής από το μήκος κύματος εκπομπής), η κβαντική απόδοση, Φ (quantum yield), ο χρόνος ζωής (τ) και η πόλωση (P). Αυτές οι παράμετροι μπορούν να ελεγχθούν με τις μεθόδους φασματοσκοπίας φθορισμού σταθερής κατάστασης (steady-state) ή χρονικής ανάλυσης (time-resolved). Έτσι, εξάγονται

πληροφορίες όσον αφορά τις φωτοφυσικές ιδιότητες του φθορίζοντος μορίου καθώς και τη φυσική και χημική κατάστασή του μικρόκοσμού του.

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί αποδιέγερσης που ακολουθούν τη διέγερση ενός μορίου σε μία υψηλότερη ηλεκτρονιακή κατάσταση (π.χ. με απορρόφηση ενός φωτονίου), μέσω ενός διαγράμματος Jablonski.



ΣΧΗΜΑ 1: Το διάγραμμα Jablonski απεικονίζει τη διέγερση σε μια απλή ηλεκτρονιακή (singlet) κατάσταση και την αποδιέγερση απ' αυτή, συμπεριλαμβανομένου των μηχανισμών της απορρόφησης (ABS), φθορισμού (FL), φωσφορισμού (PH), εσωτερικής μετατροπής (IC), σταθμικής διασταύρωσης (ISC), δονητικής αποδιέγερσης (VR) και απόσβεσης (quenching) λόγω κρούσεων (CQ). Δεν περιλαμβάνονται διαδικασίες αποδιέγερσης λόγω αλληλεπίδρασης με μόρια διαλύτη, μεταφοράς

ενέργειας (energy transfer) και φωτοχημικών αντιδράσεων.

4. Χρονος ζωής και κβαντική αποδοχή του φθορισμού

Ο χρόνος ζωής και η κβαντική απόδοση του φθορισμού είναι ίσως τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός φθορίζοντος μορίου. Η κβαντική απόδοση έχει σχέση με τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται σε σχέση με τον αριθμό των φωτονίων που απορροφώνται και συγκεκριμένα είναι ο λόγος του αριθμού των φωτονίων που εκπέμπονται προς τον αριθμό των φωτονίων που απορροφώνται. Μοριακές ενώσεις με τις μεγαλύτερες κβαντικές αποδόσεις, των οποίων οι τιμές προσεγγίζουν την μονάδα, όπως η ροδαμίνη (rhodamine), εμφανίζουν πιο ισχυρή εκπομπή. Ο χρόνος ζωής είναι επίσης σημαντικός, δεδομένου ότι καθορίζει το διαθέσιμο χρόνο του χρωμοφόρου για να αλληλεπιδράσει ή να διαχυθεί στο περιβάλλον του.

Η κβαντική απόδοση, δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{\Gamma}{\Gamma + k_{nr}} \quad (1)$$

Οι σταθερές Γ και k_{nr} εκφράζουν τους ρυθμούς με τους οποίους μειώνεται ο πληθυσμός από το διεγερμένο επίπεδο. Η Γ εκφράζει την αποδιέγερση λόγω φθορισμού και η k_{nr} την

αποδιέγερση λόγω του συνόλου των μη ακτινοβολητικών διαδικασιών αποδιέγερσης. Ο χρόνος ζωής της διεγερμένης κατάστασης, τ , καθορίζεται από το μέσο χρόνο που το μόριο βρίσκεται στο διεγερμένο επίπεδο πριν από την επιστροφή του στο θεμελιώδες. Δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{1}{\Gamma + k_{nr}} \quad (2)$$

Ο χρόνος ζωής του χρωμοφόρου απουσία μη ακτινοβολητικών διαδικασιών αποδιέγερσης καλείται ενδογενής ή φυσικός χρόνος ζωής, δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_n = \frac{1}{\Gamma} \quad (3)$$

και συνήθως είναι 1-10 ns. Ο φυσικός χρόνος ζωής μπορεί να υπολογιστεί από τον μέσο χρόνο ζωής (τ) και την κβαντική απόδοση

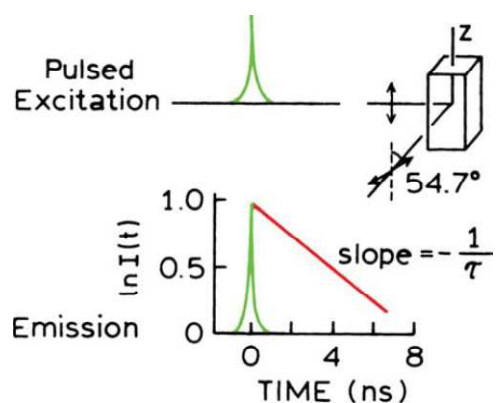
$$\tau_n = \frac{\tau}{Q} \quad (4)$$

5. Φθορισμός σταθερής κατάστασης και χρονικής ανάλυσης

Η μελέτη του φθορισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί, γενικά, με δύο μεθόδους: με φασματοσκοπία σταθερής κατάστασης και χρονικής ανάλυσης. Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της σταθερής κατάστασης, οι οποίες είναι οι πιο κοινές, εκτελούνται υπό συνθήκες σταθερού φωτός διέγερσης και συνεχούς παρακολούθησης. Το δείγμα φωτίζεται με μια συνεχή δέσμη φωτός, και καταγράφεται η ένταση ή το φάσμα εκπομπής.

Η δεύτερη μέθοδος μέτρησης του φθορισμού χρησιμοποιείται για την καταγραφή της αποδιέγερσης της διεγερμένης στάθμης ή της ανισοτροπίας. Γι' αυτές τις μετρήσεις το δείγμα ακτινοβολείται με παλμούς φωτός, χρονικής διάρκειας χαρακτηριστικά μικρότερης από το χρόνο αποδιέγερσής του. Η μείωση στην ένταση καταγράφεται με ένα σύστημα υψηλής χρονικής ανάλυσης, το οποίο επιτρέπει τη μέτρηση της έντασης ή της ανισοτροπίας στην χρονική κλίμακα των νανοδευτερολέπτων ή και λιγότερο. Η χρονική διάρκεια του παλμού είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή και κατά προτίμηση πολύ πιο μικρή από το χρόνο αποδιέγερσης του δείγματος. Η μέτρηση της μεταβαλλόμενης με το χρόνο έντασης

φθορισμού αρχίζει μετά τη διέγερση από τον παλμό, και ο χρόνος αποδιέγερσης ταυτίζεται με το αντίστροφο της κλίσης της γραφικής παράστασης του $\ln I(t)$ με το t , ή με το χρόνο στον οποίο η ένταση μειώνεται στο $1/e$ της έντασης στο $t=0$. Η μείωση της έντασης φθορισμού με το χρόνο συχνά μετριέται μέσω ενός πολωτή προσανατολισμένου στις 54.7° σε σχέση με το επίπεδο πόλωσης της δέσμης διέγερσης (άξονας z σχήμα 2). Αυτή η συνθήκη μέτρησης χρησιμοποιείται έτσι ώστε η μείωση της έντασης φθορισμού που καταγράφεται να είναι απαλλαγμένη από φαινόμενα περιστροφικής διάχυσης.



ΣΧΗΜΑ 2: Σχηματικό διάγραμμα διάταξης για τη μέτρηση του χρόνου ζωής.

6. Η έννοια της διάρκειας ζωής ή χρόνου αυτοδιέγερσης

Πριν από την περαιτέρω συζήτηση των μετρήσεων του χρόνου ζωής, είναι σημαντική η κατανόηση της σημασίας του. Ας υποθέσουμε ότι ένα χρωμοφόρο διεγείρεται με έναν απείρως στενό χρονικά παλμό φωτός (συνάρτηση δ). Αυτό οδηγεί σε έναν αρχικό πληθυσμό χρωμοφόρων (n_0) στο διεγερμένο επίπεδο. Ο πληθυσμός του διεγερμένου επιπέδου μειώνεται με ένα ρυθμό $\Gamma + k_{nr}$ σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -(\Gamma + k_{nr})n(t) \quad (5)$$

όπου το $n(t)$ είναι ο αριθμός των διεγερμένων μορίων σε χρόνο t μετά από τη διέγερση, Γ είναι ο ρυθμός ακτινοβολητικής αποδιέγερσης, και k_{nr} είναι ο ρυθμός μη ακτινοβολητικής αποδιέγερσης. Η εκπομπή είναι ένα τυχαίο γεγονός και κάθε διεγερμένο χρωμοφόρο έχει την ίδια πιθανότητα εκπομπής σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Αυτό οδηγεί σε μια εκθετική μείωση του πληθυσμού στο διεγερμένο επίπεδο, $n(t) = n_0 \exp(-t/\tau)$.

Σε ένα πείραμα φθορισμού όμως δεν παρατηρούμε τον αριθμό των διεγερμένων μορίων, αλλά την ένταση του φθορισμού, η οποία είναι ανάλογη του $n(t)$. Ως εκ τούτου, η προηγούμενη εξίσωση μπορεί επίσης, να γραφτεί με βάση τη χρονικά εξαρτώμενη ένταση φθορισμού $I(t)$. Με αντικατάσταση του αριθμού των μορίων με την ένταση φωτός δημιουργείται η συνηθισμένη έκφραση της μονοεκθετικής αποδιέγερσης:

$$I(t) = I_0 \exp(-t/\tau) \quad (6)$$

όπου I_0 είναι η ένταση για χρόνο $t=0$. Ο χρόνος ζωής τ είναι το αντίστροφο του συνολικού ρυθμού αποδιέγερσης, $\tau = (\Gamma + k_{nr})^{-1}$. Ο χρόνος ζωής του φθορισμού μπορεί να καθοριστεί από την κλίση της γραφικής παράστασης του $\log I(t)$ με το t , αλλά συνήθως βρίσκεται με την προσαρμογή στα δεδομένα πρότυπων συναρτήσεων αποδιέγερσης.

7. Ανισοτροπία φθορισμού

Όταν ένα διάλυμα το οποίο περιέχει φθοροφόρα μόρια ακτινοβολείται από γραμμικά πολωμένο παλμικό φως συγκεκριμένου μήκους κύματος, τότε μόρια αυτά έχουν κάποια πιθανότητα να διεγερθούν. Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται από τον προσανατολισμό της διπολικής ροπής απορρόφησης των μορίων. Η πιθανότητα είναι μέγιστη όταν η διπολική ροπή είναι παράλληλη στο επίπεδο πόλωσης του φωτός διέγερσης, ελάχιστη όταν είναι κάθετη, ενώ παίρνει ενδιάμεσες τιμές για τις ενδιάμεσες περιπτώσεις. Τα φθοροφόρα μόρια μπορούν να αποδιεγερθούν είτε ακτινοβολητικά με την εκπομπή φθορισμού είτε μη ακτινοβολητικά μέσω άλλων διεργασιών. Ο εκπεμπόμενος φθορισμός από τα μόρια αυτά είναι αρχικά επίσης γραμμικά πολωμένος, χαρακτηρίζεται από την διπολική ροπή μετάβασης και έχει τυχαίο προσανατολισμό αφού επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Ο βασικότερος από αυτούς είναι η περιστροφή του μορίου (rotational motion). Συνεπώς από την μελέτη της χρονικής εξέλιξης της αποδιέγερσης του φθορισμού των μορίων σε συγκεκριμένες πολώσεις, είναι δυνατόν να ληφθούν συμπεράσματα για την περιστροφή των μορίων μέσω ενός μεγέθους που ονομάζεται ανισοτροπία.

Η σχέση που ορίζει την χρονοεξαρτώμενη ανισοτροπία είναι:

$$r(t) = \frac{I_{\parallel}(t) - I_{\perp}(t)}{I_{is}(t)} = \frac{I_{\parallel}(t) - I_{\perp}(t)}{I_{\parallel}(t) + 2I_{\perp}(t)} \quad (7)$$

όπου $I_{\parallel}(t)$ και $I_{\perp}(t)$ είναι οι εντάσεις του εκπεμπόμενου φθορισμού στις παράλληλες και κάθετες διευθύνσεις συγκριτικά με την διεύθυνση πόλωσης του φωτός διέγερσης. Ο όρος $I_{is}(t)$ στην σχέση (7) είναι η χρονοεξαρτώμενη ένταση του εκπεμπόμενου φθορισμού η οποία είναι ανεξάρτητη από την περιστροφή των μορίων (ισοτροπική ένταση φθορισμού):

$$I_{is}(t) = I_{\parallel}(t) + 2I_{\perp}(t) \quad (8)$$

μέσω των σχέσεων (7) και (8) μπορούν να προσδιοριστούν:

$$I_{\parallel}(t) = \frac{I_{is}(t)}{3} [(1 + 2r(t))] \quad (9)$$

και

$$I_{\perp}(t) = \frac{I_{is}(t)}{3} [(1 - 2r(t))] \quad (10)$$

Για σφαιρικά ή σχεδόν σφαιρικά μόρια, η ανισοτροπία ακολουθεί συνήθως μια συνάρτηση εκθετικής μείωσης της μορφής:

$$r(t) = r_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{or}}\right) \quad (11)$$

όπου r_0 είναι η αρχική ανισοτροπία (για $t = 0$) και τ_{or} είναι ο χρόνος περιστροφής του μορίου ο οποίος συνδέεται με το ιξώδες του διαλύτη με τη σχέση (για σφαιρικά μόρια)

$$\tau_{or} = \frac{nV}{kT} \quad (12)$$

όπου n το ιξώδες, V ο όγκος του μορίου και T η θερμοκρασία.

Σε διαλύματα η αρχική ανισοτροπία r_0 προσδιορίζεται από την γωνία μεταξύ της διπολικής ροπής απορρόφησης και της διπολικής ροπής εκπομπής:

$$r_0 = \frac{1}{5}(3(\cos^2\alpha) - 1) \quad (13)$$

Όταν γωνία α είναι 0° η ανισοτροπία παίρνει την μέγιστη τιμή της $r_0 = 0.4$. Αυτό συχνά παρατηρείται όταν η μετάβαση απορρόφησης είναι η $S_0 \rightarrow S_1$ (singlet καταστάσεις) και η μετάβαση εκπομπής είναι η $S_1 \rightarrow S_0$. Ωστόσο, για γωνία $\alpha=54,7^\circ$ η ανισοτροπία είναι μηδέν. Η τιμή $\alpha=54,7^\circ$ ονομάζεται ενδογενής μαγική γωνία.

Η αποδιέγερση του φθορισμού του μορίου ανεξάρτητα από την περιστροφή του (δηλ. ο όρος $I_{is}(t)$ συχνά δίνεται από μία εκθετική συνάρτηση (εκθετική αποδιέγερση):

$$I_{is}(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fl}}\right) \quad (14)$$

(η σχέση 14 δεν είναι διαφορετική από τη σχέση 6, αλλά χρησιμοποιείται ο όρος I_{is} και τ_{fl} αντί για I και τ για να τους διακρίνουμε πιο ξεκάθαρα από τους αντίστοιχους όρους της ανισοτροπίας)

με αντικατάσταση των σχέσεων (14) και (11) στις σχέσεις (9) και (10) έχουμε:

$$I_{\parallel}(t) = \frac{I_0}{3} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_{fl}}\right) + 2r_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fl}} - \frac{t}{\tau_{or}}\right) \right] \quad (15)$$

$$I_{\perp}(t) = \frac{I_0}{3} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_{fl}}\right) - r_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fl}} - \frac{t}{\tau_{or}}\right) \right] \quad (16)$$

και οι δύο εντάσεις $I_{\parallel}(t)$, $I_{\perp}(t)$ παρουσιάζουν μια δι-εκθετική συνάρτηση του χρόνου. Οι εντάσεις αυτές παρέχουν πληροφορίες για τον χρόνο ζωής του μορίου (τ_{fl}), την αρχική ανισοτροπία (r_0) και τον χρόνο περιστροφής του (τ_{or}).

Τέλος, η ένταση του φθορισμού όταν αυτή ανιχνεύεται σε μια τυχαία γωνία γ ως προς το επίπεδο του πόλωσης του laser διέγερσης δίνεται:

$$I_{\gamma}(t) = \left((\cos^2\gamma)I_{\parallel}(t) + (\sin^2\gamma)I_{\perp}(t) \right) \quad (17)$$

με αντικατάσταση των σχέσεων (15) και (16) στην σχέση (17) έχουμε:

$$I_{\gamma}(t) = \frac{I_0}{3} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_{fl}}\right) + r_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fl}} - \frac{t}{\tau_{or}}\right) (3(\cos^2\gamma) - 1) \right] \quad (18)$$

Προφανώς, για γωνία $\gamma=54,7^\circ$ (μαγική γωνία) το $\cos^2\gamma = \frac{1}{3}$. Σε αυτήν την περίπτωση ο δεύτερος όρος της σχέσεως 11 (δηλ. αυτός που περιέχει τον περιστροφικό όρο) μηδενίζεται δίνοντας την δυνατότητα παρατήρησης μόνο της ισοτροπικής έντασης φθορισμού (πρώτος όρος).

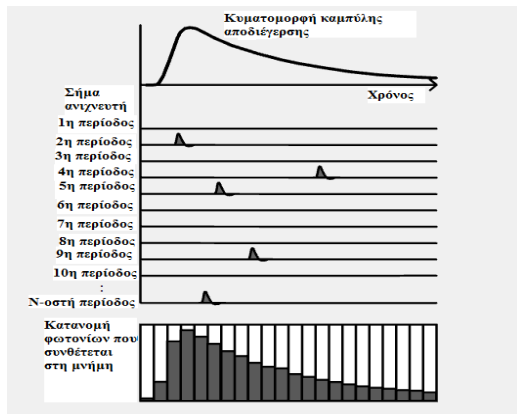
8. Η τεχνική Time Correlated Single Photon Counting (TCSPC)

Η τεχνική αυτή έχει γενικώς τα εξής χαρακτηριστικά:

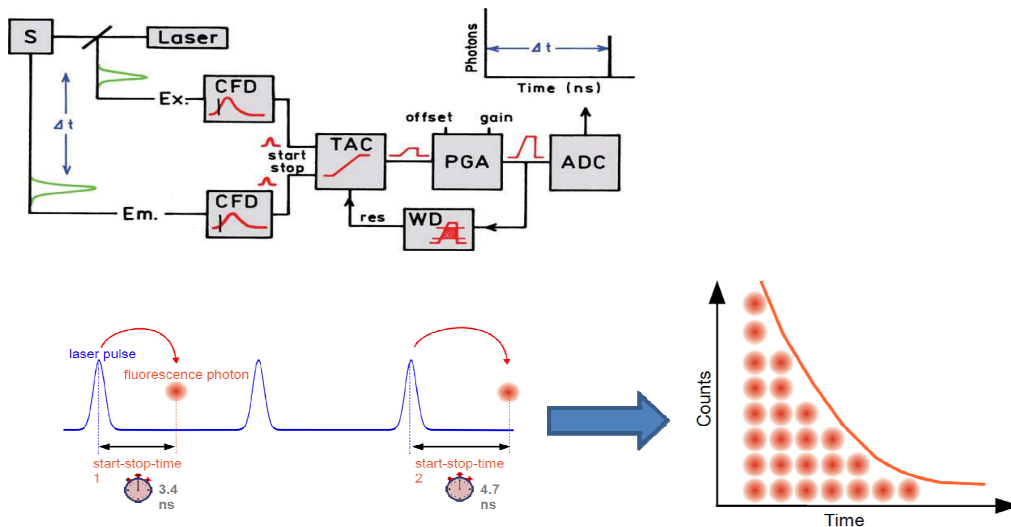
- Χρονική ανάλυση μέχρι ~ 10 ps.
- Απαιτεί διέγερση με υψηλής επαναληπτικότητας πηγή laser συνήθως λίγων δεκάδων ps.
- Στηρίζεται στο ότι ανά περίοδο μεταξύ δύο παλμών διέγερσης καταγράφεται το πολύ ένα φωτόνιο φθορισμού.
- Μεγάλη ευαισθησία, ικανή για μέτρηση δειγμάτων πολύ μικρής συγκέντρωσης σε χρωμοφόρα

Στην τεχνική αυτή το δείγμα διεγείρεται από έναν παλμό φωτός και αρχίζει να φθορίζει εκπέμποντας μεγάλο αριθμό φωτονίων. Οι συνθήκες του TCSPC είναι ρυθμισμένες έτσι ώστε να ανιχνεύεται το πολύ ένα φωτόνιο ανά παλμό διέγερσης. Στην πραγματικότητα ο ρυθμός καταγραφής είναι ένα φωτόνιο ανά 100 παλμούς διέγερσης. Η καταγραφή του συνολικού σήματος μπορεί να γίνει ανιχνεύοντας τα φωτόνια, μετρώντας το χρόνο της ανίχνευσης σε

σχέση με τη διέγερση και χτίζοντας ένα ιστόγραμμα στο οποίο κάθε φωτόνιο έχει δική του καθυστέρηση, σε σχέση με τον παλμό διέγερσης. Το σήμα του ανιχνευτή αποτελείται από μία αλληλουχία, τυχαία καταναμημένων παλμών, καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε ένα μεμονωμένο φωτόνιο, το οποίο αποθηκεύεται σε ξεχωριστό κανάλι ανάλογα με τη χρονική καθυστέρηση που έχει σε σχέση με τον παλμό διέγερσης, Σχήμα 3.



ΣΧΗΜΑ 3: Σύνθεση του ολικού σήματος από τα επιμέρους χρονικά κανάλια

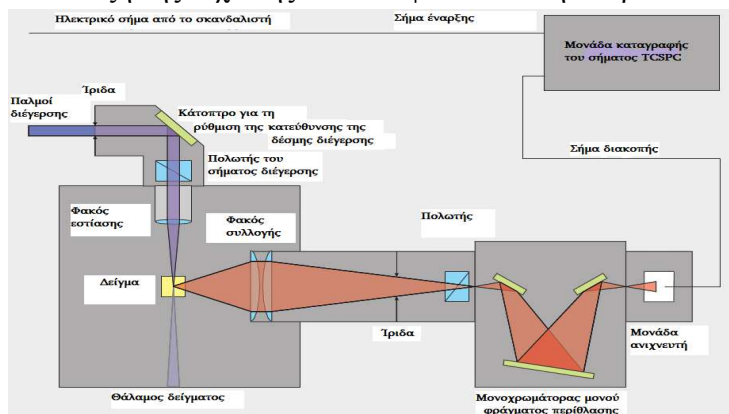


ΣΧΗΜΑ 4: α) Ηλεκτρονικά καταγραφής και β) η αρχή λειτουργία της τεχνική TCSPC.

Για την μέτρηση και την καταγραφή της χρονικής καθυστέρησης χρησιμοποιούνται ειδικά ηλεκτρονικά στοιχεία μια σύντομη περιγραφή των οποίων γίνεται παρακάτω. Κατά τη λειτουργία του συστήματος TCSPC, το laser διέγερσης εκπέμπει έναν παλμό φωτός, ο οποίος διεγείρει το δείγμα ενώ ταυτόχρονα καταγράφεται και από ένα κανάλι στη μονάδα καταγραφής. Στο κανάλι της μονάδας καταγραφής, ο παλμός διέγερσης του laser εκκινά μια ράμπα τάσης, η οποία δεν είναι τίποτα άλλο παρά μια τάση που αυξάνει γραμμικά με το

χρόνο στην κλίμακα των ns. Ένα δεύτερο κανάλι ανιχνεύει ένα εκπεμπόμενο φωτόνιο από το δείγμα που έχει διεγερθεί. Η χρονική στιγμή άφιξης του φωτονίου από το δείγμα προκαλεί την παύση της ράμπας τάσης. Η τάση στην οποία σταμάτησε η ράμπα αποτελεί το μέτρο της χρονικής καθυστέρησης του φωτονίου σε σχέση με το αρχικό σήμα. Η τάση αυτή μετατρέπεται απευθείας σε διαφορά χρόνου μεταξύ των δύο σημάτων.

Η διάταξη της τεχνικής TCSPC φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

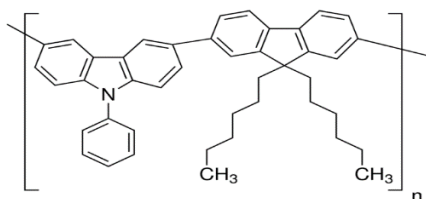


ΣΧΗΜΑ 5: Τεχνική ανίχνευσης TCSPC

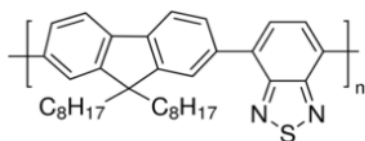
9. Πειραματική διαδικασία

- 1) Ο υπεύθυνος της άσκησης θα σας περιγράψει τη λειτουργία της διάταξης και θα σας δείξει τα υπό μελέτη δείγματα. Στην παρούσα άσκηση θα μελετηθούν τρία πολυμερικά υλικά (των οποίων οι δομές και ονομασίες φαίνονται στο σχήμα 6) τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των συζυγιακών πολυμερών με πληθώρα εφαρμογών στη φωτονική και οπτικοηλεκτρονική (lasers, LEDs, solar cells etc). Τα υλικά θα εξεταστούν σε μορφή διαλύματος αλλά και σε μορφή λεπτού υμενίου που θα κατασκευαστεί με την τεχνική φυγοκέντρισης (spin coating).
- 2) Αρχικά θα καταγραφεί η συνάρτηση απόκρισης του δείγματος (Instrument Response Function, IRF) χρησιμοποιώντας δείγμα αναφοράς.
- 3) Στη συνέχεια θα καταγραφεί η αποδιέγερση φθορισμού και ανισοτροπίας των δειγμάτων σε μορφή διαλυμάτων και υμενίων.
- 4) Θα γίνει το fitting των αποτελεσμάτων με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού.
- 5) Οι φοιτητές θα πρέπει να εξηγήσουν τα αποτελέσματα μελετώντας την βιβλιογραφία.

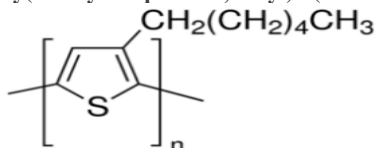
Poly(9,9-*n*-dihexyl-2,7-fluorene-*alt*-9-phenyl-3,6-carbazole) - (PF_CBZ)



Poly(9,9-dioctylfluorene-*alt*-benzothiadiazole), Poly[(9,9-di-*n*-octylfluorenyl-2,7-diyl)-*alt*-(benzo[2,1,3]thiadiazol-4,8-diyl)] - (F8BT)



Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) - (P3HT)



ΣΧΗΜΑ 6. Δομές και ονομασίες των τριών πολυμερών που θα μελετηθούν

Ενδεικτική Βιβλιογραφία

1. Joseph R. Lakowicz, “*Principles of Fluorescence Spectroscopy*”, 3rd edition, Springer Science+Business Media, LLC , New York, 2006.
2. W. Becker, “*Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques*”, Springer Berlin Heidelberg New York, 2005.
3. Bernard Valeur, “*Molecular Fluorescence: Principles and Applications*”, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001.