

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Μετριέται η απόκριση στο φωτισμό και τα πολικά χαρακτηριστικά μιας ημιαγωγίμης φωτοδιόδου πυριτίου. Διερευνάται η χρήση αυτής της συσκευής.

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Περιγραφή	Ποσότητα
Μονάδα οργάνων TK2941A	1
Διάταξη γραμμικής κίνησης μετατροπέων TK294	1
Βάση λαμπτήρα	1
Κιτ μετατροπέων φωτός TK294	1
Τροφοδοτικό, +15V dc	1
Πολύμετρα	2

ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

26.1 Η Ανάστροφη Χαρακτηριστική Καμπύλη της Φωτοδιόδου

26.2 Η Γραμμή Φορτίου της Φωτοδιόδου

26.3 Τα Πολικά Χαρακτηριστικά της Φωτοδιόδου

ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- Να παρατηρούμε την επίδραση του προσπίπτοντος φωτός στη συμπεριφορά της ημιαγωγίμης φωτοδιόδου.
- Να κατανοήσουμε τον όρο ‘ανάστροφο ρεύμα διαρροής’.
- Να μετρήσουμε την απόκριση στο φωτισμό και τα πολικά χαρακτηριστικά της ημιαγωγίμης φωτοδιόδου.

ΠΡΟΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

Πριν αρχίσετε την εκτέλεση αυτής της εργασίας θα πρέπει:

- Να έχετε κατανοήσει τη βασική θεωρία και τη λειτουργία των ημιαγωγίμων συσκευών.
- Να έχετε κατανοήσει τις βασικές θεωρίες που αφορούν στη φύση του φωτός.
- Να έχετε κατανοήσει τη λειτουργία ενός τελεστικού ενισχυτή.

Να είστε εξοικειωμένοι με τη χρήση της Διάταξης Οπτικής Ανίχνευσης και τη Διάταξη Γραμμικής Κίνησης Μετατροπέων.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε έναν κρύσταλλο ημιαγωγού με προσμίξεις, που εκτίθεται στο φως, τα φωτόνια ελευθερώνουν φορείς φορτίου (ηλεκτρόνια και οπές) στο εσωτερικό του υλικού. Τα φορτία αυτά είναι ελεύθερα να σχηματίσουν ηλεκτρικό ρεύμα. Ας δούμε τώρα τι συμβαίνει αν μια επαφή PN εκτεθεί στο φως.

Πρώτα, θα πρέπει να θυμηθούμε την αρχή λειτουργίας μιας συνηθισμένης διόδου. Αν ημιαγωγίμα υλικά τύπου-P και τύπου-N ενωθούν χημικά μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν μια **επαφή PN (pn junction)**, μερικές από τις οπές και τα ηλεκτρόνια, αυτά που βρίσκονται εκατέρωθεν της περιοχής της επαφής, επανασυνδέονται με αποτέλεσμα να σχηματιστεί μια περιοχή κενή από φορείς (**περιοχή κένωσης - depletion region**). Το υλικό τύπου-P, κοντά στην επαφή, χάνει οπές και, έτσι, γίνεται αρνητικά φορτισμένο. Το υλικό τύπου-N (επίσης κοντά στην επαφή) χάνει ηλεκτρόνια και, έτσι, γίνεται θετικά φορτισμένο. Σαν συνέπεια, ένα ηλεκτρικό πεδίο αναπτύσσεται κάθετα στην επαφή. Αν συνδεθεί μια μπαταρία στα άκρα της επαφής, με το θετικό πόλο στο άκρο τύπου- P, εξασθενεί το ηλεκτρικό πεδίο και, αν η τάση της μπαταρίας αυξηθεί πάνω από μια ορισμένη τιμή, θα αρχίσει να ρέει ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή είναι η συνθήκη **ορθής πόλωσης (forward bias)** της επαφής PN.

Αν η μπαταρία συνδεθεί ανάστροφα, δηλαδή, με το θετικό πόλο στο άκρο τύπου-N, αυτό θα ενισχύσει το ηλεκτρικό πεδίο και δεν θα έχουμε ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή είναι η συνθήκη **ανάστροφης πόλωσης (reverse bias)**.

Επομένως, με μια επαφή PN έχουμε έναν **ανορθωτή (rectifier)**.

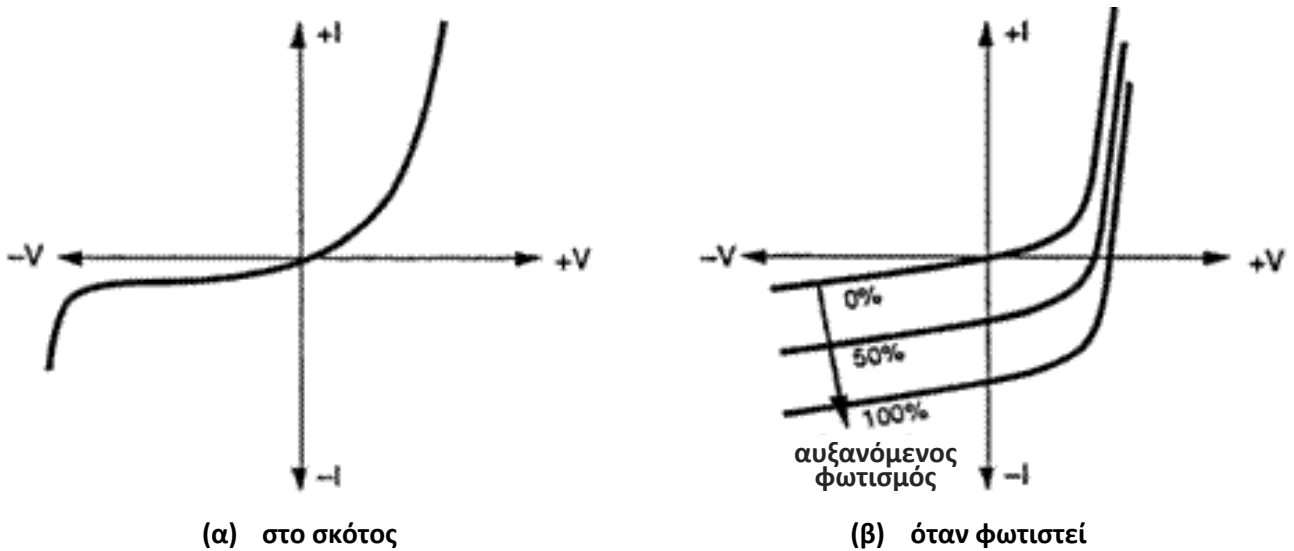
Στην πραγματικότητα, στην ανάστροφη πόλωση υπάρχει ένα πολύ μικρό ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι συμβαίνουν μέσα στο υλικό μερικές θερμικές διεγέρσεις που παράγουν ζεύγη οπών/ηλεκτρονίων. Όταν αυτοί οι φορείς μειοψηφίας (ηλεκτρόνια στο τμήμα τύπου-P και οπές στο τμήμα τύπου-N) παράγονται ή διαχέονται μέσα στην περιοχή κένωσης, επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο, οι μιν οπές προς την περιοχή P, τα δε ηλεκτρόνια προς την περιοχή N. Περνάνε στις περιοχές στις οποίες είναι φορείς πλειοψηφίας (ηλεκτρόνια στην περιοχή N και οπές στην περιοχή P) και, έτσι, σχηματίζουν ένα μικρό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι γνωστό σαν **ανάστροφο ρεύμα διαρροής (reverse leakage current)**. Εξαρτάται από τη θερμοκρασία και αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση της ανάστροφης πόλωσης. Όταν η ανάστροφη πόλωση γίνει πολύ μεγάλη, η επαφή **καταρρέει (breaks down)**. Αυτά τα χαρακτηριστικά πόλωσης της επαφής απεικονίζονται στην Εικ. 6.26.1 (α).

Αν ρίξουμε φως πάνω στους ημιαγωγούς, τα φωτόνια ελευθερώνουν επιπλέον ζεύγη οπών/ηλεκτρονίων. Το φαινόμενο είναι πιο έντονο στους φορείς μειοψηφίας καθώς υπάρχουν λιγότεροι απ'αυτούς, στις περιοχές που δημιουργούνται αρχικά, από ότι οι φορείς πλειοψηφίας. Αυτοί οι δημιουργούμενοι φορείς μειοψηφίας διαχέονται προς την επαφή, τη διασχίζουν και συνεισφέρουν στο ανάστροφο ηλεκτρικό ρεύμα.

Βλέπουμε ότι αυτό το επιπλέον ρεύμα είναι της ίδιας μορφής με το ρεύμα διαρροής. Συνεπώς, οι χαρακτηριστικές καμπύλες της επαφής μετατοπίζονται προοδευτικά από την αρχή προς τα κάτω κατά ένα ποσό που ισούται με το φωτορεύμα (photon current), όπως απεικονίζεται στην Εικ. 6.26.1 (β).

Πρώτα, θα σχεδιάσουμε αυτές τις χαρακτηριστικές καμπύλες και έπειτα θα διερευνήσουμε πως να χρησιμοποιούμε αυτό το φαινόμενο. Μπορούμε να πολώσουμε ανάστροφα τη φωτοδίοδο και να μετρήσουμε το ηλεκτρικό ρεύμα που τη διαρρέει. Εναλλακτικά, αν την αφήσουμε με ανοικτά τα άκρα της (open circuit), οι επιπλέον φορείς φορτίου θα δημιουργήσουν μια τάση μεταξύ των άκρων της, όπως απεικονίζεται στο δεξί μέρος της γραφικής παράστασης της Εικ. 6.26.1 (β).

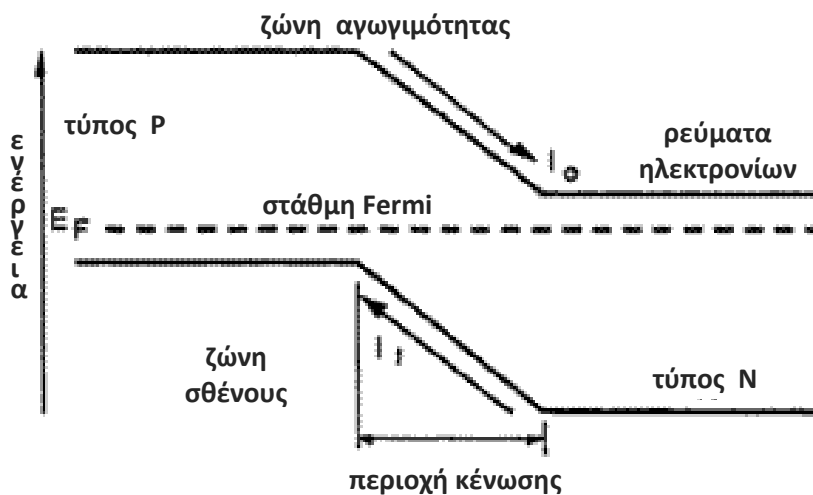
Αυτό το **φωτοβολταϊκό φαινόμενο (photovoltaic effect)** μπορεί να εξεταστεί αναλυτικότερα στην Άσκηση 27. Στο μεταξύ, για να ολοκληρώσουμε τη μελέτη, ακολουθεί μια περισσότερο θεωρητική εξήγηση του



Εικ. 6.26.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες διόδου επαφής PN

φαινομένου. Η αντιμετώπιση του θέματος εδώ δεν μπορεί παρά να είναι σύντομη. Για περισσότερες εξηγήσεις μπορείτε να ανατρέξετε σε οποιοδήποτε γνωστό διδακτικό βιβλίο.

Όταν ημιαγωγία υλικά p και n έλθουν σε χημική επαφή μεταξύ τους, ηλεκτρόνια και οπές επανασυνδέονται κοντά στη επαφή και σχηματίζεται μια περιοχή κένωσης (από φορείς), όπως ειπώθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Αυτό συνεχίζεται έως ότου η πιθανότητα να είναι κατελιημένο ένα ορισμένο ενεργειακό επίπεδο να είναι η ίδια και στις δύο πλευρές της επαφής. Αυτό σημαίνει ότι οι ενεργειακές **στάθμες Fermi (Fermi Level)**, E_F , πρέπει να είναι ίδιες και τα διαγράμματα των ενεργειακών ζωνών αγωγιμότητας (conduction band) και σθένους (valence band) είναι όπως απεικονίζεται στην Εικ. 6.26.2, αν δεν έχει εφαρμόσει καθόλου πόλωση.



Εικ. 6.26.2

Έτσι, αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο κάθετα στην επαφή του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα του υλικού. Αυτό αναπαρίσταται πάνω στο διάγραμμα με τις κεκλιμένες γραμμές στην περιοχή κένωσης. Σε ένα τέτοιο διάγραμμα, τα ηλεκτρόνια τείνουν να κινηθούν προς τα κάτω και οι οπές τείνουν να κινηθούν προς τα πάνω. Τέτοιοι φορείς μειοψηφίας γεννιούνται θερμικά και διαχέονται μέσα

από την επαφή. Σε συνθήκες μηδενικής τάσης πόλωσης, ένα ίσο και αντίθετο ρεύμα πρέπει να ρέει. Αυτό το ρεύμα αποτελείται από μερικούς φορείς πλειοψηφίας οι οποίοι έχουν αρκετοί ενέργεια να υπερπηδήσουν το μικρό φραγμό και να διαβούν την επαφή.

Αν, τώρα, η επαφή πολωθεί ορθά, το ύψος του φραγμού δυναμικού κατά μήκος της περιοχής κένωσης ουσιαστικά μειώνεται. Αυτό κάνει ευκολότερο για τους φορείς πλειοψηφίας να διασχίσουν την επαφή, οπότε ένα σημαντικό ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να ρέει.

Αν, τώρα, η επαφή πολωθεί ανάστροφα, το ύψος του φραγμού δυναμικού κατά μήκος της περιοχής κένωσης ουσιαστικά αυξάνεται. Μόνο οι πολύ υψηλής ενέργειας φορείς πλειοψηφίας μπορούν, τώρα, να διασχίσουν την επαφή, αλλά, θα υπάρχει πάντα ένα μικρό ανάστροφο ρεύμα.

Αυτό είναι το ανάστροφο ρεύμα διαρροής, I_o , που προέρχεται από τους θερμικά δημιουργούμενους φορείς μειοψηφίας οι οποίοι προωθούνται μέσω της επαφής από το ηλεκτρικό πεδίο της περιοχής κένωσης. Αυτό το ρεύμα διάχυσης είναι, συνεπώς, ανεξάρτητο από την ανάστροφη πόλωση.

Αν, τώρα, η επαφή εκτεθεί στο φως, τα φωτόνια δημιουργούν επιπλέον ζεύγη οπών/ηλεκτρονίων που συνεισφέρουν στο ανάστροφο ρεύμα διαρροής, το οποίο, συνεπώς, γίνεται $p \cdot I_o$, όπου, p είναι μια σταθερά που εξαρτάται από την ένταση του φωτισμού (αριθμός φωτονίων). Τα φαινόμενα παγίδευσης των φορέων από τα άτομα των προσμίξεων, που αναφέρθηκαν στην Άσκηση 25 για τα φωτοαγωγίμα στοιχεία, δεν έχουν θέση εδώ αν το φως πέφτει στην επαφή, καθώς η περιοχή κένωσης είναι πολύ λεπτή.

Μπορεί να αποδειχθεί ότι η ένταση του ορθού ρεύματος εξαρτάται από τον αριθμό των φορέων πλειοψηφίας που έχουν ενέργειες μεγαλύτερες από την ενέργεια που απαιτείται για να ξεπεραστεί ο φραγμός. Το ρεύμα αυτό δίδεται από την εξίσωση:

$$I_f = I_o \cdot e^{-\frac{eV}{kT}}$$

όπου:

I_o είναι το ανάστροφο ρεύμα διαρροής

k είναι η σταθερά του Boltzmann (1.3806×10^{-23} joule/°K)

T είναι η απόλυτη θερμοκρασία (°K)

$-e$ είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου (1.6021×10^{-19} coulomb) και

V είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων της επαφής, θετική για ορθή πόλωση και αρνητική για ανάστροφη.

Θα υπάρχει, όμως, πάντα το ρεύμα διαρροής I_o . Έτσι, το ολικό ρεύμα μέσα από την επαφή είναι $I_d = I_f - I_o$

$$I_d = I_o \left(e^{-\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

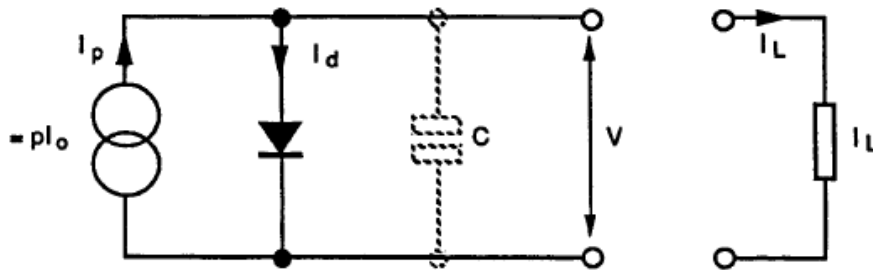
Αυτή είναι η τυπική εξίσωση της διόδου. Σημειώστε ότι δίνει τα κάτωθι αποτελέσματα:

Με μηδενική πόλωση ($V = 0$), $I_d = 0$ καθώς τα ρεύματα I_f και I_o αλληλοεξουδετερώνονται.

Με ανάστροφη πόλωση (V αρνητικό), η εκθετική συνάρτηση είναι πολύ μικρή, οπότε $I_d \approx -I_o$.

Επομένως, το ανάστροφο ρεύμα διαρροής είναι σχεδόν ανεξάρτητο από την εφαρμοζόμενη ανάστροφη τάση αλλά περισσότερο εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία. Αυτή η εξίσωση ισχύει αρκετά καλά για χαμηλές ανάστροφες τάσεις μέχρι την ανάστροφη κατάρρευση και για χαμηλά ορθά ρεύματα ως το σημείο που η αντίσταση της διόδου ή των επαφών της αρχίζουν να έχουν σημαντικές τιμές.

Μπορούμε, τώρα, να θεωρήσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα της φωτοδιόδου. Αν αγνοήσουμε την αντίσταση της διόδου, μπορούμε να αναπαραστήσουμε το φωτο-ρεύμα με μια σταθερή πηγή ρεύματος έντασης $I_p = p \cdot I_o$ παράλληλα με μια ιδανική δίοδο. Επίσης μεταξύ των άκρων της επαφής υπάρχει ένας πυκνωτής. Η



Εικ. 6.26.3

περιοχή κένωσης είναι ουσιαστικά ένας πυκνωτής καθώς αποτελείται από δύο αντίθετα φορτία διαχωρισμένα από ένα στρώμα υλικού. Η χωρητικότητα εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση, αλλά, σε πολλές εφαρμογές μπορεί να αγνοηθεί. Αυτή η διάταξη φαίνεται στην Εικ. 6.26.3. R_L είναι η αντίσταση φορτίου η οποία μπορεί να συνδεθεί.

Το ρεύμα στο φορτίο είναι $I_L = I_p - I_d$. Αντικαθιστώντας, παίρνουμε

$$I_L = p \cdot I_o - I_o \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_L = I_o \left(p + 1 - e^{\frac{eV}{kT}} \right)$$

Με το φορτίο βραχυκυκλωμένο, έχουμε τη λειτουργία της φωτοδιόδου, την οποία εξετάζουμε σε αυτήν την εργασία. Η τάση εξόδου $V=0$ και το ρεύμα είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος (short circuit), I_{sc} . Βάζοντας $V = 0$ στην παραπάνω εξίσωση παίρνουμε το ρεύμα βραχυκυκλώματος

$$I_{sc} = I_o(p + 1 - e^{-0}) = p \cdot I_o$$

Επομένως, το I_{sc} είναι ευθέως ανάλογο του p , δηλαδή, το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι ευθέως ανάλογο της έντασης του φωτισμού. Αυτό υποθέτει ότι το I_o είναι σταθερό, οπότε η φωτοδίοδος είναι πιθανόν να είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία.

Με το φορτίο ανοικτό (ασύνδετο), έχουμε τη λειτουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου, η οποία μπορεί να μελετηθεί πληρέστερα στην Εργασία 29. Σ'αυτήν την περίπτωση δεν ρέει ηλεκτρικό ρεύμα ($I_L = 0$), έτσι μπορούμε να πάρουμε μια έκφραση για την τάση ανοικτού κυκλώματος (open circuit) V_{oc} εξισώνοντας την παραπάνω εξίσωση με μηδέν.

$$0 = I_o \left(p + 1 - e^{\frac{eV_{oc}}{kT}} \right)$$

$$e^{\frac{eV_{oc}}{kT}} = p + 1$$

Παίρνοντας του φυσικούς λογαρίθμους και των δύο μελών, έχουμε:

$$-\frac{eV_{oc}}{kT} = \ln(p + 1)$$

$$V_{oc} = -\frac{kT}{e} \cdot \ln(p + 1)$$

Επομένως, η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι λογαριθμική συνάρτηση της έντασης του φωτισμού. Καθώς η έκφραση δεν περιλαμβάνει καθόλου το I_0 και η θερμοκρασία T εμφανίζεται στον αριθμητή, το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πιθανόν να μην είναι τόσο ευαίσθητο στη θερμοκρασία όσο η φωτοдиодος.

Για αντιστάσεις φορτίου μεταξύ των δύο αυτών ακραίων τιμών, η κατάσταση είναι πιό σύνθετη. Εδώ, στοχεύουμε στη μέγιστη ισχύ εξόδου. Η επιλογή της αντίστασης φορτίου εξαρτάται από την ανάστροφη τάση (αν η επαφή λειτουργεί σαν φωτοдиодος) και εξαρτάται αντιστρόφως από το επίπεδο φωτισμού, δηλαδή, περισσότερο φως χρειάζεται μικρότερη αντίσταση για μέγιστη έξοδο. Για να το περιγράψουμε αυτό, απαιτούνται πολύπλοκα μαθηματικά που ξεφεύγει από το σκοπό αυτών των σημειώσεων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικοί τύποι με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ένας απ' αυτούς είναι:

$$R_{\beta\acute{\epsilon}\lambda\tau\iota\sigma\tau\omicron} = 0.86 \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$$

όπου, V_{oc} είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος και

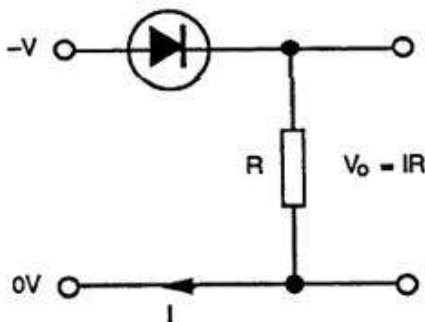
I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος για το μέγιστο επίπεδο φωτισμού στον οποίο είναι να λειτουργήσει η φωτοдиодος.

Το αποτέλεσμα αυτό θα αναφερθεί ξανά στην Εργασία 27.

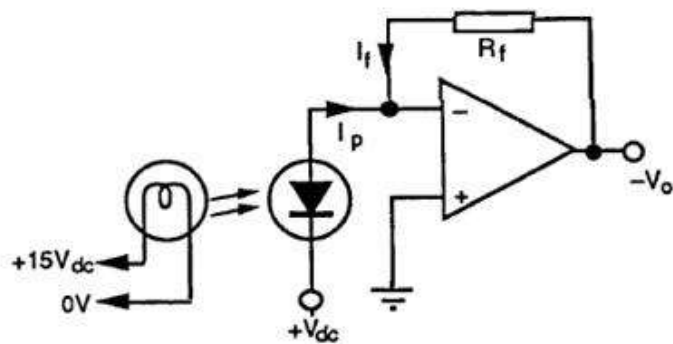
ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 26.1

Η Ανάστροφη Χαρακτηριστική Καμπύλη της Φωτοдиодου

Θέλουμε να μετρήσουμε το ηλεκτρικό ρεύμα, που ρέει μέσα από τη φωτοдиодο, για διάφορες εντάσεις του φωτός, σαν συνάρτηση της τάσης πόλωσης. Ο κανονικός τρόπος να το κάνουμε είναι να βάλουμε μια αντίσταση σε σειρά, για να μετρήσουμε την τάση στα άκρα της, όπως στην Εικ. 6.26.4. Ένας καλύτερος



Εικ. 6.26.4



Εικ. 6.26.5

τρόπος, με την οποία αποφεύγουμε πολλούς υπολογισμούς, είναι να χρησιμοποιήσουμε έναν τελεστικό ενισχυτή. Αναφερόμενοι στη θεωρία στο Παράρτημα D, η αντιστρέφουσα είσοδος του ενισχυτή γειώνεται

και, αν συνδέσουμε τη φωτοδιόδο, όπως στην Εικ. 6.26.5, ουσιαστικά λειτουργεί υπό συνθήκες βραχυκλώματος και οδηγεί ρεύμα μέσα στον ενισχυτή.

Από το νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff,

$$I_p = I_f = \frac{-V_o}{R_f}$$

Επομένως, γνωρίζοντας την R_f και μετρώντας την V_o , μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα που παρέχει η φωτοδιόδος. Η κάθοδος της φωτοδιόδου συνδέεται σε μια θετική μεταβλητή d.c. τάση για να διασφαλίσουμε ότι η φωτοδιόδος είναι ανάστροφα πολωμένη.

Ο διακόπτης, που ρυθμίζει την ενίσχυση (gain) του τελεστικού ενισχυτή (Operational Amplifier) στη μονάδα TK2941A, μεταβάλλει την αντίσταση R_f ως εξής:

ενίσχυση (gain)	R_f
1	100 kΩ
10	1 MΩ
100	10 MΩ

Έτσι, αν θέσουμε την ενίσχυση στο 10 και μετρήσουμε $V_o = -1$ volts, έχουμε ρεύμα 1 μ A. Η τάση V_o θα είναι αρνητική λόγω της αντιστροφής πόλωσης του ενισχυτή.

Στερεώστε στη βάση του λαμπτήρα στη διάταξη γραμμικής κίνησης των μετατροπέων και συνδέστε τους δύο ακροδέκτες της στις υποδοχές 0 V και +15V της μονάδας.

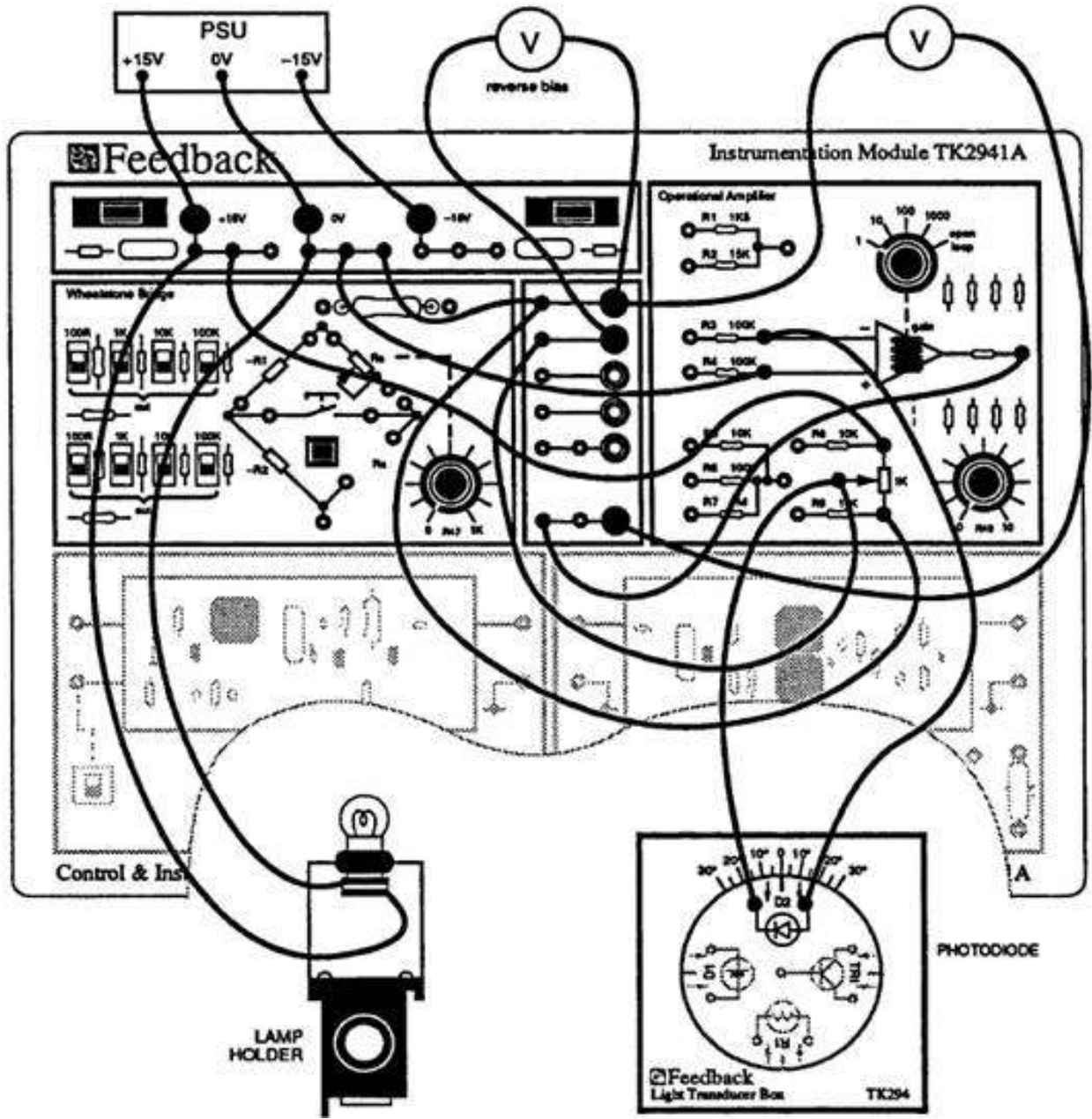
Τοποθετήστε το κουτί μετατροπέων φωτός στη διάταξη γραμμικής κίνησης των μετατροπέων στην ομάδα οπών που είναι πλησιέστερα στο λαμπτήρα με το άνοιγμα στο μπρασινικό μέρος των μετατροπέων να βλέπει το λαμπτήρα. Βεβαιωθείτε ότι το γυαλί απορρόφησης του υπέρυθρου φωτός έχει απομακρυνθεί από το εσωτερικό του κουτιού.

Βάλτε την ενίσχυση του τελεστικού ενισχυτή στο 10 και συνδέστε το βολτόμετρό σας στην έξοδο του ενισχυτή.

Αν και ο φωτισμός του περιβάλλοντος δεν έχει σημαντική επίπτωση, βεβαιωθείτε ότι ο μετατροπέας δεν κοιτάζει κατ'ευθείαν προς κάποιο παράθυρο ή κάποια άλλη πηγή φωτός, καθώς το υπερβάλλον φως θα ανεβάσει πού τις ενδείξεις της διόδου.

Συνδεσμολογήστε το κύκλωμα της Εικ. 6.26.5, όπως δείχνεται στην Εικ. 6.26.6. Τοποθετήστε τη βάση του λαμπτήρα στη θέση που αντιστοιχεί στο 100% του σχετικού φωτισμού (Relative Illumination) αναφερόμενοι στον πίνακα που δίνεται στην Εργασία 24. Ανοίξτε το τροφοδοτικό και ελέγξτε ότι ο λαμπτήρας είναι αναμμένος. Περιστρέψτε τη διάταξη ανιχνευτών φωτός έως ότου το βολτόμετρο στην έξοδο του ενισχυτή να δείξει μέγιστη τιμή. Αυτό επιβεβαιώνει ότι το φως πέφτει κάθετα πάνω στον μετατροπέα και ότι έχουμε μέγιστη ευαισθησία. Μη μεταβάλλετε αυτήν την κλίκαμα κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Τώρα, χρησιμοποιείστε το ποτενσιόμετρο στο τμήμα του τελεστικού ενισχυτή (Operational Amplifier) της μονάδας TK2941A, για να βάλετε τη μεταβλητή d.c. τάση σε βήματα 0, -1, -2, -5, -10 και -15V και διαβάστε την έξοδο της τάσης του ενισχυτή σε κάθε βήμα. Καταγράψτε τις μετρήσεις σας στον πίνακα που δίνεται



Εικ. 6.26.6

στην Εικ. 6.26.7. Καθώς η αντίσταση ανάδρασης, R_f του ενισχυτή είναι $1\text{M}\Omega$, το ρεύμα εισόδου σε μA είναι σε νούμερο το ίδιο με την τάση εξόδου σε volts και μπορείτε να καταγράψετε άμεσα τις τιμές στις στήλες του ρεύματος.

Μετακινήστε το λαμπτήρα προς τα πίσω ώστε να μεταβάλλετε το φωτισμό στο μετατροπέα σύμφωνα με τον πίνακα αποστάσεων που δίνεται στην Εργασία 24. Σε κάθε τιμή φωτισμού, 80%, 60%, 40%, 25% και 10%, επαναλάβετε τις προηγούμενες μετρήσεις και καταγράψτε τις τιμές στις υπόλοιπες στήλες του πίνακα.

Αν κάνετε τα πειράματα στο φως της ημέρας, πάρτε τις μετρήσεις σας όσο το δυνατόν γρηγορότερα στην περίπτωση που το φως της ημέρας μεταβάλλεται (π.χ., αν εμφανίζεται και κρύβεται ο ήλιος στα σύννεφα). Επίσης, κρατήστε τα χέρια σας μακριά από τη διάταξη όταν παίρνετε μετρήσεις, στην περίπτωση που προκαλούν ανεπιθύμητες ανακλάσεις φωτός προς το μετατροπέα.

Αποσυνδέστε το λαμπτήρα και κοιτάξτε αν μπορείτε να πάρετε κάποιο ρεύμα σε κάθε τιμή της μεταβλητής dc τάσης. Περιστρέψτε το μετατροπέα ώστε να βλέπει προς το εσωτερικό του κουτιού και δείτε αν μπορείτε να πάρετε κάποια ένδειξη σε πλήρες σκοτάδι.

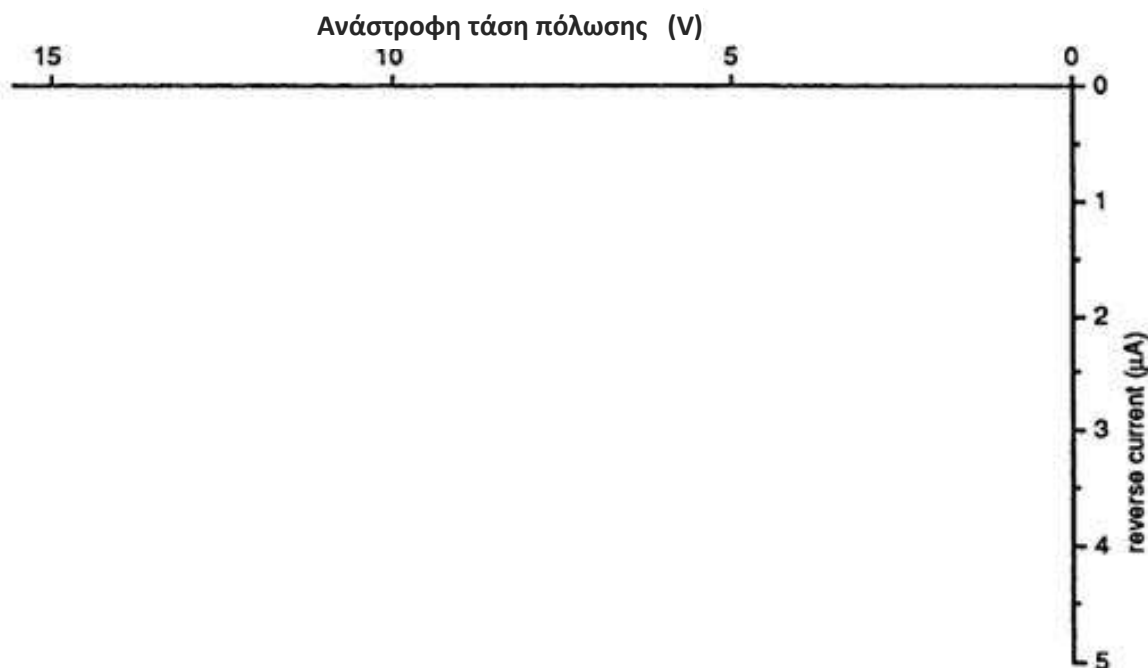
Αναστροφή πόλωση (V)	Ανάστροφό ρεύμα (μΑ) για τιμές Σχετικής Φωτεινότητας (%)					
	100	80	60	40	25	10
0						
-1						
-2						
-5						
-10						
-15						

Εικ. 6.26.7

Άσκηση 26.1 Στην ίδια γραμμική γραφική παράσταση, σχεδιάστε τις γραφικές παραστάσεις του ανάστροφου ρεύματος σαν συνάρτηση της ανάστροφης τάσης για κάθε τιμή του φωτισμού. Χρησιμοποιείστε άξονες, όπως δείχνονται στην Εικ. 6.26.8. (Θυμηθείτε ότι ουσιαστικά σχεδιάζετε τις ανάστροφες χαρακτηριστικές καμπύλες της διόδου). Βάλτε ετικέτα σε κάθε καμπύλη σας με την τιμή του σχετικού φωτισμού που χρησιμοποιήθηκε.

Ερώτηση 26.1 Το γράφημα επιβεβαιώνει την θεωρία ότι τα φωτόνια του φωτός δημιουργεί επιπλέον ρεύμα της ίδιας μορφής με το ρεύμα διαρροής;

Ερώτηση 26.2 Τι μπορείτε να πείτε σχετικά με τη μεταβολή του ανάστροφου ρεύματος όταν ο φωτισμός παραμένει σταθερός αλλά η τάση πόλωσης μεταβάλλεται; Ποιά παράμετρος της διόδου χρησιμοποιείται για να οριστεί αυτό;



Εικ. 6.26.8 ανάστροφες χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοδιόδου

Ας δούμε, τώρα, αν μπορούμε να βρούμε την ακριβή μορφή της μεταβολής του ρεύματος με το φωτισμό για ορισμένη και σταθερή τάση πόλωσης. Θα χρησιμοποιήσουμε ακριβώς το ίδιο κύκλωμα και θα βάλουμε την τάση πόλωσης σε μια σταθερή τιμή. Ας χρησιμοποιήσουμε -15V.

ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 26.2

Η Γραμμή Φορτίου της Φωτοδιόδου

Με το κύκλωμα της Εικ. 6.26.6 ακόμα συνδεδεσολογημένο, βάλτε πάλι την απόσταση λαμπτήρα-μετατροπέα στην τιμή που αντιστοιχεί στο 100% του σχετικού φωτισμού. Ρυθμίστε την τάση τροφοδοσίας στα 15V και, περιστρέψτε τον οπτικό αισθητήρα για μέγιστη έξοδο από τον ενισχυτή. Μην μεταβάλλετε τη τάση τροφοδοσίας κατά την διαδικασία του πειράματος. Λαμβάνοντας τις προφυλάξεις της προηγούμενης πρακτικής άσκησης, μεταβάλλετε τις τιμές του σχετικού φωτισμού αυξάνοντας την απόστασης λαμπτήρα-μετατροπέα σύμφωνα με τον πίνακα, που δίνεται στην Εργασία 24. Σε κάθε βήμα, διαβάστε την τάση εξόδου του ενισχυτή και καταγράψτε τις τιμές στο πίνακα της Εικ. 6.26.9. Αποσυνδέστε το λαμπτήρα και δείτε αν υπάρχει καθόλου ρεύμα.

Σχετική Φωτεινότητα (%)	Θέση (mm)	Ρεύμα (μΑ)
100		
90		
80		

70		
60		
50		
40		
30		
25		
20		
10		

Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτισμού με πόλωση -15V

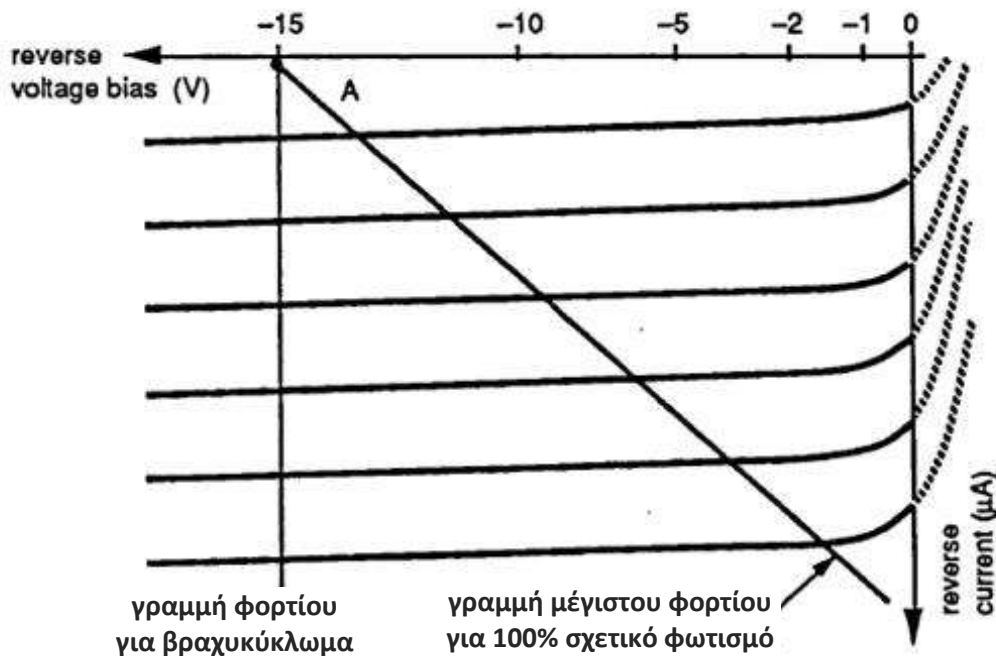
Εικ. 6.26.9 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτισμού της φωτοδιόδου

Άσκηση 26.2 Σχεδιάστε, στην ίδια γραμμική γραφική παράσταση, το ρεύμα σε μA ως προς σχετικό φωτισμό %. Προεκτείνετε τη γραφική σας παράσταση με διακεκομμένη γραμμή ως το μηδενικό φωτισμό. Βάλτε σαν ετικέτα της γραφικής σας παράστασης με την τιμή της τάσης πόλωσης που χρησιμοποιήθηκε.

Ερώτηση 26.3 Τι μορφή έχει η γραφική παράσταση; Η προέκταση περνάει από την αρχή των αξόνων; Αν όχι, γιατί;

Ερώτηση 26.4 Γιατί, κατά τη γνώμη σας, ήταν δύσκολο να πάρουμε μια ένδειξη που να αντιστοιχεί σε μηδενικό φωτισμό;

Όπως εξηγήσαμε πιο πάνω σε όλο το πείραμα μετράμε το ρεύμα της διόδου σε μηδενική αντίσταση φορτίου. Αν έχουμε ανοικτό κύκλωμα χωρίς φορτίο τότε παράγεται τάση. Αυτό διερευνούμε αναλυτικά στην άσκηση 27. Ωστόσο όταν έχουμε συγκεκριμένη αντίσταση σε ανάστροφη πόλωση τότε διαφοροποιούνται λίγο οι μετρήσεις. Ελέγξτε τις χαρακτηριστικές του σχήματος 6.26.8 και επαναλαμβάνονται πιο κάτω. Όταν καταγράψατε το γράφημα για σταθερή τάση πόλωσης -15V, η τάση παραμένει σταθερή ακόμα και όταν οδηγούμε σε βραχυκύκλωμα αυτό δεν επηρεάζει την ανάστροφη τάση πόλωσης της φωτοδιόδου. Μπορούμε να χαράξουμε την ευθεία φόρτου για μηδενική αντίσταση φορτίου όπως φαίνεται στο σχήμα 6.26.10 όπως χρησιμοποιείται στην άσκηση με τον τελεστικό ενισχυτή.



Εικ. 6.26.10

Ωστόσο αν χρησιμοποιήσουμε το κύκλωμα του σχήματος 6.26.4 η αντίσταση φορτίου δεν είναι μηδενική ή πολύ χαμηλή τιμή. Ποια τιμή αντίστασης φορτίου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε με ασφάλεια;

Για να απαντήσετε στο ερώτημα αυτό, εξετάστε τη γραμμή φορτίου για μια μη μηδενική αντίσταση R. Για σταθερή τάση πόλωσης, αυτή θα ξεκινούσε από το σημείο A και θα είχε κλίση, που καθορίζεται από την αντίσταση, τέμνοντας τον άξονα του ρεύματος στο σημείο:

$$I = \frac{15}{R}$$

δηλαδή, για $R = 1 \text{ M}\Omega$,

$$I = \frac{15}{10^6} = 15 \text{ }\mu\text{A}$$

Αν επιθυμούμε η τάση που αναπτύσσετε στα άκρα της R να αυξάνετε σταθερά με την φωτεινότητα πρέπει αυτή να είναι πιο κάτω από το γόνατο που εμφανίζει η χαρακτηριστική. Η τυπική ευθεία φόρτου που συμφωνεί με τις απαιτήσεις περιγράφεται στο σχήμα 6.26.10.

Άσκηση 26.3 Στο γράφημα της ανάστροφης χαρακτηριστικής φωτοδιόδου, σχεδιάστε αυτό που πιστεύετε ότι είναι η γραμμή μέγιστου φόρτου για τα επίπεδα φωτισμού, που έχετε χρησιμοποιήσει. Υπολογίστε την αντίσταση, που αντιστοιχεί σε αυτή τη γραμμή φορτίου.

ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 26.3

Τα Πολικά Χαρακτηριστικά της Φωτοδιόδου

Με το κύκλωμα του σχήματος 6.26.6 συνδεδεμένο, τοποθετήστε την λάμπα στην αρχική θέση που δίδει φωτισμό 100%. Επίσης ρυθμίστε την τάση του μεταβλητού τροφοδοτικού στα 15V και μην την μεταβάλλετε σε όλη την διάρκεια του πειράματος.

Στην συνέχεια θέσατε γωνία 30° αριστερόστροφα και καταγράψτε την τιμή του ρεύματος. Επαναλάβετε την μέτρηση για γωνίες 25°, 20°, κ.λ.π., με βήμα 5° ως τις 30° δεξιόστροφ (Clockwise). Καταγράψτε τα αποτελέσματά σας στον πίνακα της Εικ. 6.26.11.

Γωνία (°)	Ρεύμα (μΑ)
30 ACW	
25	
20	
15	
10	
5	
0	
5 CW	
10	
15	
20	
25	
30	

Πόλωση = -15V

Εικ. 6.26.11 Χαρακτηριστικά πόλωσης φωτοδιόδου

Όταν ρυθμίζετε την γωνία στο κιτ οπτικών αισθητήρων να παρατηρείτε κάθετα και από την σωστή γωνία ώστε να βάζουμε την σωστή τιμή και να αποφύγουμε το σφάλμα παράλλαξης. Επίσης λαμβάνετε γρήγορα τις μετρήσεις ώστε να μην έχουμε μεταβολή του περιβάλλοντος φωτισμού.

Άσκηση 26.4 Σχεδιάστε γράφημα όπου ο ένας άξονας είναι το ρεύμα και ο άλλος άξονας η γωνία. Εναλλακτικά μπορείτε να το σχεδιάσετε σε πολική μορφή (κυκλική).

Άσκηση 26.5 Τέλος παρατηρήστε με προσοχή την επιφάνεια του αισθητήρα και συγκρίνετε με το μέγεθος του εξαρτήματος.

Ερώτηση 26.6 Γιατί νομίζετε ότι ο περιβάλλον φωτισμός επηρεάζει πολύ λίγο την μετρητική διάταξη.

Η φασματική απόκριση του μετατροπέα μπορεί να γίνει με πολύ εξειδικευμένα μηχανήματα και έχει μετρηθεί περίπου στα 800nm στην περιοχή του υπέρυθρου φάσματος.

Ερώτηση 26.7 Ελέγξτε της μετρήσεις που έχετε πάρει σε ποιες χρήσης μπορεί να βρεί εφαρμογές ο αισθητήρας;

Ερώτηση 26.8 Περιγράψτε τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αισθητήρα.

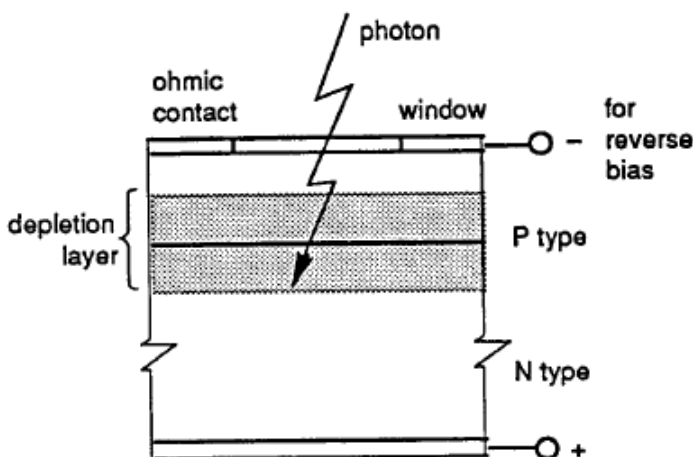
ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

Είναι πολύ σημαντικό ότι η φωτοδιόδος και το φωτοβολταϊκό στοιχείο παρόμοια εξαρτήματα με την ίδια αρχή λειτουργίας: την απλή επαφή pn. Συνεπώς έχουν βασικές αρχές λειτουργίας ίδιες αλλά διαφορετικό τρόπο κατασκευής.

Η χαρακτηριστική ανάστροφής πόλωσης δείχνει ότι το ρεύμα που παράγεται από τα φωτόνια έχει την ίδια μορφή με το ρεύμα διαρροής. Το ρεύμα που δημιουργείται από τα φωτόνια ελάχιστα εξαρτάται από την ανάστροφη τάση πόλωσης και συμπεριφέρεται σαν πηγή υψηλής δυναμικής αντίστασης, τυπικά σαν σταθερή πηγή ρεύματος. Επίσης το ρεύμα των φωτονίων είναι γραμμικά ανάλογο του φωτισμού. Αυτή η γραμμικότητα είναι για αρκετές δεκάδες έντασης του φωτισμού.

Αυτό το πλεονέκτημα της γραμμικότητας αντισταθμίζει το μειονέκτημα που απαιτεί πηγή πόλωσης. Ωστόσο αυτή η πηγή δεν χρειάζεται σταθερότητα ακριβείας λόγω της υψηλής δυναμικής αντίστασης του εξαρτήματος. Αυτό το ονομάζουμε λειτουργία ρεύματος. Το ρεύμα διαρροής σε κατάσταση χωρίς φωτισμό είναι πολύ χαμηλό – τυπικά μερικά nano-Amperes.

Η φυσική κατασκευή του εξαρτήματος απεικονίζεται στο σχήμα 6.26.12.



Σχήμα 6.26.12: Τυπική μορφή επαφής pn φωτοδιόδου.

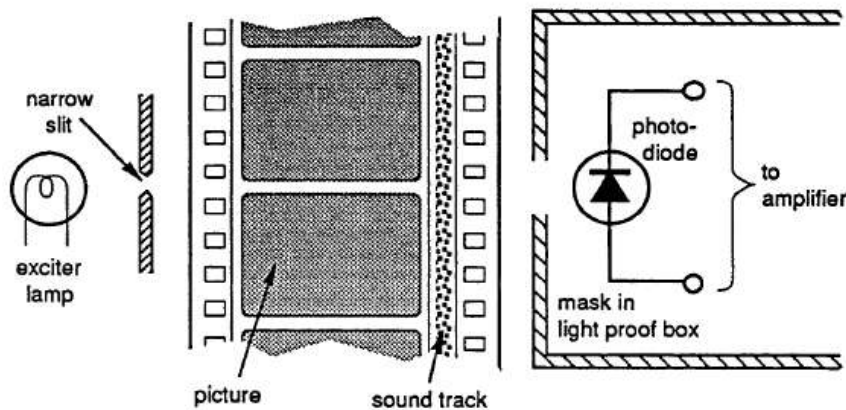
Η παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίων – οπών από την πρόσπτωση φωτονίων ποικίλλει ανάλογα με την ενέργεια των φωτονίων, την φύση και το πάχος του ημιαγωγού. Στην προσπάθεια να αυξήσουμε τον αριθμό φωτονίων εμπλουτίζουμε την περιοχή αραίωσης, επίσης η κατασκευή της p επαφής γίνεται λεπτή ενώ μεγάλη η περιοχή αραίωσης για καλύτερη απόδοση. Πρακτικά η περιοχή αραίωσης αυξάνετε με την αύξηση της ανάστροφης πόλωσης και η απόδοση φτάνει το 10%. Η ευαισθησία εξαρτάται την απόσταση της επαφής με την απελευθέρωση των ηλεκτρονίων. Διευρύνοντας την ζώνη αραίωσης μειώνεται η χωρητικότητα του εξαρτήματος ο οποίος μειώνει τον χρόνο απόκρισης του εξαρτήματος. Έτσι η φωτοδιόδος με ανάστροφη τάση πόλωσης έχει μικρότερο χρόνο απόκρισης από το φωτο-βολταϊκό στοιχείο με μηδενική πόλωση επειδή έχει μεγαλύτερη περιοχή αραίωσης. Ένα ειδικό εξάρτημα που ονομάζεται PIN φωτο-διόδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν η χωρητικότητα είναι πρόβλημα. Ένα εγγενές στρώμα εισάγεται μεταξύ των ακρών p και n. Αυτό αυξάνει αποτελεσματικά το πλάτος του στρώματος αραίωσης που μειώνει έτσι την χωρητικότητα. Κατά συνέπεια έχουμε μια γρηγορότερη απόκριση και χαμηλού θορύβου.

Τυπικές τιμές χαρακτηριστικών φωτοδιόδου είναι:

- Χωρητικότητα επαφής 10pF
- Ανάστροφή αντίσταση 50MΩ
- Ορθή αντίσταση 100Ω

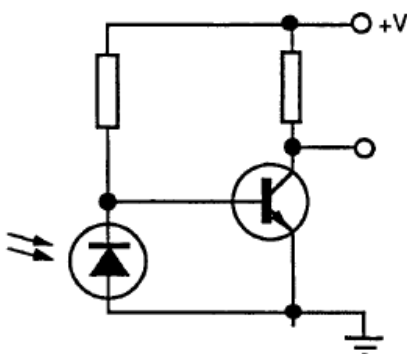
Η φωτοδιόδος κατασκευάζεται βάσει της επίπεδης διαδικασίας (planar process). Με αυτή επιτυγχάνουμε μικρό ρεύμα διαρροής αλλά υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε μικρή επιφάνεια επαφής και για συγκεκριμένη μορφή.

Επειδή η φωτοδιόδος έχει μικρό χρόνο απόκρισης χρησιμοποιείται ως αισθητήρας για τα ίχνη ήχου στα κινηματογραφικά φιλμ. Τα ίχνη ήχου είναι πάνω στο φιλμ παράλληλα με τα καρέ της εικόνας, στο σχήμα 6.26.13 απεικονίζεται αυτή η λειτουργία. Από την μια πλευρά «φωτίζουμε» τα ίχνη ενώ από την άλλη το φως που διαπερνά το διαβάζει μια φωτοδιόδος που οδηγεί τον ενισχυτή ήχου.



Σχήμα 6.26.13: ανιχνευτής ήχου σε κινηματογραφικό φιλμ.

Λόγω της γρήγορης απόκρισης της φωτοδιόδου έχουμε χρήση σε διακοπτικά κυκλώματα ελέγχου όπως το σχήμα 6.26.14. Το transistor σε κατάσταση σκότους πολώνεται από την αντίσταση βάσης λειτουργεί σε κατάσταση κόρου και η τάση στην έξοδο είναι $V_{CE sat} = 0V$. Όταν η φωτοδιόδος δεχθεί φως τότε μειώνεται η τάση στην βάση, το transistor οδηγείται στην αποκοπή και η τάση στην έξοδο είναι +V.



Σχήμα 6.26.14

