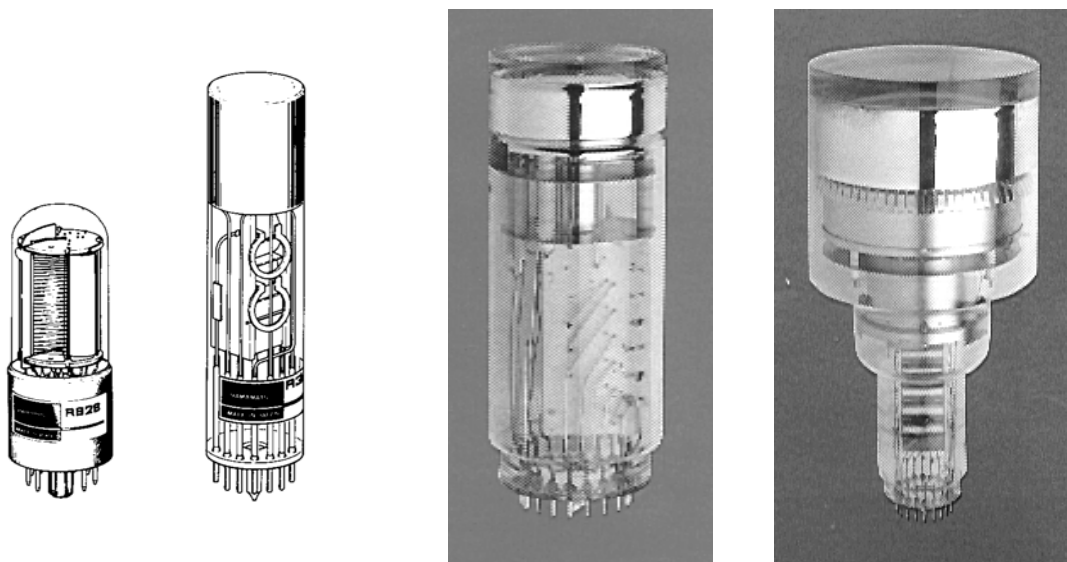


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Φωτοπολλαπλασιαστής

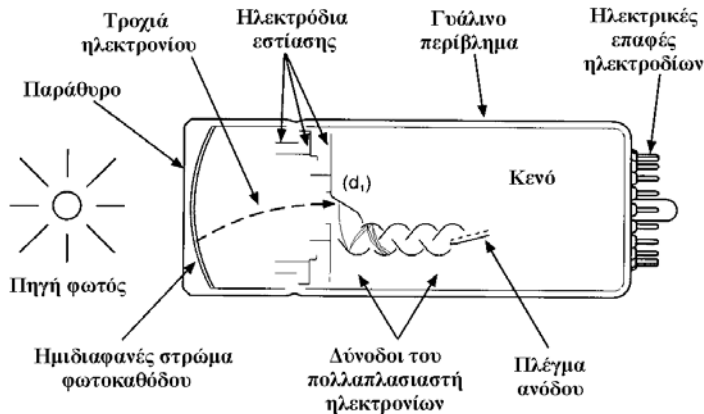
8.1 Ο φωτοπολλαπλασιαστής

Ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένα όργανο με εξαιρετική ευαισθησία στην ανίχνευση και μέτρηση του φωτός. Ο φωτοπολλαπλασιαστής (για συντομία αναφέρεται και ως PM) παρέχει στην έξοδό του ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της έντασης του προσπίπτοντος σε αυτό φωτός. Τα κύρια πλεονεκτήματα του φωτοπολλαπλασιαστή ως προς τα άλλα όργανα ανίχνευσης και μέτρησης φωτός είναι η ικανότητά του να ανιχνεύει, καλύπτοντας μεγάλες επιφάνειες, πολύ χαμηλές εντάσεις φωτός, που φθάνουν μέχρι και την ανίχνευση μεμονωμένων φωτονίων, και να ενισχύει σημαντικά το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει, με εξαιρετική ταχύτητα. Είναι επίσης σχετικά μικρός σε μέγεθος, αρκετά ανθεκτικός κάτω από αντίξοες συνθήκες λειτουργίας, και εύκολα ελεγχόμενος ως ηλεκτρονική διάταξη. Για όλους αυτούς τους λόγους χρησιμοποιείται ευρύτατα στη σύγχρονη πειραματική Φυσική.

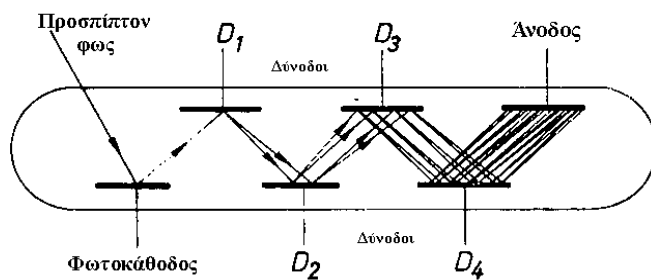


Σχήμα 8.1. Διάφορα είδη φωτοπολλαπλασιαστών.

Ο τρόπος λειτουργίας του φωτοπολλαπλασιαστή θα περιγραφεί τώρα σε συντομία, με αναφορά στα Σχ. 8.2 και 8.3. Ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένας γυάλινος σωλήνας, μέσα στον οποίο υπάρχει υψηλό κενό. Το φως προς μέτρηση προσπίπτει συνήθως στη μία από τις επίπεδες επιφάνειες του σωλήνα, και το ηλεκτρικό σήμα εξέρχεται μέσω ενός ηλεκτροδίου στο άλλο άκρο. Στο ίδιο αυτό άκρο υπάρχουν και τα ηλεκτρόδια τροφοδοσίας του οργάνου με τις απαιτούμενες για τη λειτουργία του ηλεκτρικές τάσεις. Το φως προσπίπτει πάνω σε ένα λεπτό υμένιο φωτοευαίσθητου υλικού, την *φωτοκάθοδο*, από την οποία, μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, εκδιώκει ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά στη συνέχεια εστιάζονται και επιταχύνονται προς μια μεταλλική επιφάνεια η οποία βρίσκεται σε θετικό δυναμικό ως προς την φωτοκάθοδο. Η επιφάνεια αυτή, η πρώτη *δύνοδος*, (D_1), είναι επιστρωμένη με υλικό



Σχήμα 8.2.
Η δομή ενός φωτοπολλαπλασιαστή.



Σχήμα 8.3.
Σχηματική περιγραφή της δομής ενός φωτοπολλαπλασιαστή.

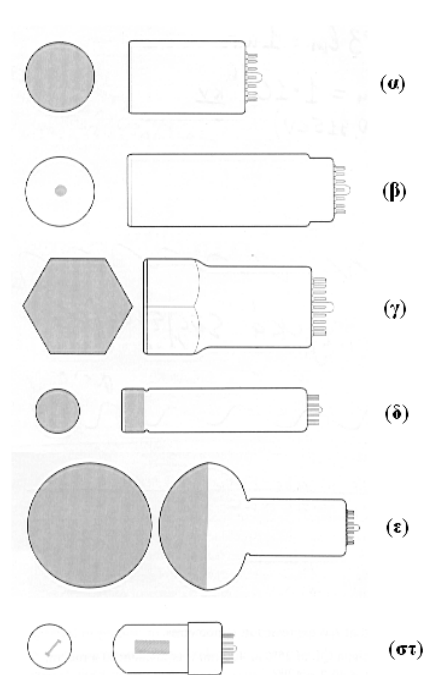
χαμηλού έργου εξαγωγής, ώστε, για κάθε προσπίπτον ηλεκτρόνιο, να αποβάλλονται από αυτήν περισσότερα του ενός ηλεκτρόνια. Επιτυγχάνεται έτσι ένας πολλαπλασιασμός του αριθμού των ηλεκτρονίων. Αυτά τα δευτερογενή ηλεκτρόνια επιταχύνονται και πάλι από ηλεκτρικό πεδίο προς τη δεύτερη δύνοδο. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές (ο συνήθης αριθμός δυνόδων είναι 9 έως 13), ώστε ο τελικός αριθμός των ηλεκτρονίων που προκύπτουν να είναι μεγάλος και το ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή εύκολα μετρήσιμο. Ο λόγος του αριθμού των δευτερογενών προς τον αριθμό των πρωτογενών ηλεκτρονίων σε κάθε δύνοδο εξαρτάται, εκτός από τις ιδιότητες της επιφάνειας, και από την ενέργεια των πρωτογενών ηλεκτρονίων, η οποία καθορίζεται από τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο διαδοχικές δυνόδους. Με τη χρήση αρκετά υψηλής τάσης η οποία κατανέμεται μεταξύ των δυνόδων, επιτυγχάνεται ένα σημαντικό δυναμικό εύρος στην ενίσχυση του ηλεκτρικού σήματος από τον φωτοπολλαπλασιαστή.

Θα εξετάσουμε στη συνέχεια σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα διάφορα μέρη του φωτοπολλαπλασιαστή, καθώς και εκείνα τα χαρακτηριστικά του που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή του για χρήση σε κάποια πειραματική διάταξη.

8.2 Η φωτοκάθοδος

8.2.1 Η ενεργός επιφάνεια της φωτοκαθόδου

Η φωτοκάθοδος εναποτίθεται ως λεπτό στρώμα φωτοευαίσθητου υλικού στο εσωτερικό της επιφάνειας του φωτοπολλαπλασιαστή (ΦΠ) που δρα ως παράθυρο. Το επιθυμητό εμβαδόν και σχήμα της φωτοευαίσθητης επιφάνειας της φωτοκαθόδου εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Υπάρχει διαθέσιμη μια ποικιλία μεγεθών και σχημάτων φωτοκαθόδων, και φωτοπολλαπλασιαστών γενικότερα. Τα κυριότερα φαίνονται στο Σχ. 8.4.



Σχήμα 8.4.

Ενεργές επιφάνειες φωτοκαθόδων.

(α) Κυκλική φωτοκάθοδος, για χρήση με διάχυτες πηγές και πηγές που είναι συζευγμένες απευθείας με τον ΦΠ, όπως στη χρήση με σπινθηριστή.

(β) Κυκλική φωτοκάθοδος περιορισμένης εκτάσεως, για περιορισμό του ρεύματος σκότους και του θορύβου, για χρήση στην ανίχνευση μεμονωμένων φωτονίων ή με δέσμη φωτός από λέιζερ.

(γ) Εξαγωνική φωτοκάθοδος και σωλήνας, για κάλυψη μεγάλης επιφάνειας με τοποθέτηση πολλών φωτοπολλαπλασιαστών σε στενή επαφή μεταξύ τους.

(δ) Γεωμετρίας 2π, με ευαισθησία και σε μέρος της κυρτής επιφάνειας, για μετρήσεις ευρείας γωνίας, όπως σε ανιχνευτές ακτινοβολίας.

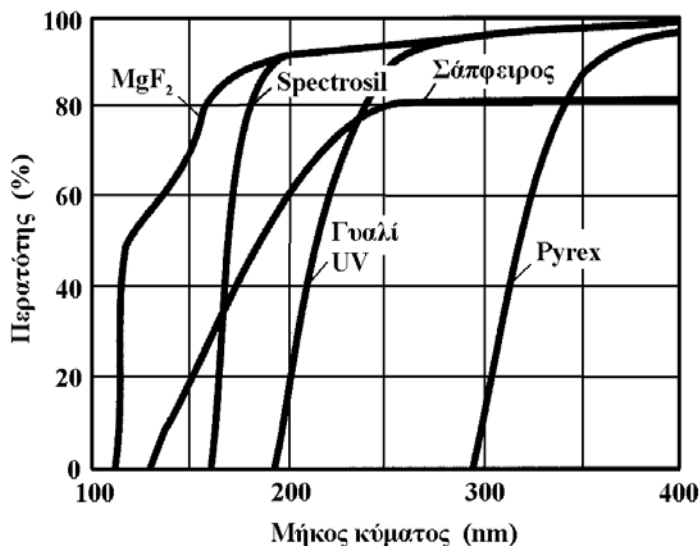
(ε) Ημισφαιρική φωτοκάθοδος και σωλήνας, για χρήση στην ανίχνευση πολύ ασθενών εντάσεων φωτός σε μεγάλη έκταση, στη βασική έρευνα, όπως στην ανίχνευση ακτινοβολίας Τσερένκοφ σε πειράματα μετρήσεων νετρίνων.

(στ) Πλαγίου παραθύρου, ώστε να προσαρμόζεται στη σχισμή εξόδου του φωτός από μονοχρωμάτορες πρίσματος ή οπτικού φράγματος, για χρήση στη φασματομετρία και τη

φωτομετρία. Στην περίπτωση αυτή η φωτοκάθοδος δεν βρίσκεται πάνω στο εσωτερικό του γυάλινου σωλήνα, αλλά σε μεταλλική επιφάνεια διαστάσεων της τάξης των $24 \times 8 \text{ mm}^2$ που βρίσκεται στο εσωτερικό του φωτοπολλαπλασιαστή.

8.2.2 Το υλικό του παραθύρου

Το υλικό του παραθύρου του φωτοπολλαπλασιαστή επηρεάζει καθοριστικά τη φωτοευ-



αισθησία του. Η οπτική περατότητα διαφόρων υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται ως παράθυρα σε φωτοπολλαπλασιαστές φαίνεται στο Σχ. 8.5.

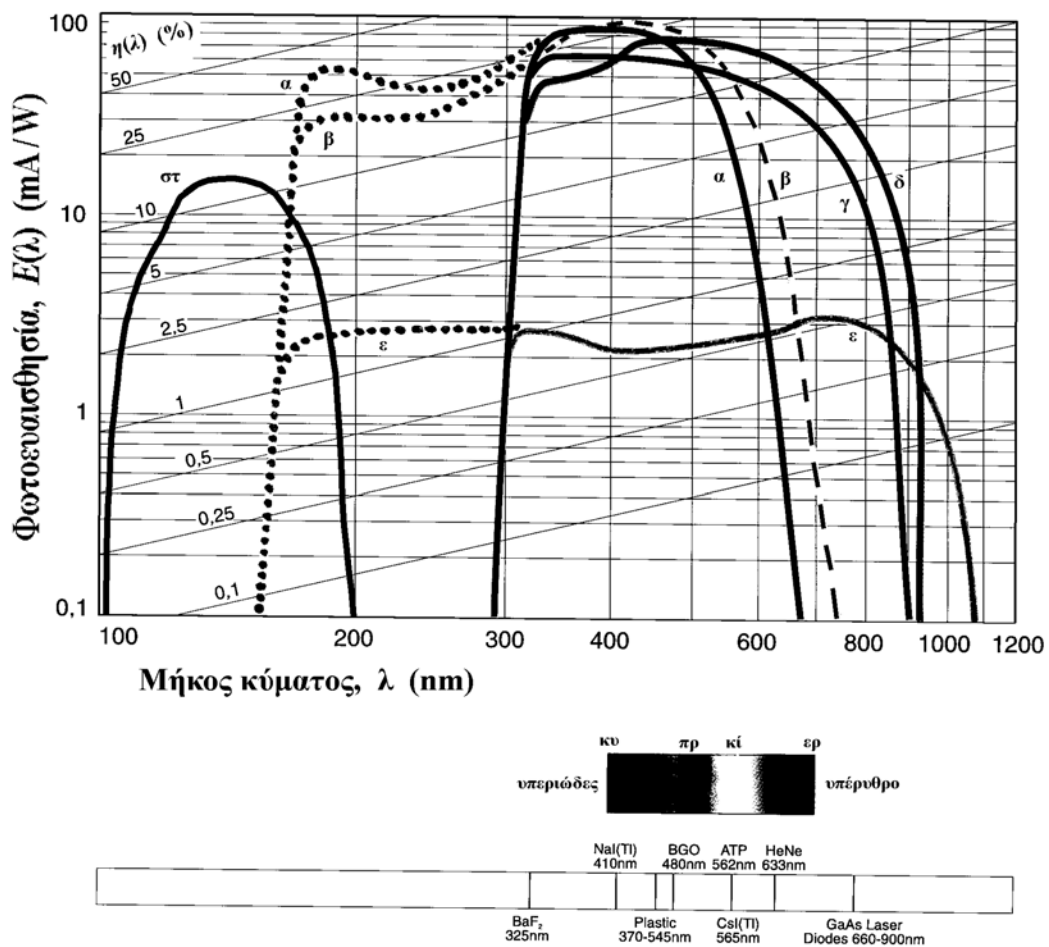
Σχήμα 8.5.

Η οπτική περατότητα διαφόρων υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται ως παράθυρα σε φωτοπολλαπλασιαστές, από την εταιρεία THORN EMI.

Για ευαισθησία στην περιοχή του υπεριώδους, η χρήση ειδικών παραθύρων, όπως από σάπφειρο, χαλαζία (Spectrosil), ή MgF_2 , είναι αναγκαία.

8.2.3 Είδη και φωτοευαισθησία φωτοκαθόδων

Φωτοκάθοδοι από διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετικές φασματικές ευαισθησίες. Στο Σχ. 8.6 φαίνονται οι φωτοευαισθησίες διαφόρων φωτοκαθόδων. Η φωτοευαισθησία $E(\lambda)$ της φωτοκαθόδου του φωτοπολλαπλασιαστή στο μήκος κύματος λ ορίζεται ως το ρεύμα που εκπέμπεται από την φωτοκάθοδο ανά μονάδα ενέργειας που προσπίπτει σε αυτήν ανά μονάδα χρόνου ως φως μήκους κύματος λ . Εκφράζεται σε μονάδες mA/W.



Σχήμα 8.6. Η φωτοευαισθησία μερικών φωτοκαθόδων των φωτοπολλαπλασιαστών της εταιρείας THORN EMI. Με τα εμπορικά ονόματα της εταιρείας, (α) Bialkali (Sb-K-Cs, Sb-Rb-Cs), (β) S11 (SbCs) και RbCs, (γ) S20 Trialkali (Na-K-Sb-Cs), (δ) S20, (ε) S1 (Ag-O-Sc), (στ) CsI.

Ένα ισοδύναμο μέγεθος είναι η *κβαντική απόδοση* $\eta(\lambda)$ της φωτοκαθόδου στο μήκος κύματος λ , που ορίζεται ως ο μέσος αριθμός φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται από τη φωτοκάθοδο ανά προσπίπτον φωτόνιο μήκους κύματος λ . Εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατόν. Για παράδειγμα, μια κβαντική απόδοση 10 % σημαίνει ότι μόνο το ένα στα 10 προσπίπτοντα φωτόνια θα προκαλέσει την εκπομπή

ενός φωτοηλεκτρονίου. Η σχέση ανάμεσα στα δύο μεγέθη αποδεικνύεται εύκολα ότι είναι:

$$E(\lambda) = 0,81\eta(\lambda)\lambda \text{ mA/W} . \quad (8.1)$$

Στο Σχ. 8.6 δίνονται, συναρτήσει του μήκους κύματος του φωτός, τόσο η φωτοευαισθησία όσο και η κβαντική απόδοση, για διάφορους τύπος φωτοκαθόδων. Οι στικτές γραμμές δίνουν τις επεκτάσεις της φωτοευαισθησίας στην περιοχή του υπεριώδους για τις περιπτώσεις που το παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή είναι από χαλαζία. Η καμπύλη (στ) δίνει τη φωτοευαισθησία της φωτοκαθόδου από CsI, η οποία εκτείνεται μόνο στην περιοχή του υπεριώδους. Κάτω από την κλίμακα του μήκους κύματος, σχεδιάστηκε το φάσμα του ορατού φωτός, με σημειωμένες τις προσεγγιστικές θέσεις του κυανού (κυ), του πράσινου (πρ), του κίτρινου (κί) και του ερυθρού (ερ). Οι περιοχές του υπεριώδους και του υπέρυθρου εκτείνονται, στο σχήμα, στα αριστερά και στα δεξιά του ορατού φάσματος αντίστοιχα. Στο κάτω μέρος του σχήματος δίνονται τα μήκη κύματος του φωτός από ορισμένες πηγές ενδιαφέροντος στη φυσική, όπως: οι σπινθηριστές NaI(Tl), CsI(Tl) και οι πλαστικοί σπινθηριστές, που χρησιμοποιούνται στη φασματοσκοπία γ, καθώς και κάποιων λείζερ, όπως οι GeAs και HeNe. Η επιλογή της κατάλληλης φωτοκαθόδου και παραθύρου του φωτοπολλαπλασιαστή καθορίζεται από τη χρήση για την οποία προορίζεται ο φωτοπολλαπλασιαστής. Οι κατασκευαστές παρέχουν πιστοποιητικά βαθμονόμησης της ευαισθησίας ενός συγκεκριμένου φωτοπολλαπλασιαστή, σε συγκεκριμένα μήκη κύματος ή και περιοχές του φάσματος.

Πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη ότι η ευαισθησία της φωτοκαθόδου παρουσιάζει μια ανομοιογένεια από το ένα της σημείο στο άλλο, που μπορεί να φθάνει τα 10 % της μέσης της τιμής. Για τον λόγο αυτό, μερικές φορές είναι επιθυμητό να διαχέεται το προσπίπτον φως ώστε να χρησιμοποιείται ολόκληρη η φωτοκάθοδος, και όχι κάποια μικρή περιοχή η οποία μπορεί να διαφέρει από μέτρηση σε μέτρηση.

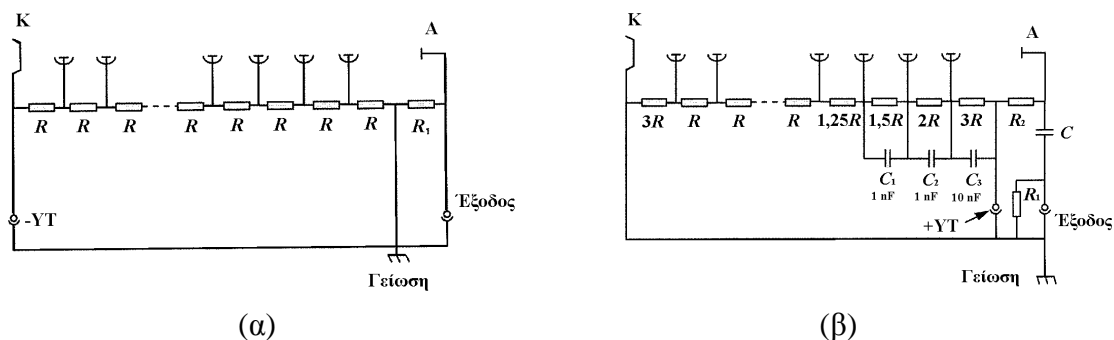
8.3 Ο πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων

Ο πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων είναι ουσιαστικά ένας ενισχυτής μεγάλου εύρους συχνοτήτων, με πολύ χαμηλό θόρυβο και μεγάλη ενίσχυση, που έχει τη δυνατότητα να παρέχει σήμα εξόδου συμβατό με την ευαισθησία των διαθέσιμων σύγχρονων μετρητικών οργάνων. Στον φωτοπολλαπλασιαστή, ο προορισμός του είναι να ενισχύσει κάθε αρχικό φωτοηλεκτρόνιο σε ένα μετρήσιμο παλμό φορτίου. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, η διαδικασία αυτή είναι επιθυμητό να γίνεται με τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

1. Σταθερή ενίσχυση για διαφορετικά φωτοηλεκτρόνια.
2. Ενίσχυση σταθερή στον χρόνο, για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
3. Σταθερό και επαναλήψιμο ύψος και διάρκεια του παλμού στην έξοδο.
4. Η διαδικασία ενίσχυσης πρέπει να διαρκεί για όσο το δυνατό μικρότερο χρονικό διάστημα, το οποίο να είναι επαναλήψιμο για διαφορετικούς παλμούς.

8.3.1 Ο διαιρέτης τάσης

Ανάμεσα στις γειτονικές δυνόδους πρέπει να διατηρείται σταθερή διαφορά δυναμικού, η οποία θα επιταχύνει τα δευτερογενή ηλεκτρόνια κάθε δυνόδου προς την αμέσως επόμενη δύνοδο, όπου και θα προκαλέσουν περαιτέρω πολλαπλασιασμό του αριθμού των. Η άνοδος πρέπει να βρίσκεται επομένως σε θετικότερο δυναμικό από αυτό της φωτοκαθόδου, συνολικά της τάξης των 1000 V. Τα δύο απλούστερα, και πιο διαδεδομένα κυκλώματα κατανομής αυτής της *υψηλής τάσης*, φαίνονται στο Σχ. 8.7.



Σχήμα 8.7. Δύο κοινά κυκλώματα διαιρέτη της υψηλής τάσης στις δυνόδους ενός φωτοπολλαπλασιαστή. (K = κάθοδος, A = άνοδος, YT = υψηλή τάση).

(α) Διαιρέτης τάσης για χρήση σε λειτουργία συνεχούς μεταβολής (ή dc). $R = 10 \text{ k}\Omega$ έως $10 \text{ M}\Omega$, $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$.

(β) Διαιρέτης τάσης για χρήση σε λειτουργία καταγραφής παλμών. $R = 10 \text{ k}\Omega$ έως $10 \text{ M}\Omega$, $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ έως $10 \text{ M}\Omega$.

Για την τροφοδοσία υψηλής τάσης χρησιμοποιείται μία πηγή τάσης, με μεγάλη ευστάθεια για καλύτερη λειτουργία του PM. Μια αλυσίδα αντιστάσεων χρησιμοποιείται για την κατανομή της τάσης στις δυνόδους.

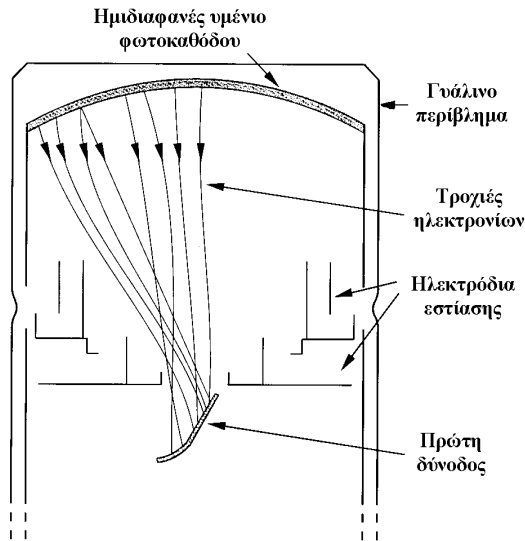
Για την καταγραφή συνεχούς ρεύματος (Σχ. 8.7α), μια αρνητική τάση εφαρμόζεται στην κάθοδο, αφήνοντας την άνοδο σε μηδενικό δυναμικό, για ευκολότερη σύνδεση με τον ενισχυτή που συνήθως ακολουθεί. Η επιλογή της τιμής της R (μεταξύ $10 \text{ k}\Omega$ και $10 \text{ M}\Omega$) καθορίζεται από το μέγιστο ρεύμα που αναμένεται να μετρά ο PM. Μια αντίσταση ασφαλείας $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$ συνδέεται μεταξύ γης και ανόδου, για να αποτρέψει την εμφάνιση τάσης ίσης με αυτήν της τελευταίας δυνόδου στην έξοδο όταν αφαιρείται το φορτίο από την έξοδο.

Για την καταγραφή παλμών (Σχ. 8.7β), μια θετική τάση εφαρμόζεται στην τελευταία δύνοδο. Οι αντιστάσεις έχουν τιμή $R = 10 \text{ k}\Omega$ έως $10 \text{ M}\Omega$. Η αντίσταση φορτίου είναι $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ έως $10 \text{ M}\Omega$, ενώ ως αντίσταση ασφαλείας χρησιμοποιείται μια τιμή $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$. Η χωρητικότητα σύζευξης, C , απομονώνει τη συνεχή τάση της ανόδου από την έξοδο, επιτρέποντας μόνο τους παλμούς ρεύματος να φθάνουν στην έξοδο.

Πιο σύνθετοι διαιρέτες τάσης χρησιμοποιούνται για καλύτερη λειτουργία του PM, και για ειδικές χρήσεις.

8.3.2 Η περιοχή εισόδου του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων

Στο Σχ. 8.8 φαίνεται η περιοχή εισόδου ενός πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων. Κάθε φωτοηλεκτρόνιο πρέπει να επιταχυνθεί και να εστιασθεί στην ευαίσθητη περιοχή της πρώτης δυνόδου. Η είσοδος στον πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων σχεδιάζεται έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η περισυλλογή των φωτοηλεκτρονίων από τη φωτοκάθοδο. Τα ηλεκτρόδια εστίασης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αποκοπή του παλμού με εξωτερικό σήμα, αν αυτό είναι επιθυμητό.



Σχήμα 8.8. Η είσοδος στον πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων. Φαίνονται κάποιες τροχιές φωτοηλεκτρονίων από τη φωτοκάθοδο προς στην πρώτη δύνοδο.

8.3.3 Οι επιφάνειες των δυνόδων του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων

Τα συνήθη υλικά επίστρωσης των επιφανειών των δυνόδων είναι τα BeCu και SbCs. Η χρήση για την οποία προορίζεται ο φωτοπολλαπλασιαστής καθορίζει και την επιλογή της κατάλληλης επιφάνειας, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της καθεμιάς, τα οποία είναι:

BeCu: ευστάθεια στην ενίσχυση και μεγάλη τιμή ενίσχυσης ανά volt επιτάχυνσης των δευτερογενών ηλεκτρονίων, μικρή ευαισθησία σε μεταβολές της θερμοκρασίας, περιορισμένα φαινόμενα υστέρησης.

SbCs: καλύτερη γραμμικότητα στην ενίσχυση, λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες.

8.3.4 Ενίσχυση του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων

Κάθε μια από τις δυνόδους του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων πολλαπλασιάζει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν σε αυτήν, και η ολική ενίσχυση είναι ίση με το γινόμενο των συνεισφορών όλων των δυνόδων. Αν με δ_i συμβολίσουμε την ενίσχυση της i -στής δυνόδου (συντελεστής δευτερογενούς εκπομπής), και υπάρχουν συνολικά n δύνοδοι, το ρεύμα στην άνοδο θα είναι ίσο με

$$I_a = \delta_1 \delta_2 \dots \delta_{n-1} \delta_n I_k \quad (8.2)$$

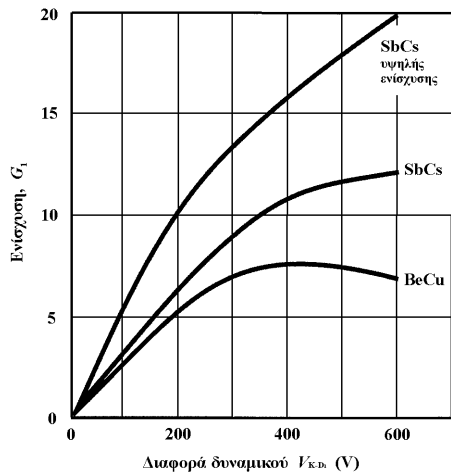
ή

$$I_a = G I_k, \quad (8.3)$$

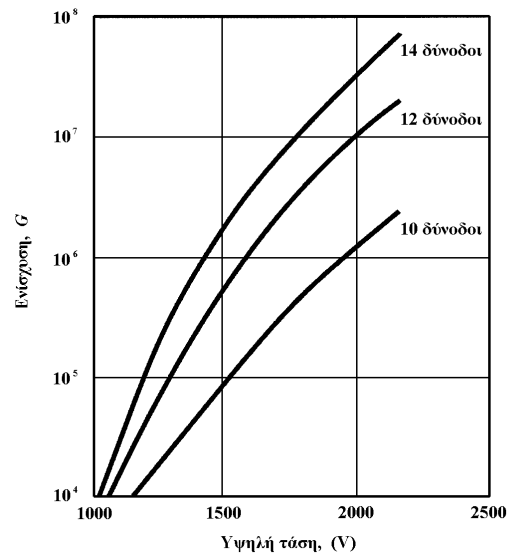
όπου I_k και I_a είναι τα ρεύματα καθόδου και ανόδου, αντίστοιχα, και G είναι η ενίσχυση του φωτοπολλαπλασιαστή.

Η ενίσχυση μιας δυνόδου εξαρτάται από το υλικό της επιφάνειας της δυνόδου. Εξαρτάται επίσης από την ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων, και κατ'επέκταση, από τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε διαδοχικές δυνόδους. Στο Σχ. 8.9 φαίνεται η μεταβολή της ενίσχυσης δ_1 της πρώτης δυνόδου, συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού μεταξύ αυτής και της φωτοκαθόδου, για διάφορα υλικά της επιφάνειας της δυνόδου. Ανάλογες καμπύλες περιγράφουν την ενίσχυση και των άλλων δυνόδων.

Ο πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων αποτελείται από μια αλυσίδα πολλών δυνόδων (π.χ. 9 έως και 14), και ένας διαιρέτης τάσης, αποτελούμενος από αντιστάσεις, κατανέμει σε αυτές την ολική *υψηλή τάση* που εφαρμόζεται στο κύκλωμα. Έτσι επιτυγχάνεται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε οποιοδήποτε δύο γειτονικές δυνόδους. Στο Σχ. 8.10 φαίνεται η μεταβολή της ολικής ενίσχυσης G του φωτοπολλαπλασιαστή, συναρτήσει της ολικής υψηλής τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα της αλυσίδας των δυνόδων, για τρεις περιπτώσεις συνολικού αριθμού δυνόδων ίσου με 10, 12 και 14.



Σχήμα 8.9. Μεταβολή της ενίσχυσης G_1 της πρώτης δυνόδου, συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού μεταξύ αυτής και της καθόδου, για διάφορες επιφάνειες δυνόδου.

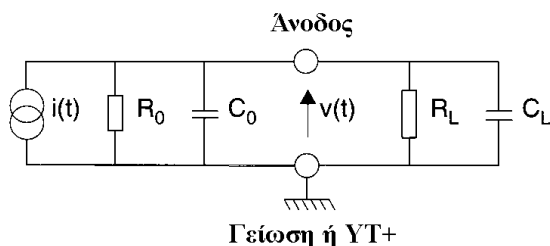


Σχήμα 8.10. Μεταβολή της ολικής ενίσχυσης G του φωτοπολλαπλασιαστή, συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού στα άκρα της αλυσίδας των δυνόδων, για τρεις συνολικούς αριθμούς δυνόδων.

8.3.5 Το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοπολλαπλασιαστή

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοπολλαπλασιαστή αποτελείται από μια ιδανική γεννήτρια ρεύματος, συνδεδεμένη παράλληλα με μια αντίσταση εξόδου R_o ($> 10^{12} \Omega$) και ένα πυκνωτή χωρητικότητας C_o ($< 10 \text{ pF}$). Το σήμα στην έξοδο εξαρτάται από τον παράλληλο συνδυασμό αυτών με την αντίσταση R_L και χωρητικότητα C_L του φορτίου (Σχ. 8.11).

Το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται τόσο σε περιπτώσεις μέτρησης συνεχούς σήματος όσο και σε περιπτώσεις στις οποίες το μετρούμενο φωτεινό σήμα έχει τη μορφή παλμών. Στην περίπτωση μέτρησης παλμών φωτός, το σχήμα του παλμού στην



Σχήμα 8.11. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοπολλαπλασιαστή.

έξοδο εξαρτάται από το σχήμα του παλμού φωτός. Σε πολλές εφαρμογές, το φωτεινό σήμα που μετράται φθίνει εκθετικά με τον χρόνο, με μια σταθερά χρόνου τ_s . Τότε, το ρεύμα $i(t)$ μεταβάλλεται με το χρόνο σύμφωνα με τη σχέση:

$$i(t) = NeG e^{-t/\tau_s} \quad (8.4)$$

όπου N είναι ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που παράγονται από τον φωτεινό παλμό, e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου και G η ενίσχυση του φωτοπολλαπλασιαστή.

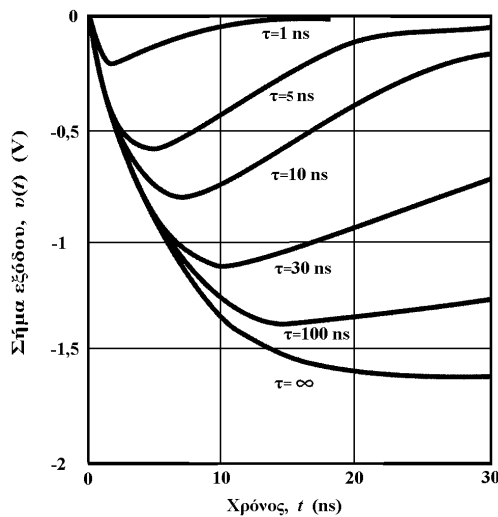
Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος είναι

$$\tau = RC, \quad \text{όπου} \quad R = \frac{R_o R_L}{R_o + R_L} \quad \text{και} \quad C = C_o + C_L. \quad (8.5)$$

Το σήμα στην έξοδο θα είναι τότε

$$v(t) = \frac{NeGR}{\tau - \tau_s} (e^{-t/\tau_s} - e^{-t/\tau}). \quad (8.6)$$

Τα σχήματα διαφόρων παλμών φαίνονται στο Σχ. 8. 12.



Σχήμα 8.12. Η τάση εξόδου $v(t)$ [από την Εξ. (8.6)], για φωτεινά σήματα της μορφής της Εξ. (8.4), με διάφορες στα-θερές χρόνου τ . Για τον φωτοπολλαπλα-σιαστή έχουν υποτεθεί οι τιμές

$$N = 100, \quad G = 10^6, \quad C = 10 \text{ pF} \quad \text{και} \quad \tau_s = 5 \text{ ns}.$$

Για $\tau \ll \tau_s$, η Εξ. (8.6) δείχνει ότι η τάση εξόδου καταγράφει πιστά τη μορφή του φωτεινού σήματος. Αυτή η περίπτωση ονομάζεται *τρόπος λειτουργίας ρεύματος*. Σε αντίθεση, ο *τρόπος λειτουργίας τάσης* ισχύει όταν είναι $\tau \gg \tau_s$. Τότε, το ύψος του παλμού τάσης στην έξοδο είναι ανάλογος του ολικού φορτίου στην είσοδο.

Για μεγάλο ή μεταβλητό ρυθμό παλμών, χρησιμοποιείται μια σταθερά χρόνου τέτοια ώστε το $1/\tau$ να είναι μικρότερο από το $1/5$ περίπου του μέσου ρυθμού των παλμών, για να αποφευχθεί η αλληλεπικάλυψη των παλμών. Στις περιπτώσεις στις οποίες είναι γνωστή η σταθερά χρόνου του σήματος, αυτή λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή του τ . Για τη φασματοσκοπία γ με χρήση σπινθηριστή Na(Tl), για παράδειγμα, για τον οποίο είναι $\tau_s = 230 \text{ ns}$, μια τιμή $\tau \approx 1 \mu\text{s}$ εξασφαλίζει καλή ολοκλήρωση του σήματος και επιτρέπει την καταμέτρηση παλμών με ρυθμούς μέχρι και 50 000 c.p.s. (παλμοί το δευτερόλεπτο).

8.4 Παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση του φωτοπολλαπλασιαστή

Ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένας οπτικός αισθητήρας με μεγάλη ενίσχυση, απόκριση σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ως τέτοιος έχει περιορισμούς στην απόδοση, που σχετίζονται με:

Μέγιστη ενίσχυση	Ρεύμα σκότους
Χρονική απόκριση	Λόγος θόρυβος/σήμα
Γραμμικότητα της απόκρισης	Ευστάθεια και υστέρηση

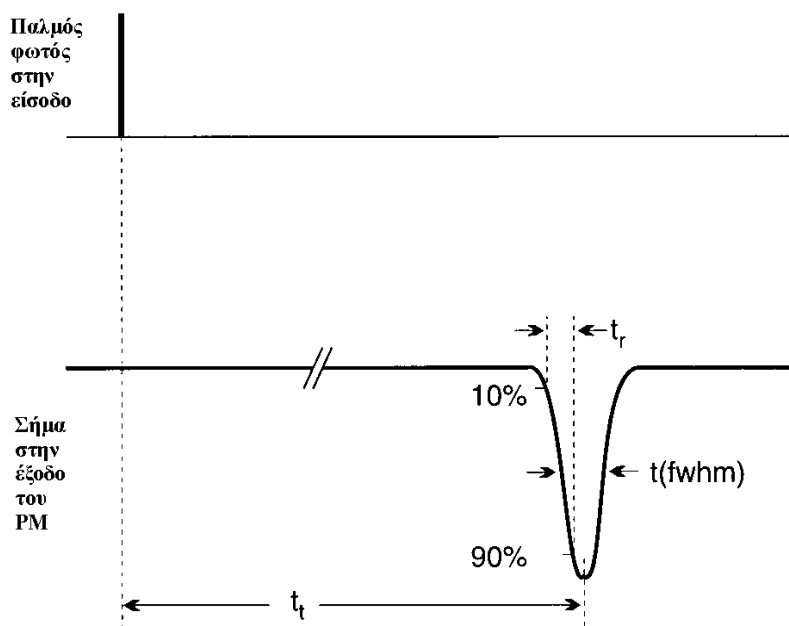
8.4.1 Μέγιστη υψηλή τάση και ευαισθησία

Η μέγιστη επιτρεπτή ενίσχυση εξαρτάται από τη δομή του φωτοπολλαπλασιαστή. Η μέγιστη επιτρεπτή διαφορά δυναμικού μεταξύ γειτονικών δυνόδων εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ τους και τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 100 και 150 V. Ο φωτοπολλαπλασιαστής δεν πρέπει να λειτουργεί με υψηλή τάση πέραν κάποιου ασφαλούς ορίου (για 10 δυνόδους, μεταξύ 1000 και 1500 V). Σε μεγάλες τάσεις, παρατηρούνται ασταθής συμπεριφορά και υψηλό ρεύμα σκότους, ή ακόμα και ηλεκτρική εκκένωση σε ακραίες περιπτώσεις.

8.4.2 Χρονική απόκριση

Η απόκριση του φωτοπολλαπλασιαστή σε έναν παλμό φωτός σχεδόν μηδενικής διάρκειας εξαρτάται από τις τροχιές των ηλεκτρονίων μέσα στον σωλήνα. Τα φωτοηλεκτρόνια που δημιουργούνται από τον παλμό φωτός εκπέμπονται από διαφορετικά σημεία της φωτοκαθόδου, με διαφορετικές κινητικές ενέργειες, και ακολουθούν διαφορετικές τροχιές προς την πρώτη δύνοδο. Τα ίδια φαινόμενα παρατηρούνται ανάμεσα και στις υπόλοιπες δυνόδους. Παρατηρείται λοιπόν μια διασπορά στους χρόνους άφιξης των διαφόρων ηλεκτρονίων, η οποία είναι μεγαλύτερη στην άνοδο.

Το σήμα εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα μεγέθη (βλ. Σχ. 8.13):



Σχήμα 8.13.
Η χρονική απόκριση του φωτοπολλαπλασιαστή (PM).

- Χρόνος ανόδου, t_r . Τυπικές τιμές: 1,5 –15 ns.
- Πλήρες εύρος στο ήμισυ του μεγίστου, $t(fwhm)$. Τυπικές τιμές: 2 –20 ns.
- Χρόνος διέλευσης, t_t . Τυπικές τιμές: 20 –100 ns.

Αυτά τα μεγέθη ορίζονται στο Σχ. 8.13.

Η ζώνη συχνοτήτων της απόκρισης του φωτοπολλαπλασιαστή εκτείνεται από 0 (dc) μέχρι τη συχνότητα

$$f(3\text{ dB}) = \frac{1}{3t_r} \quad (\text{σε Hz όταν ο } t_r \text{ είναι σε s.}) \quad (8.7)$$

Η μεταβολή του χρόνου διέλευσης t_t από έναν παλμό φωτός σε έναν άλλο, είναι σημαντική όταν ο PM χρησιμοποιείται για την καταγραφή των χρόνων κατά τους οποίους κάποια γεγονότα συμβαίνουν. Η τυπική απόκλιση σ πολλών μετρήσεων του χρόνου διέλευσης t_t δίνεται ως μέτρο της διασποράς του t_t (*transit time jitter*). Τυπικές τιμές του σ είναι 0,5 –5 ns.

Οι φωτοπολλαπλασιαστές με επιπεδόκοιλα παράθυρα ή/και με εστίαση, έχουν την καλύτερη χρονική απόκριση. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη χρονική απόκριση ενός PM είναι:

- Ο αριθμός των δυνόδων. Λιγότερες δύνοδοι δίνουν καλύτερη χρονική συμπεριφορά του PM.
- Η ολική υψηλή τάση. Μεγαλύτερη υψηλή τάση βελτιώνει τη χρονική συμπεριφορά του PM.
- Η διάμετρος της φωτοκαθόδου. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν φωτίζεται μόνον η κεντρική περιοχή της φωτοκαθόδου.

8.4.3 Γραμμικότητα και μέγιστο ρεύμα

8.4.3.1 Όρια για λειτουργία με συνεχές ρεύμα

Μεγάλες τιμές του μέσου ρεύματος της ανόδου μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα κόπωσης και να μειώσει τη διάρκεια ζωής ενός PM. Το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα ανόδου είναι 100 μA , με τα καλύτερα αποτελέσματα ευστάθειας του PM να επιτυγχάνονται για ρεύματα ανόδου μικρότερα από 10 μA . Με σωστό σχεδιασμό, όλα τα μέρη του PM λειτουργούν γραμμικά μέσα σε όρια $\pm 1\%$, για ρεύματα ανόδου μέχρι και 100 μA .

Υπάρχουν επίσης και όρια στο μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα από τη φωτοκάθοδο, λόγω περιορισμών που θέτει η ηλεκτρική αγωγιμότητα του στρώματος του φωτοευαίσθητου υλικού. Στους 20 °C, τυπικές μέγιστες τιμές του ρεύματος της φωτοκαθόδου για καλή (γραμμική) απόκριση είναι 2,5 – 250 nA/cm², αναλόγως του υλικού της φωτοκαθόδου.

8.4.3.2 Όρια για λειτουργία με ρεύμα σε μορφή παλμών

Ρεύματα σε μορφή παλμών μεγαλύτερα από 100 μA μπορούν να αντληθούν, με την προϋπόθεση ότι το μέσο ρεύμα ανόδου σε διάστημα ενός δευτερολέπτου είναι μικρότερο των 100 μA .

8.4.4 Θόρυβος, Ρεύμα Σκότους και Παλμοί Σκότους

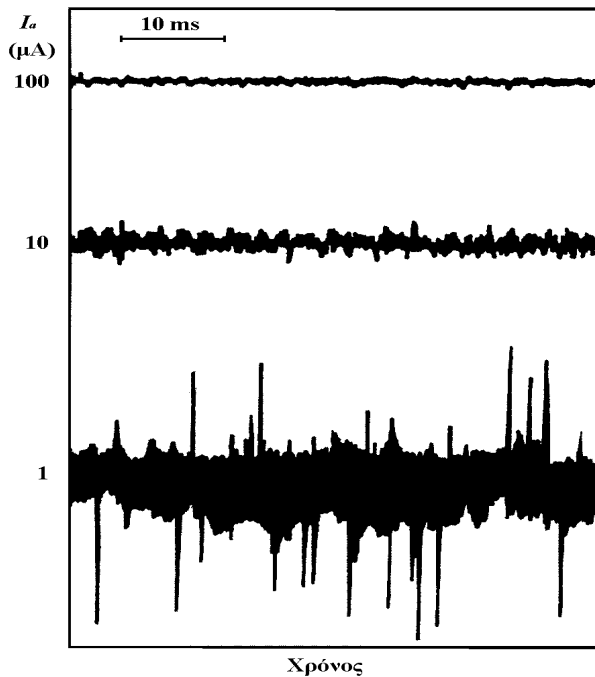
Οι κύριοι τρόποι λειτουργίας ενός φωτοπολλαπλασιαστή είναι δύο:

- (α) Συνεχούς μεταβολής (ή dc), και
- (β) Καταγραφής παλμών.

Παράδειγμα του τρόπου (α) είναι η σάρωση ενός φιλμ, κατά την οποία η ένταση του φωτός είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη σε μεγάλη εύρος τιμών, με απότομες αλλαγές στην τιμή της έντασης. Για τους σκοπούς αυτούς, απαιτείται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα για την επεξεργασία του σήματος να έχουν απόκριση σε μια ζώνη συχνοτήτων εύρους της τάξης των 3 MHz, για να είναι δυνατή η πιστή παρακολούθηση των μεταβολών στην ένταση του φωτός.

Παράδειγμα του τρόπου (β) είναι η καταγραφή των σημάτων από ένα σπινθηριστή Na(Tl), οι οποίοι έχουν χρόνο μείωσης $\tau_s = 230 \text{ ns}$, ενώ μεταξύ των παλμών το σήμα μηδενίζεται.

Θα εξετάσουμε πώς οι στατιστικές διακυμάνσεις των μετρούμενων μεγεθών και το ρεύμα σκότους του φωτοπολλαπλασιαστή επηρεάζουν τη λειτουργία του στους δύο τρόπους που αναφέρθηκαν.



Αν καταγράψουμε το σήμα στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή όταν η ένταση του φωτός παραμένει σταθερή, θα παρατηρήσουμε μια διακύμανση να επιπροστίθεται σε ένα σταθερό σήμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 8.14.

Σχήμα 8.14.

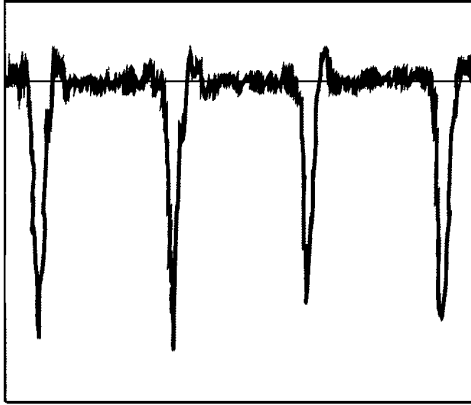
Το σήμα στην έξοδο ενός φωτοπολλαπλασιαστή με ενίσχυση ίση με $G=10^6$, για τρεις σταθερές εντάσεις φωτός. Ο θόρυβος στο σήμα είναι ορατός. Να σημειωθεί ότι η κλίμακα του ρεύματος είναι λογαριθμική.

Οι πηγές των διακυμάνσεων στο σήμα εξόδου του PM είναι δύο:

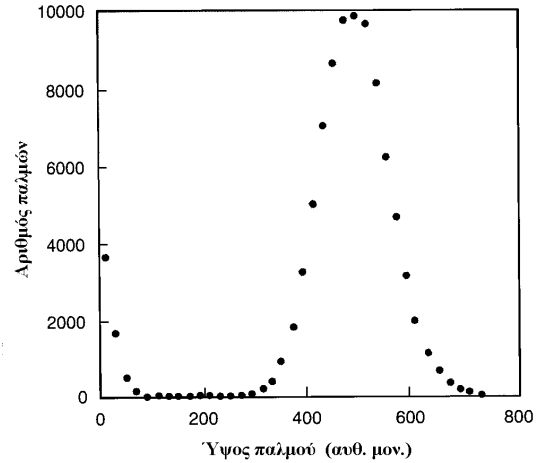
- (α) Η συνεισφορά του ρεύματος σκότους, και
- (β) Τα φαινόμενα στατιστικού θορύβου στο σήμα.

Όπως το όνομα υποδηλώνει, το *ρεύμα σκότους* είναι ένα ρεύμα που είναι παρόν ακόμη και όταν δεν υπάρχει προσπίπτον φως στην είσοδο του φωτοπολλαπλασιαστή. Οι δύο αυτές πηγές θορύβου θα εξετασθούν παρακάτω.

Στη χρήση του φωτοπολλαπλασιαστή με καταγραφή παλμών είναι σημαντικό το σχήμα του παλμού να διατηρείται, ιδιαιτέρως το ύψος του. Η επίδραση του θορύβου στο ύψος του παλμού φαίνεται στο Σχ. 8.15, για παλμούς φωτός που ρυθμίστηκαν έτσι ώστε να προκαλούν την εκπομπή, κατά μέσον όρο, 100 φωτοηλεκτρονίων ο καθένας. Παρατηρείται μια διακύμανση στα ύψη και στα εμβαδά των παλμών (που αντιστοιχούν στο ολικό φορτίο στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή). Η κατανομή των υψών των παλμών του Σχ. 8.15 φαίνεται στο Σχ. 8.16.



Σχήμα 8.15. Παλμοί των 100 φωτοηλεκτρονίων ο καθένας, το σχήμα των οποίων τροποποιείται από το θόρυβο.



Σχήμα 8.16. Η κατανομή του ύψους των παλμών του Σχ. 8.15.

8.4.4.1 Θόρυβος

Όπως σε όλα τα μετρητικά συστήματα, έτσι και στον φωτοπολλαπλασιαστή το σήμα στην έξοδο συνοδεύεται από θόρυβο. Ο θόρυβος αυτός προέρχεται

- A. Από τη στατιστική διακύμανση στον αριθμό των φωτοηλεκτρονίων που παράγονται στη φωτοκάθοδο (*θόρυβος φωτοκαθόδου*), και
- B. Από τη στατιστική διακύμανση στον αριθμό των δευτερογενών ηλεκτρονίων που παράγονται στις δυνόδους ανά προσπίπτον ηλεκτρόνιο (*θόρυβος πολλαπλασιασμού ηλεκτρονίων*).

A. Θόρυβος φωτοκαθόδου.

Έστω ότι σταθερή ροή φωτός παράγει στη φωτοκάθοδο M φωτοηλεκτρόνια ανά μονάδα χρόνου. Ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που παράγονται στη φωτοκάθοδο, λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, παρουσιάζει διακυμάνσεις οι οποίες περιγράφονται από την κατανομή Poisson. Έτσι, αν το σήμα εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή μετρηθεί για χρονικό διάστημα T , θα μετρηθούν συνολικά, κατά μέσον όρο,

$$MT \pm \sqrt{MT} \quad (8.8)$$

φωτοηλεκτρόνια, όπου \sqrt{MT} είναι η τυπική απόκλιση στον αριθμό MT , σύμφωνα με την κατανομή Poisson. Ο λόγος του σήματος προς τον θόρυβο θα είναι επομένως ίσος με

$$S/N = \frac{MT}{\sqrt{MT}} = \sqrt{MT}. \quad (8.9)$$

Στην καλύτερη περίπτωση, αν δηλαδή δεν υπήρχε άλλη πηγή θορύβου στον φωτοπολλαπλασιαστή, αυτός θα ήταν ο λόγος S/N στην έξοδο. Για τους παλμούς του Σχ. 8.15, στον καθένα από τους οποίους έχουμε συνολικά 100 φωτοηλεκτρόνια, η τυπική απόκλιση στο συνολικό φορτίο του κάθε παλμού θα είναι ανάλογη του $\sqrt{100} = 10$, και ο λόγος S/N θα είναι 0,10.

Για λειτουργία συνεχούς μεταβολής, το φαινόμενο πρέπει να εξετασθεί πιο γενικά, λαμβάνοντας υπόψη το εύρος της ζώνης συχνοτήτων απόκρισης του ηλεκτρονικού

μετρητικού συστήματος, στον υπολογισμό του σχετικού χρόνου T . Η θεωρία του *στοχαστικού ηλεκτρικού θορύβου*, προβλέπει τον θόρυβο (rms), i_{rms} , στο ρεύμα I_{κ} της φωτοκαθόδου ως

$$i_{rms} \equiv \sqrt{i_{\kappa}^2} = \sqrt{2eI_{\kappa} \Delta f}, \quad (8.10)$$

όπου e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου και Δf είναι το εύρος της ζώνης συχνοτήτων του μετρητικού συστήματος. Και πάλι, στην καλύτερη περίπτωση που δεν υπάρχει άλλη πηγή θορύβου στον φωτοπολλαπλασιαστή, ο λόγος S/N στην έξοδο θα ήταν

$$S/N = \frac{I_{\kappa}}{i_{rms}} = \frac{I_{\kappa}}{\sqrt{2eI_{\kappa} \Delta f}} = \sqrt{\frac{I_{\kappa}}{2e \Delta f}}. \quad (8.11)$$

Για φορτίο αποτελούμενο από παράλληλο συνδυασμό μιας αντίστασης R και ενός πυκνωτή χωρητικότητας C , είναι $\Delta f = 1/4RC$. Προφανώς, όσο μικρότερο είναι το Δf , ή, ισοδύναμα, όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά χρόνου του μετρητικού συστήματος, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο, S/N . Βεβαίως αυτό επιτυγχάνεται εις βάρος της ταχύτητας με την οποία θα είναι ικανό το σύστημα να ανταποκριθεί σε μεταβολές στο σήμα (θεώρημα εύρους ζώνης!). Για παράδειγμα, στη σάρωση φωτογραφικού φιλμ, αν είναι επιθυμητή μια τιμή $S/N \geq 100$ και το εύρος της ζώνης συχνοτήτων του μετρητικού συστήματος είναι $\Delta f = 3 \text{ MHz}$, τότε θα πρέπει να είναι $I_{\kappa} \geq 10^{-8} \text{ A}$.

B. Θόρυβος πολλαπλασιασμού ηλεκτρονίων.

Ο πολλαπλασιασμός των ηλεκτρονίων δεν γίνεται με ιδανικό τρόπο. Ο συντελεστής δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων, δ_i , από μια δύνοδο δεν είναι απολύτως σταθερός αριθμός, αλλά κυμαίνεται γύρω από μια μέση τιμή $\bar{\delta}$. Ο πολλαπλασιασμός των ηλεκτρονίων στην πρώτη δύνοδο παίζει το σημαντικότερο ρόλο στη διακύμανση του ολικού παράγοντα πολλαπλασιασμού των ηλεκτρονίων, γιατί ο αριθμός των ηλεκτρονίων, N , εκεί είναι ο μικρότερος, και η διακύμανσή του, \sqrt{N} , είναι αναλογικά μεγαλύτερη από ό,τι στα κατοπινότερα στάδια πολλαπλασιασμού. Συγκεκριμένα, η ποσοστιαία διακύμανση είναι της τάξης του $\sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N}$. Στις τελευταίες δυνόδους, λόγω του μεγάλου αριθμού των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων, ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας δεν αποκλίνει πολύ από τη μέση του τιμή.

Για πληρότητα, οι σχέσεις των Εξ. (8.9) και (8.11) πρέπει να διαιρεθούν με ένα παράγοντα

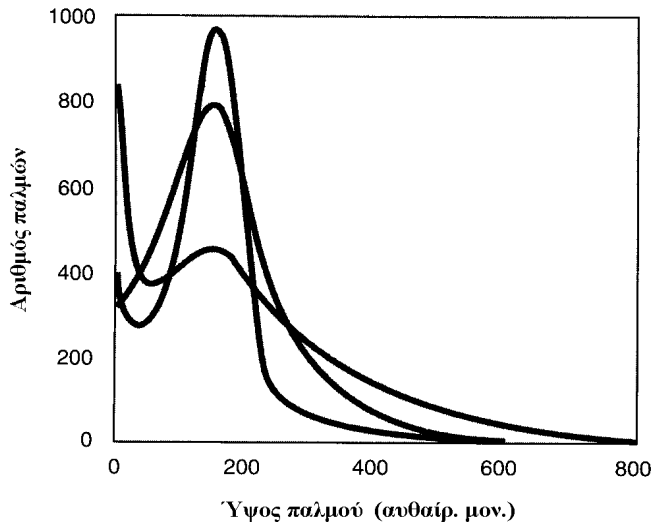
$$a = \sqrt{\frac{\bar{\delta}}{\bar{\delta} - 1}}, \quad (8.12)$$

για πολλαπλασιαστική διαδικασία που διέπεται από τη στατιστική Poisson. Έτσι γίνονται αντίστοιχα:

$$S/N = \sqrt{MT} \frac{1}{a} \quad (8.13)$$

και

$$S/N = \sqrt{\frac{I_{\kappa}}{2e \Delta f}} \frac{1}{a}. \quad (8.14)$$

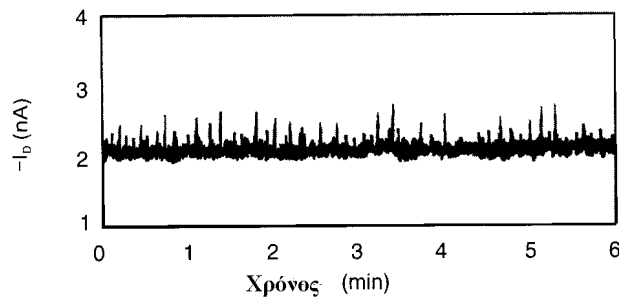


Σχήμα 8.17. Η κατανομή του ύψους των παλμών στην έξοδο φωτοπολλαπλασιαστή, από μοναδικά φωτοηλεκτρόνια, για τρεις διαφορετικούς τύπους PM της EMI.

την Εξ. (8.12) κυμαίνονται μεταξύ 1,03 και 1,05 για διάφορους φωτοπολλαπλασιαστές, στην πράξη βρίσκονται τιμές μεταξύ 1,13 και 1,26 αντίστοιχα.

8.4.4.2 Ρεύμα Σκότους και Παλμοί Σκότους

Στην έξοδο ενός φωτοπολλαπλασιαστή υπάρχει σήμα ακόμη και όταν δεν υπάρχει φωτεινό σήμα στην είσοδο. Το σήμα αυτό, που γενικά ονομάζεται *υπόστρωμα*, ονομάζεται *ρεύμα σκότους* όταν ο PM λειτουργεί στον τρόπο συνεχούς μεταβολής (dc), και *παλμοί σκότους* όταν ο PM λειτουργεί στον τρόπο καταγραφής παλμών.



Σχήμα 8.18. Ρεύμα σκότους ενός PM με λεπτό παράθυρο χαλαζία, με ενίσχυση 2×10^7 .

Το φάσμα των παλμών σκότους

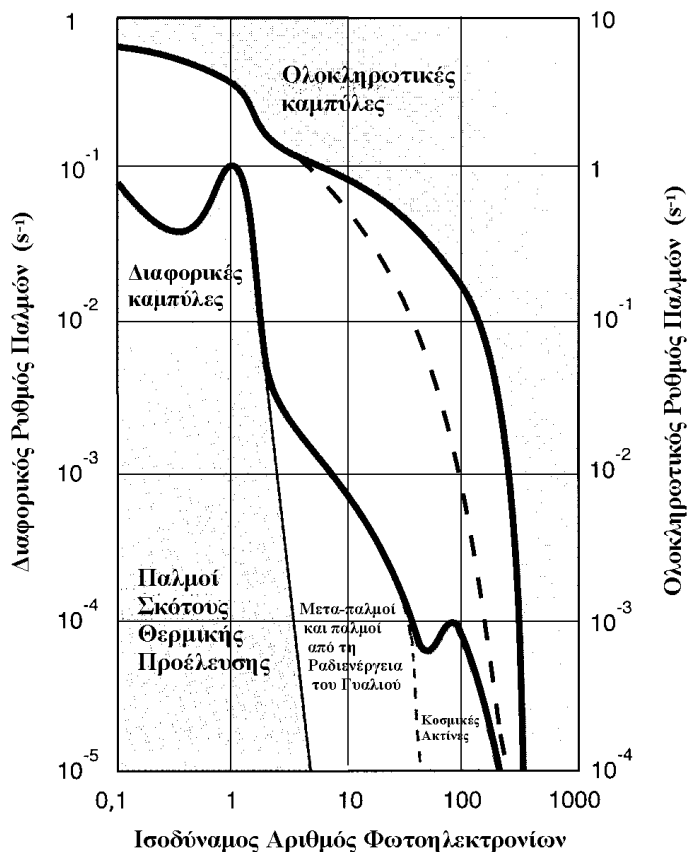
Το Σχ. 8.19 δίνει το φάσμα των παλμών σκότους συναρτήσει του ύψους τους. Οι κλίμακες είναι λογαριθμικές. Το ύψος είναι εκπεφρασμένο σε ισοδύναμο αριθμό φωτοηλεκτρονίων στη φωτοκάθοδο που θα προκαλούσαν παλμό του ίδιου ύψους στην έξοδο. Τα διαφορικά φάσματα των τριών κυρίων πηγών παλμών δίνονται με λεπτές γραμμές, με άθροιση όπου αυτά επικαλύπτονται. Στα διαφορικά φάσματα δίνονται οι

Στην πραγματικότητα το φαινόμενο είναι πιο πολύπλοκο και δεν περιγράφεται ικανοποιητικά από τη στατιστική Poisson. Η κατάσταση είναι χειρότερη από αυτήν που περιγράφουν οι Εξ. (8.13) και (8.14).

Για παλμούς που προέρχονται από μοναδικά φωτόνια, και επομένως και μοναδικά φωτοηλεκτρόνια στην κάθοδο, η κατανομή των υψών των παλμών στην έξοδο βρίσκεται πειραματικά ότι είναι όπως αυτή που φαίνεται στο Σχ. 8.17.

Έτσι, ενώ οι παράγοντες a που υπολογίζονται από

Στο Σχ. 8.18, φαίνεται, συναρτήσει του χρόνου, η καταγραφή του ρεύματος σκότους από έναν τυπικό PM, με παράθυρο χαλαζία, που λειτουργεί σε ενίσχυση 2×10^7 . Εκτός από την κύρια συνιστώσα με μέση τιμή περίπου 2 nA και τη διακύμανσή της, στο σχήμα φαίνονται και παλμοί σε τυχαίες χρονικές στιγμές.



Σχήμα 8.19. Το φάσμα των παλμών σκότους ενός PM στους 20 °C. Η κλίμακα του ύψους των παλμών δίνεται σε ισοδύναμο αριθμό φωτοηλεκτρονίων που θα προκαλούσαν παλμό του ίδιου ύψους.

Η κάτω χοντρή καμπύλη (αριστερή κλίμακα) δίνει το ολικό διαφορικό φάσμα, και αναλύεται σε τρεις συνιστώσες, ανάλογα με την προέλευση των παλμών.

Η δύο άνω χοντρές καμπύλες (δεξιά κλίμακα) δίνουν τα ολοκληρωτικά φάσματα. Η συνεχής γραμμή για PM στην επιφάνεια της γης, ενώ η διακεκομμένη σε βάθος 30 m κάτω από το έδαφος, όπου η κοσμική ακτινοβολία είναι μειωμένη.

ρυθμοί σε παλμούς ανά δευτερόλεπτο ανά μονάδα διαστήματος αριθμού φωτοηλεκτρονίων. Έτσι, για παλμούς ύψους ισοδύναμου με ένα φωτοηλεκτρόνιο παρατηρείται ένα μέγιστο στο ρυθμό, της τάξης του $0,1 \text{ s}^{-1}$, ή ενός παλμού ανά 10 δευτερόλεπτα. Η κάτω χοντρή γραμμή στο σχήμα δίνει το αθροιστικό διαφορικό φάσμα από όλες τις πηγές προέλευσης.

Η άνω συνεχής χοντρή γραμμή δίνει το ολοκληρωτικό φάσμα, δηλαδή το ρυθμό παλμών με ύψος πάνω από κάθε τιμή του άξονα του ύψους των παλμών. Για παράδειγμα, παλμοί με οποιοδήποτε ισοδύναμο ύψους άνω των 10 φωτοηλεκτρονίων παρατηρούνται με ρυθμό περίπου ένας το δευτερόλεπτο, ενώ για ύψος άνω των 100 φωτοηλεκτρονίων, ο ρυθμός είναι περίπου 10^{-3} το δευτερόλεπτο. Η κάτω (διακεκομμένη) χοντρή γραμμή δίνει τον ολοκληρωτικό ρυθμό για έναν φωτοπολλαπλασιαστή που βρίσκεται σε βάθος 30 μέτρων κάτω από το έδαφος, όπου η κοσμική ακτινοβολία είναι μειωμένη.

Οι παλμοί χαμηλού ύψους έχουν κυρίως θερμική προέλευση, όπως π.χ. την εκπομπή ενός ηλεκτρονίου από την πρώτη δυνόδο ή (για παλμούς μικρότερου ύψους) και από τις άλλες δυνόδους. Η διακύμανση στον ηλεκτρονικό θόρυβο προκαλεί επίσης παλμούς μικρού ύψους. Οι παλμοί με ύψος ισοδύναμο με 3 έως 30 φωτοηλεκτρόνια οφείλονται κυρίως σε ραδιενεργές διασπάσεις στο υλικό του γυαλιού (π.χ. κάλιο-40). Οι πιο μεγάλοι παλμοί οφείλονται στην κοσμική ακτινοβολία, όπως φαίνεται από το γεγονός ότι ο ρυθμός τους μειώνεται δραστικά με το βάθος κάτω από το έδαφος. Οι παλμοί αυτοί είναι βεβαίως πιο σπάνιοι, με ρυθμό μικρότερο από έναν παλμό ανά 10000 s για ισοδύναμο ύψους 100 φωτοηλεκτρονίων.

Με αναφορά στο Σχ. 8.19, θα αναφέρουμε τις κυριότερες κατηγορίες θορύβου σε ένα φωτοπολλαπλασιαστή:

(α) *Παλμοί ισοδύναμοι με < 0,5 φωτοηλεκτρόνια.*

Ένα ποσοστό αυτών των παλμών οφείλεται στη στατιστική φύση της ενίσχυσης του φωτοπολλαπλασιαστή. Η θερμιοδική εκπομπή ηλεκτρονίων από τις δυνόδους, και δευτερογενή ηλεκτρόνια που προκαλούνται από την πρόσκρουση βαρέων ιόντων στις δυνόδους επίσης συνεισφέρουν.

(β) *Παλμοί ισοδύναμοι με 0,5 έως 2 φωτοηλεκτρόνια.*

Η θερμιοδική εκπομπή, κυρίως από τη φωτοκάθοδο, είναι η κύρια πηγή αυτών των παλμών. Με ψύξη της φωτοκάθοδου, όμως, παραμένει ένα ποσοστό, το οποίο αποδίδεται κυρίως στη φυσική ραδιενέργεια.

(γ) *Παλμοί ισοδύναμοι με 2 έως 15 φωτοηλεκτρόνια.*

Οι παλμοί αυτοί οφείλονται στους λεγόμενους μεταπαλμούς και στη φυσική ραδιενέργεια στο παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή.

Υπάρχει μια πιθανότητα ότι ένας παλμός θα ακολουθηθεί από ένα δορυφορικό παλμό ή μεταπαλμό. Αυτοί προκαλούνται από τον ιονισμό του εναπομένου στο σωλήνα αερίου, ο οποίος οφείλεται στα ενεργειακά ηλεκτρόνια του αρχικού παλμού. Το μέγεθος του μεταπαλμού εξαρτάται από το εάν το ιόν που παράγεται θα φθάσει στη φωτοκάθοδο ή σε μια από τις δυνόδους.

Στο παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή υπάρχουν πάντοτε ίχνη των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων, όπως τα ^{40}K , ^{238}U και ^{232}Th . Τα σωματίδια α και β από αυτά τα ισότοπα προκαλούν φως ως ακτινοβολία Τσερένκοφ, ή ηλεκτρόνια με αλληλεπίδραση με τη φωτοκάθοδο. Κατάλληλη επιλογή του υλικού του παραθύρου μπορεί να περιορίσει αυτούς τους παλμούς.

(δ) *Παλμοί ισοδύναμοι με > 15 φωτοηλεκτρόνια.*

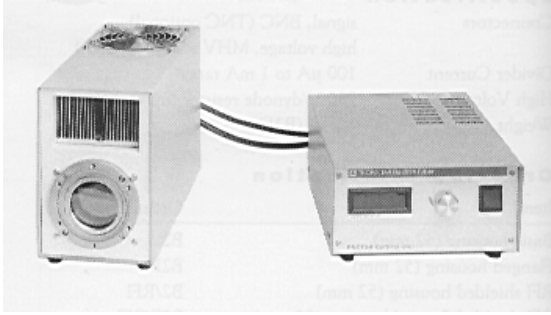
Αυτοί είναι μεγάλοι παλμοί που οφείλονται στη διέλευση, μέσα από το παράθυρο του PM, σωματιδίων από τις κοσμικές ακτινοβολίες, κυρίως μιονίων (μ^\pm) και ηλεκτρονίων. Στην επιφάνεια της θάλασσας, ο ρυθμός αυτών των παλμών είναι περίπου 15 το λεπτό, για παράθυρο διαμέτρου 51 mm. Τα σχετικιστικά σωματίδια προκαλούν και εκπομπή ακτινοβολίας Τσερένκοφ στο γυαλί του παραθύρου. Αυτό είναι χειρότερο σε παράθυρα χαλαζία, γιατί η ακτινοβολία αυτή βρίσκεται στην περιοχή του υπεριώδους. Σε όλες τις περιπτώσεις, μετά τον κύριο παλμό ακολουθούν μέχρι και 50 μικρότεροι παλμοί, ισοδύναμοι με ένα φωτοηλεκτρόνιο, σε διάστημα μέχρι και 100 μs .

8.4.4.3 Μείωση του Θορύβου με Χρήση Φωτοκάθοδου Μικρής Επιφάνειας

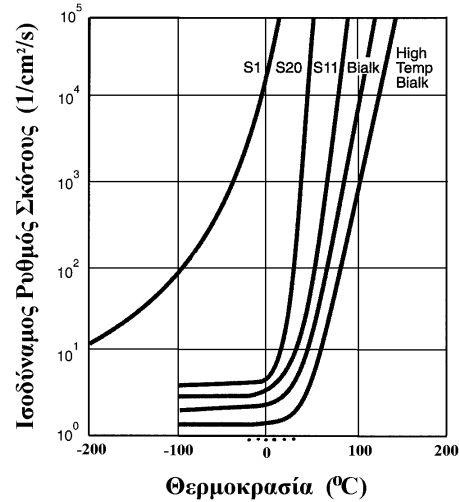
Είναι προφανές ότι ο θόρυβος που έχει προέλευση τη φωτοκάθοδο μπορεί να περιοριστεί αν η επιφάνεια της φωτοκάθοδου είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Το ίδιο ισχύει και για τον θόρυβο που προέρχεται από το παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή. Όταν χρησιμοποιείται φωτοκάθοδος μικρού εμβαδού, πιθανόν να απαιτηθεί εστίαση του προσπίπτοντος σε αυτήν φωτός με τη χρήση φακών.

8.4.4.4 Μείωση του Θορύβου με Ψύξη του Φωτοπολλαπλασιαστή

Ο θόρυβος στον φωτοπολλαπλασιαστή, που οφείλεται σε θερμικά αίτια, μπορεί να μειωθεί με τη ψύξη. Η μείωση εξαρτάται από τη μείωση της θερμοκρασίας και το είδος της φωτοκάθοδου. Στο Σχ. 8.20 φαίνεται ένας θάλαμος, της Thorn EMI, για ψύξη ενός φωτοπολλαπλασιαστή μέχρι και 50 °C κάτω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, με σταθερότητα στη θερμοκρασία με ακρίβεια $\pm 0,1^\circ\text{C}$.



Σχήμα 8.20. Θάλαμος (αριστερά) για ψύξη φωτοπολλαπλασιαστή, με τη μονάδα ελέγχου και τροφοδοτικό (δεξιά). Ο PM μπορεί να ψυχθεί έως και 50 °C κάτω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή με ακρίβεια $\pm 0,1^\circ\text{C}$ για μεταβολές μέχρι και $\pm 5^\circ\text{C}$ στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 8.21. Ο ρυθμός παλμών σκότους, συναρτήσει της θερμοκρασίας, για διάφορα είδη φωτοκαθόδου.

Στο Σχ. 8.21 φαίνεται η μείωση του ρυθμού παλμών σκότους, συναρτήσει της θερμοκρασίας, για διάφορα είδη φωτοκαθόδου. Κάτω από κάποια θερμοκρασία, φαίνεται ότι περαιτέρω ψύξη δεν μειώνει το θόρυβο. Ο εναπομένον θόρυβος οφείλεται στους μεταπαλμούς, στη φυσική ραδιενέργεια και στην κοσμική ακτινοβολία. Για τις περισσότερες φωτοκαθόδους, αυτό σημαίνει ότι δεν προκύπτει βελτίωση με ψύξη κάτω από -25°C .

8.4.4.5 Μείωση του Θορύβου με Επιλογή του Υλικού του Παραθύρου του PM

Ο θόρυβος στον φωτοπολλαπλασιαστή, που οφείλεται στη φυσική ραδιενέργεια του υλικού από το οποίο αυτός έχει κατασκευαστεί, μπορεί να μειωθεί δραστικά με την κατάλληλη επιλογή αυτού του υλικού. Το παράθυρο είναι κυρίως αυτό που συνεισφέρει, και έτσι η επιλογή γίνεται συνήθως για το υλικό του παραθύρου.

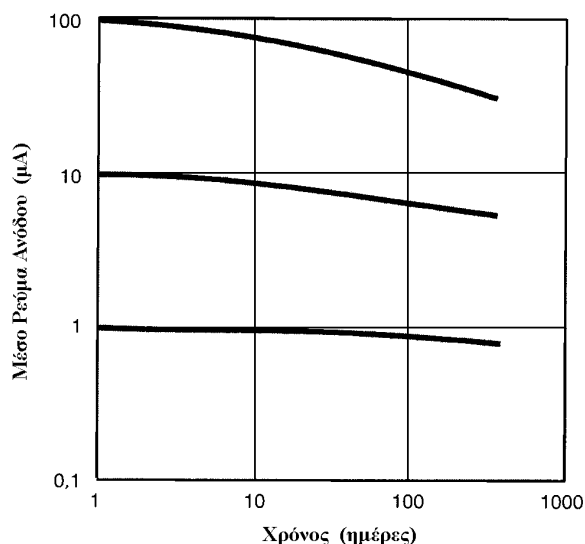
Το κοινό γυαλί περιέχει μέχρι και 60000 ppm K, 1000 ppb Th και 1000 ppb U (ppm = parts per million = μέρη στο εκατομμύριο, ppb = parts per billion = μέρη στο δισεκατομμύριο). Αυτό σημαίνει ότι σε ένα παράθυρο διαμέτρου 50 mm και μάζας 30 g συμβαίνουν περίπου 400 ραδιενεργές διασπάσεις το λεπτό. Σε αυτές εκπέμπονται ακτίνες γ και ένα συνεχές φάσμα ακτίνων β . Ο ρυθμός παλμών που ανιχνεύεται στον φωτοπολλαπλασιαστή λόγω αυτών μπορεί να φθάσει τους 100 παλμούς το λεπτό. Με την κατάλληλη επιλογή του γυαλιού για χαμηλή ραδιενέργεια, αυτός ο ρυθμός μειώνεται κατά ένα παράγοντα 100 σε περίπου 1 παλμό το λεπτό, ενώ η χρήση χαλαζία για παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή ο ρυθμός μειώνεται μέχρι και σε 0,1 παλμό το λεπτό. Οι τιμές αυτές βεβαίως εξαρτώνται δραστικά από το επίπεδο στο οποίο έχει ρυθμιστεί το κατώφλι αποδοχής των παλμών που καταμετρούνται.

8.4.5 Η ευστάθεια του φωτοπολλαπλασιαστή

Η ευστάθεια ενός φωτοπολλαπλασιαστή μεταβάλλεται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Με τον χρόνο, καθώς διατηρούνται σταθερά η ένταση του προσπίπτοντος φωτός, η υψηλή τάση και οι συνθήκες περιβάλλοντος.

- Κατά την αφαίρεση και επανεφαρμογή της υψηλής τάσης ή του προσπίπτοντος φωτός.
- Με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ή του εξωτερικού ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου.



Στο Σχ. 8.22 φαίνεται η μεταβολή με τον χρόνο, του ρεύματος ανόδου από φωτοπολλαπλασιαστή με δυνόδους SbCs, κατά τη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας για διάστημα ενός έτους, ενώ η υψηλή τάση και η ένταση του φωτός παραμένουν σταθερά. Φαίνεται ότι η ευστάθεια είναι καλύτερη αν το ρεύμα ανόδου διατηρείται σε τιμές μικρότερες του 1 μA .

Σχήμα 8.22. Η μεταβολή με τον χρόνο, του ρεύματος ανόδου από φωτοπολλαπλασιαστή με δυνόδους SbCs.

8.4.6 Επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος στη λειτουργία του φωτοπολλαπλασιαστή

Οι συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, και η έκθεση σε κραδασμούς, ιονιστική ακτινοβολία και σε φως μεγάλης έντασης, επηρεάζουν τη λειτουργία ενός φωτοπολλαπλασιαστή.

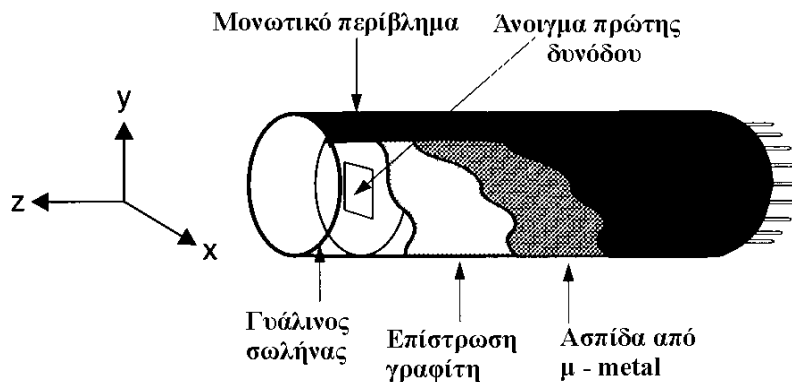
8.4.6.1 Θερμοκρασία

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η θερμοκρασία επηρεάζει το ρεύμα σκότους ενός PM. Χονδρικά μπορούμε να πούμε ότι το ρεύμα σκότους διπλασιάζεται για κάθε αύξηση κατά 5 °C πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου. Η ολική ευαισθησία του PM επίσης επηρεάζεται από τη θερμοκρασία.

Η ενίσχυση ενός PM με δυνόδους από BeCu ή SbCs μεταβάλλεται κατά -0,2% ανά °C. Η ευαισθησία της φωτοκαθόδου μεταβάλλεται κατά ποσοστό της τάξης του -0,3% ανά °C για φως μήκους κύματος 400 nm (ερυθρό).

8.4.6.2 Εξωτερικό μαγνητικό πεδίο

Ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο προκαλεί απόκλιση των φωτοηλεκτρονίων και των δευτερογενών ηλεκτρονίων από τις κανονικές τροχιές τους. Επηρεάζονται έτσι τόσο η απόδοση στη συλλογή των ηλεκτρονίων όσο και η ενίσχυση του πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων. Ασπίδες από ειδικό υλικό (μ -metal) χρησιμοποιούνται για την προάσπιση ενός PM από εξωτερικά μαγνητικά πεδία (βλ. Σχ. 8.23).



Σχήμα 8.23. Η προάσπιση ενός φωτοπολλαπλασιαστή από εξωτερικά μαγνητικά πεδία με χρήση περιβλήματος από μ - metal.

8.4.6.3 Εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο

Τα ηλεκτρικά πεδία επηρεάζουν την ενίσχυση και το ρεύμα σκότους ενός PM. Για προστασία τοποθετείται συνήθως ένα αγωγικό περίβλημα γύρω από τον γυάλινο σωλήνα του PM. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν το περίβλημα αυτό διατηρείται στο δυναμικό της καθόδου του PM.

8.4.6.4 Ιονίζουσες ακτινοβολίες

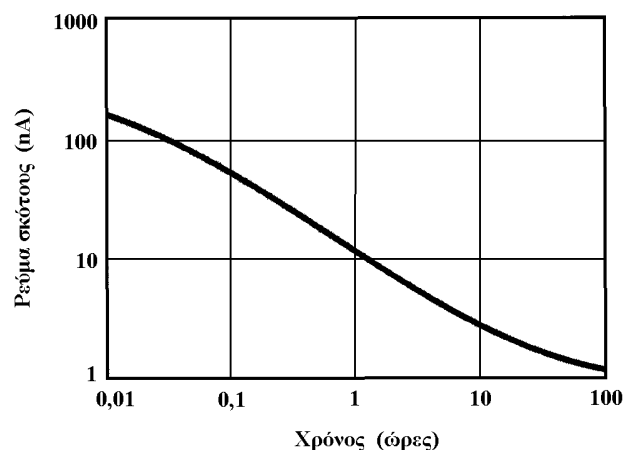
Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του φωτοπολλαπλασιαστή, οι ιονίζουσες ακτινοβολίες προκαλούν παλμούς σκότους, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Μακροχρόνια, η έκθεση ενός PM σε μεγάλες δόσεις ιονίζουσας ακτινοβολίας προκαλεί μεταβολές στη διαφάνεια του γυαλιού. Το γυαλί συνήθως αποκτά ένα καφέ χρώμα. Ως επακόλουθο, η ποσότητα του προσπίπτοντος φωτός που φθάνει στη φωτοκάθοδο μειώνεται.

8.4.6.5 Χτυπήματα και κραδασμοί

Οι κραδασμοί και τα χτυπήματα μπορούν να προκαλέσουν μηχανική ή και ηλεκτρική βλάβη στον φωτοπολλαπλασιαστή.

8.4.6.6 Έκθεση σε έντονο φως

Ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένα όργανο εξαιρετικά ευαίσθητο στο φως. Έκθεση σε πολύ έντονο φως όταν υπάρχει υψηλή τάση κατανεμημένη στις δυνόδους του PM προκαλεί ανεπανόρθωτη βλάβη (κάψιμο του PM). Ακόμη και χωρίς υψηλή τάση, όταν ο PM δεν χρησιμοποιείται, η έκθεσή του σε έντονη φως, όπως π.χ. αυτό της ημέρας, θα επηρεάσει τη λειτουργία του για μεγάλο χρονικό



Σχήμα 8.24. Η μεταβολή του ρεύματος σκότους ενός φωτοπολλαπλασιαστή με παράθυρο χαλαζία, που εξετέθη σε φως της ημέρας για μία ώρα, όταν δεν βρισκόταν σε λειτουργία.

διάστημα. Ιδιαίτερα επιβλαβές είναι το υπεριώδες φως. Ο φωτοπολλαπλασιαστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως μετά την έκθεση στο φως χωρίς να επηρεασθεί η ενίσχυσή του, αλλά το ρεύμα σκότους του PM θα είναι πολύ μεγάλο, και θα απαιτηθεί να κρατηθεί ο PM στο σκοτάδι για να επανέλθει το ρεύμα σκότους του στην κανονική του τιμή (βλ. Σχ. 8.24).

8.4.6.7 Η βλάβη στο φωτοπολλαπλασιαστή που οφείλεται στο ήλιο

Το αέριο ήλιο διαπερνά το γυαλί, και σε μεγαλύτερο βαθμό τον χαλαζία. Το ήλιο είναι χημικώς αδρανές αλλά η παρουσία του προκαλεί αύξηση στο ρυθμό των μεταπαλμών. Σε πιέσεις πάνω από 10^{-2} torr, δημιουργούνται ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ των δυνόδων και ο φωτοπολλαπλασιαστής δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πια.