



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

—— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 ——

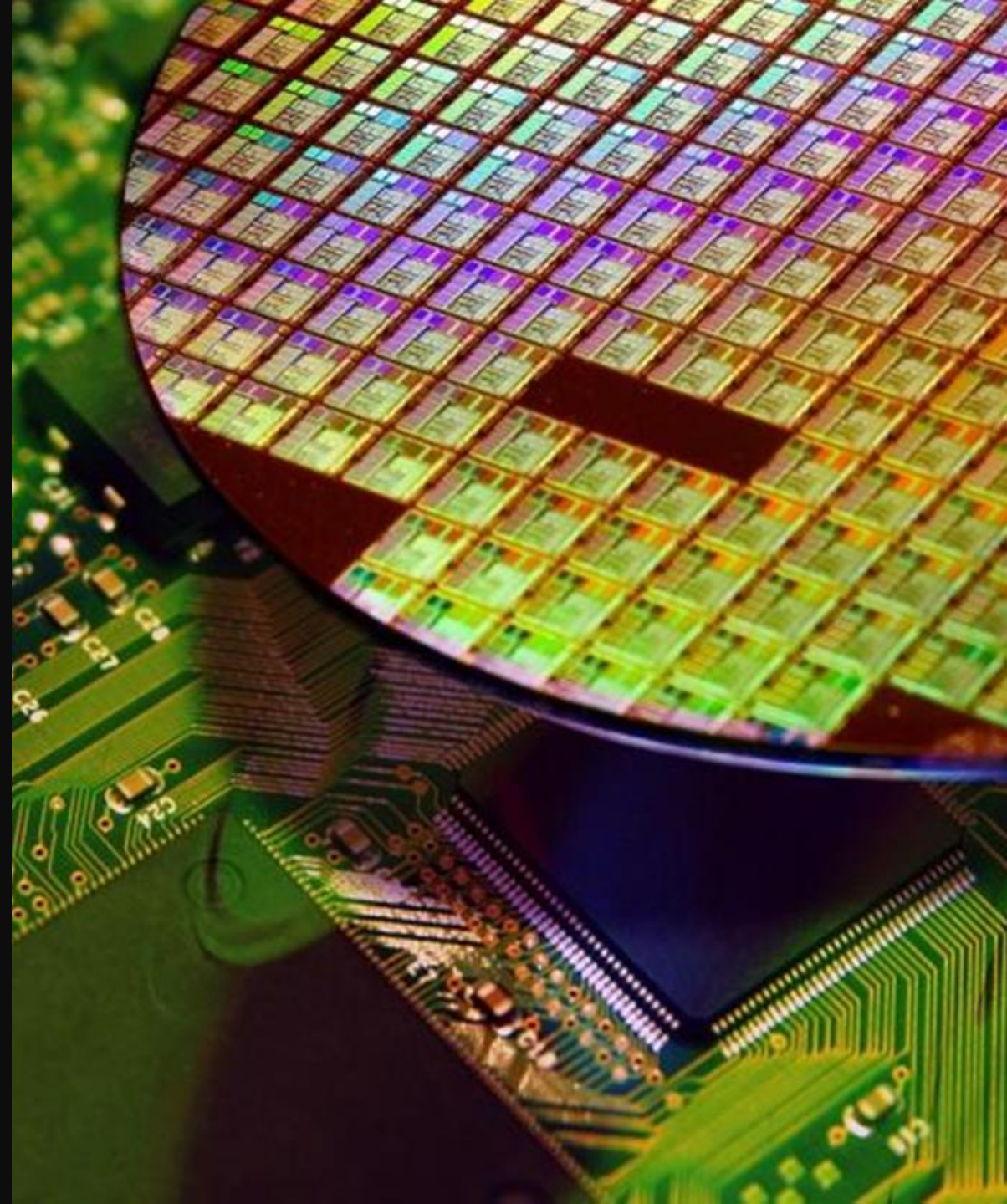
Φωτοπολλαπλασιαστής Πυριτίου (SiPM)

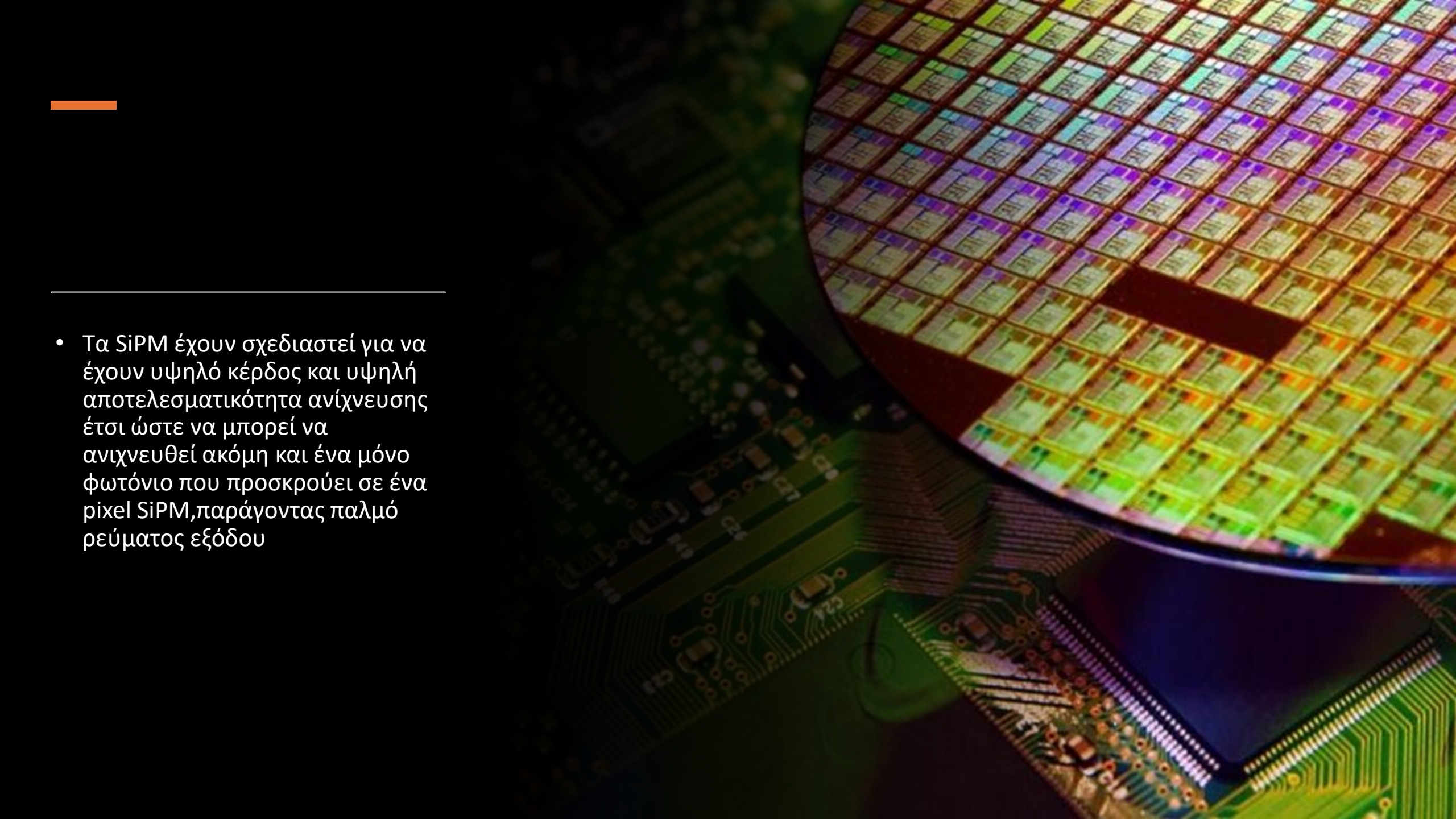
Τι είναι και πως λειτουργεί

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΟΡΛΙΓΚΑΣ

Τι είναι

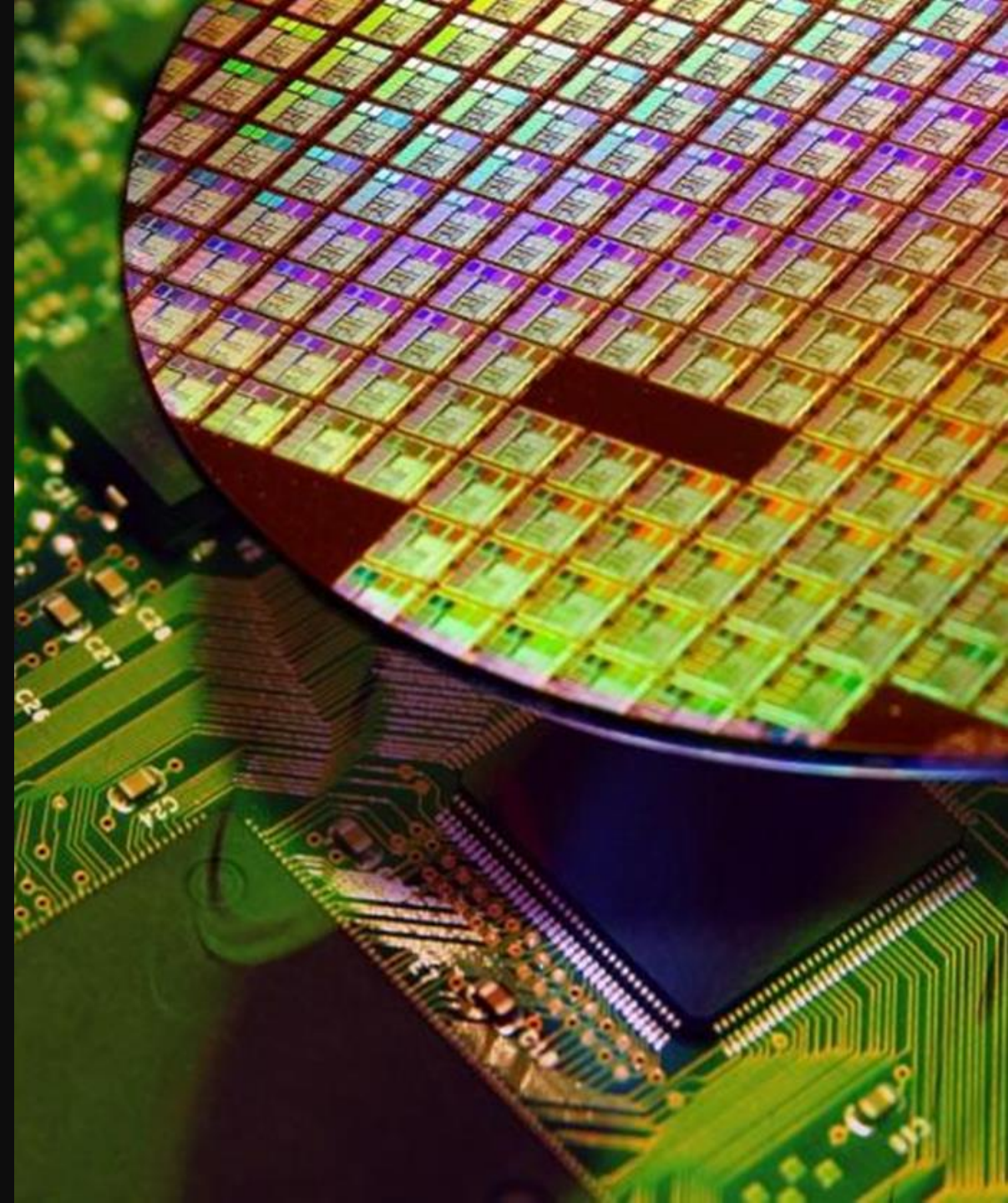
- Ο φωτοπολλαπλασιαστής πυριτίου (SiPM) είναι ένας ανιχνευτής ακτινοβολίας με εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία, υψηλή απόδοση και πολύ χαμηλό χρονικό jitter. Είναι με βάση αναστροφες πολωμένες διόδους p/n (ένωση ημιαγωγών τύπου p και n) και ανιχνεύουν άμεσα το φως από σχεδόν υπεριώδεις έως κοντά στο υπέρυθρο φάσμα. Τα SiPM χρησιμοποιούνται σε όλα αυτές τις εφαρμογές όπου χαμηλά επίπεδα φωτός/ακτινοβολίας πρέπει να μετρηθούν και να ποσοτικοποιηθούν με υψηλή ακρίβεια.
-



- 
- Τα SiPM έχουν σχεδιαστεί για να έχουν υψηλό κέρδος και υψηλή αποτελεσματικότητα ανίχνευσης έτσι ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί ακόμη και ένα μόνο φωτόνιο που προσκρούει σε ένα pixel SiPM, παράγοντας παλμό ρεύματος εξόδου

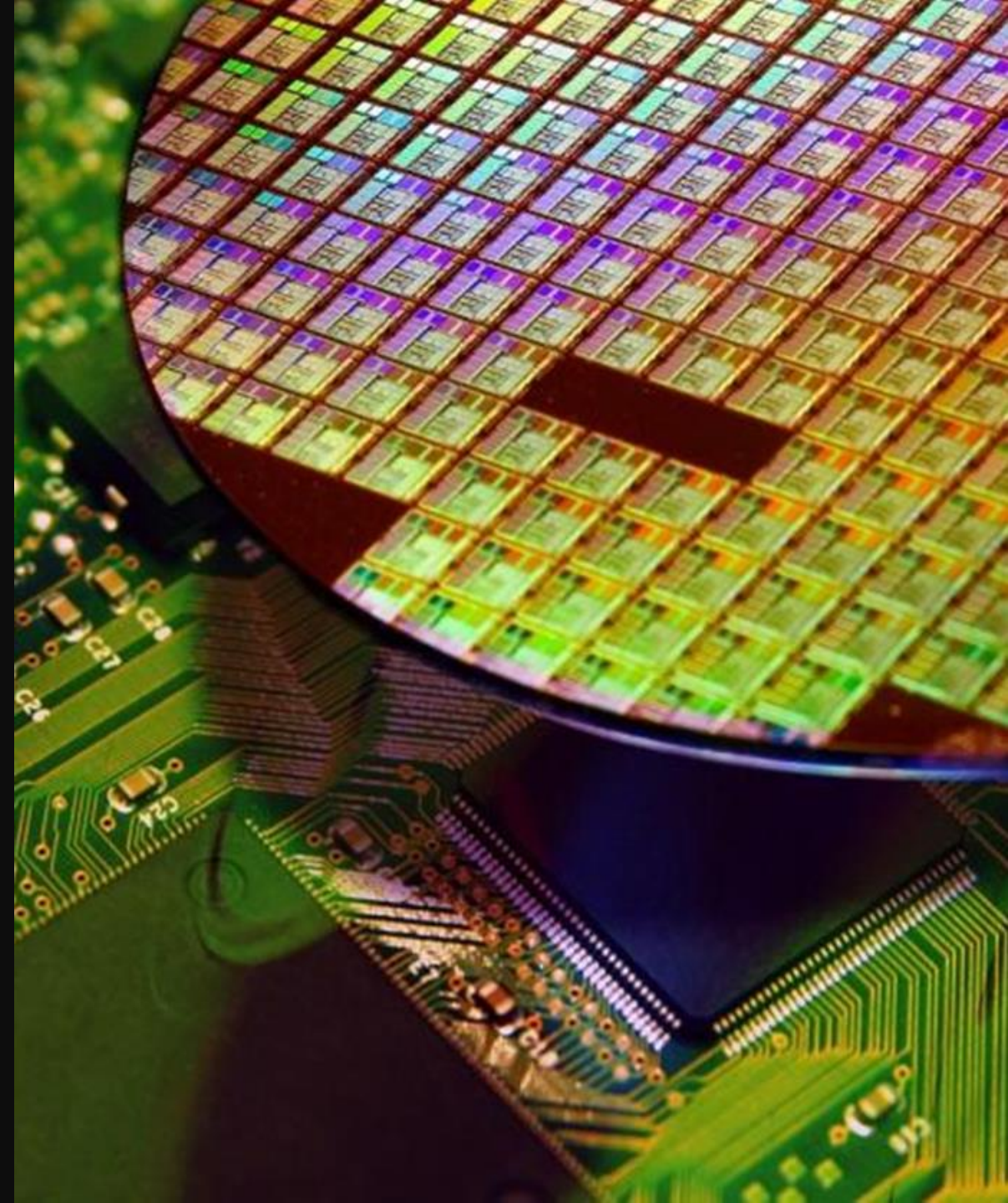
Από τι αποτελείται ένα SiPM

- Το SiPM αποτελείται από ένα καλούπι μικρού μεγέθους με ευαίσθητα στοιχεία που ονομάζονται μικροκύτταρα (ή pixel) όλα συνδεδεμένα παράλληλα
 - Κάθε μικροκύτταρο είναι μια Geiger-Mode φωτοδίοδος (GM-APD) που λειτουργεί πέρα από την τάση αποκοπής (V_{bd})
 - Έχει ενσωματώμενη αντίσταση για παθητικό σβήσιμο
-



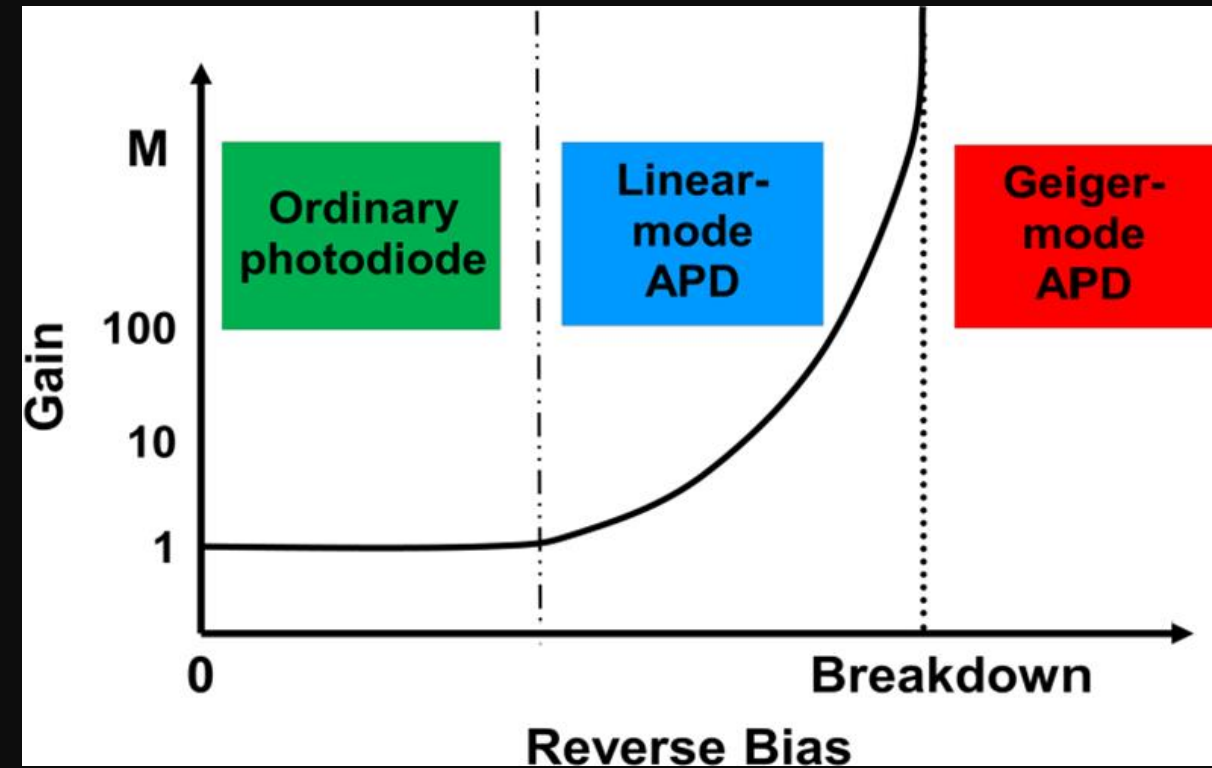
Λειτουργία

- το ηλεκτρικό πεδίο εντός της επαφής pn της διόδου είναι αρκετά ισχυρό
 - επιτρέπει στους φορείς φορτίου που δημιουργούνται(από ένα προσπίπτον φωτόνιο)
 - επαρκή κινητική ενέργεια για να δημιουργήσουν περαιτέρω δευτερογενείς φορείς φορτίου(electron-hole pairs)
 - Οι δευτερογενείς φορείς φορτίου μπορούν και πάλι να δημιουργήσουν φορείς φορτίου μέσω ιονισμού κρούσης(impact ionization)
 - 10⁵-10⁶ charge carriers όπου δημιουργούνται
-



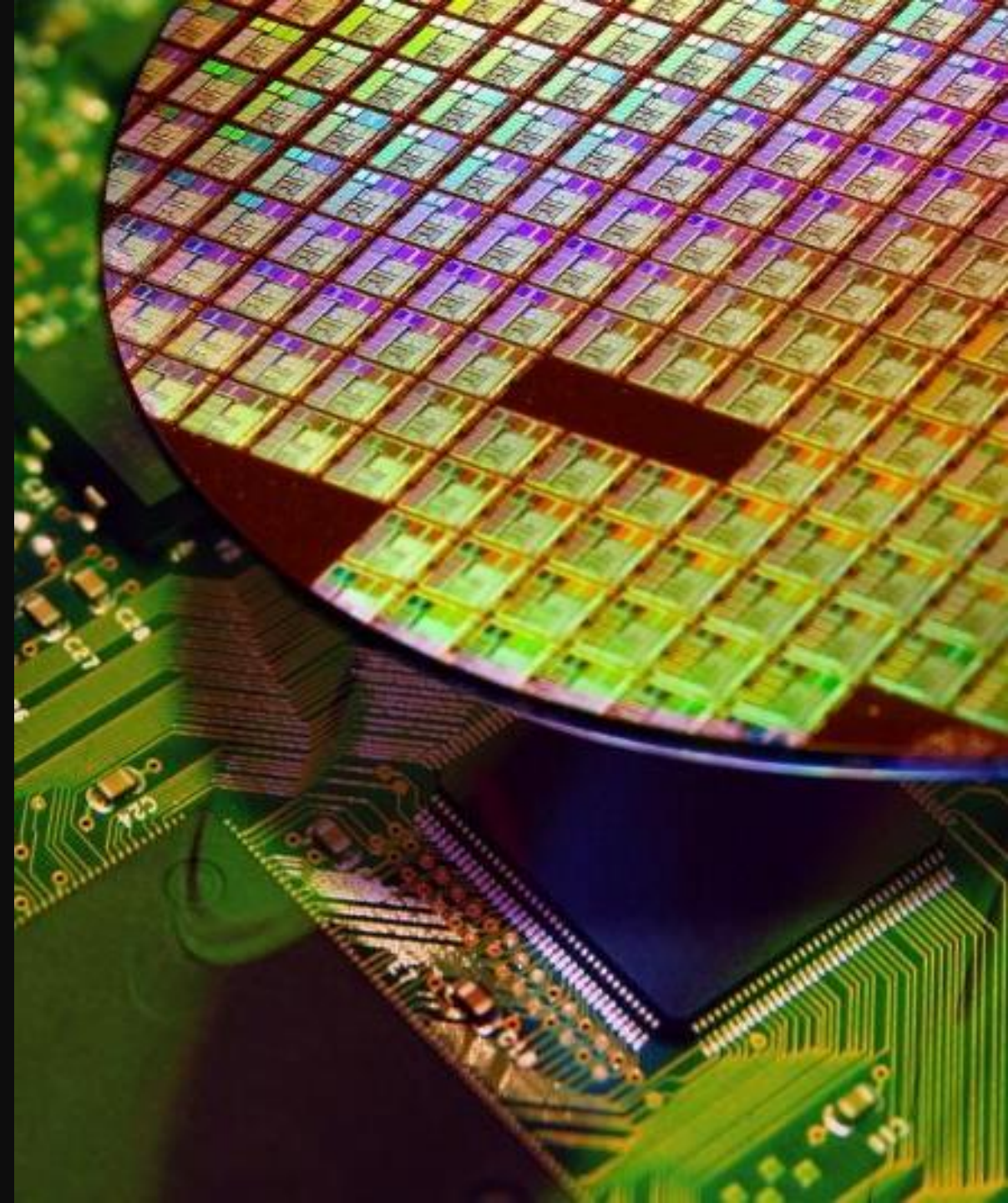
Λεξιλόγιο του SiPM

- **Geiger mode:** είναι ένας τρόπος λειτουργίας ενός APD(Avalanche photodiode) έτσι ώστε να παράγει έναν γρήγορο ηλεκτρικό παλμό πλάτους αρκετών βολτ ως απόκριση στην ανίχνευση ακόμη και ενός φωτονίου.
- **Avalanche:** Μια διαδικασία που συμβαίνει σε ένα τμήμα υψηλού πεδίου (ηλεκτρικό) της περιοχής καταρευσης μέσω της οποίας ενεργοποιημένα ηλεκτρόνια και οπές μπορούν να ιονίσουν άτομα πυριτίου οδηγώντας σε πολλαπλασιασμό του αδέσμευτου φορτίου.



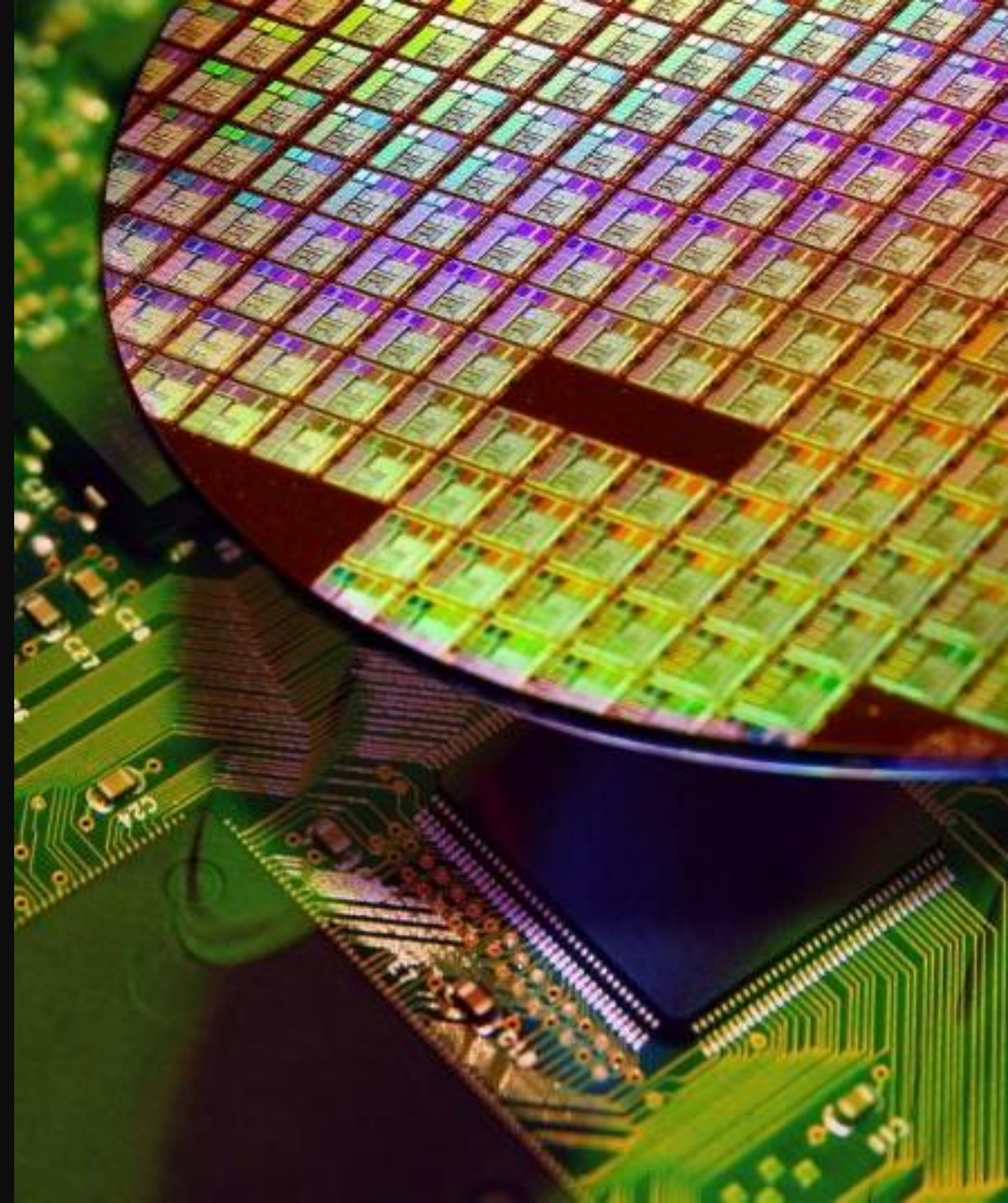
Λεξιλόγιο του SiPM

- **Jitter (σ_t)**: Αυτή η ποσότητα είναι ένα μέτρο της διαφοράς στους χρόνους διέλευσης(ενός φωτονίου).
 - **Charge carriers(φορέας φορτίου(ηλεκτρικού))**: Είτε ηλεκτρόνιο είτε οπή. Σε μια συσκευή ημιαγωγών, ένα ρεύμα μπορεί να οφείλεται σε κίνηση ηλεκτρονίων, οπών(Ένα ψευδοσωματίδιο που έχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο $1,6 \times 10^{-19}$ C) ή σε συνδυασμό και των δύο.
-



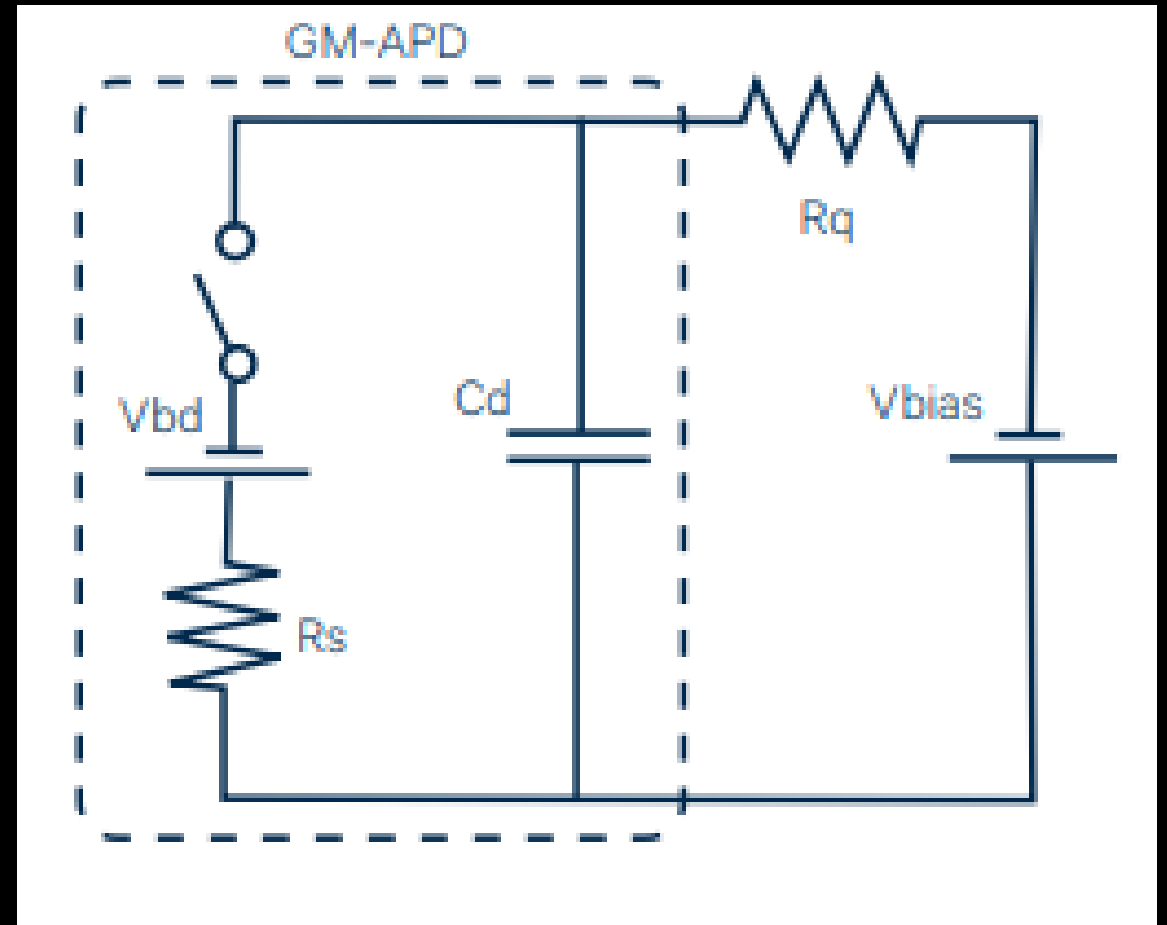
Λεξιλόγιο του SiPM,όσο αναφορά της τάσης

- **V_{bd}**: Η ανάστροφη τάση που διαιρεί τη λειτουργία μιας φωτοδιόδου χιονοστιβάδας μεταξύ της γραμμικής λειτουργίας και της λειτουργίας Geiger .Η λειτουργία ενός SiPM απαιτεί λειτουργία Geiger, επομένως η συσκευή είναι πάντα πολωμένη πάνω από την τάση αποκοπής της.
 - **V_{bias}**: Η ανάστροφη τάση που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες ενός SiPM. Εάν αυτή η τάση είναι μεγαλύτερη από την τάση αποκοπής, το SiPM λειτουργεί σε Geiger-mode. Η τιμή του V BIAS καθορίζει την υπέρταση.
-



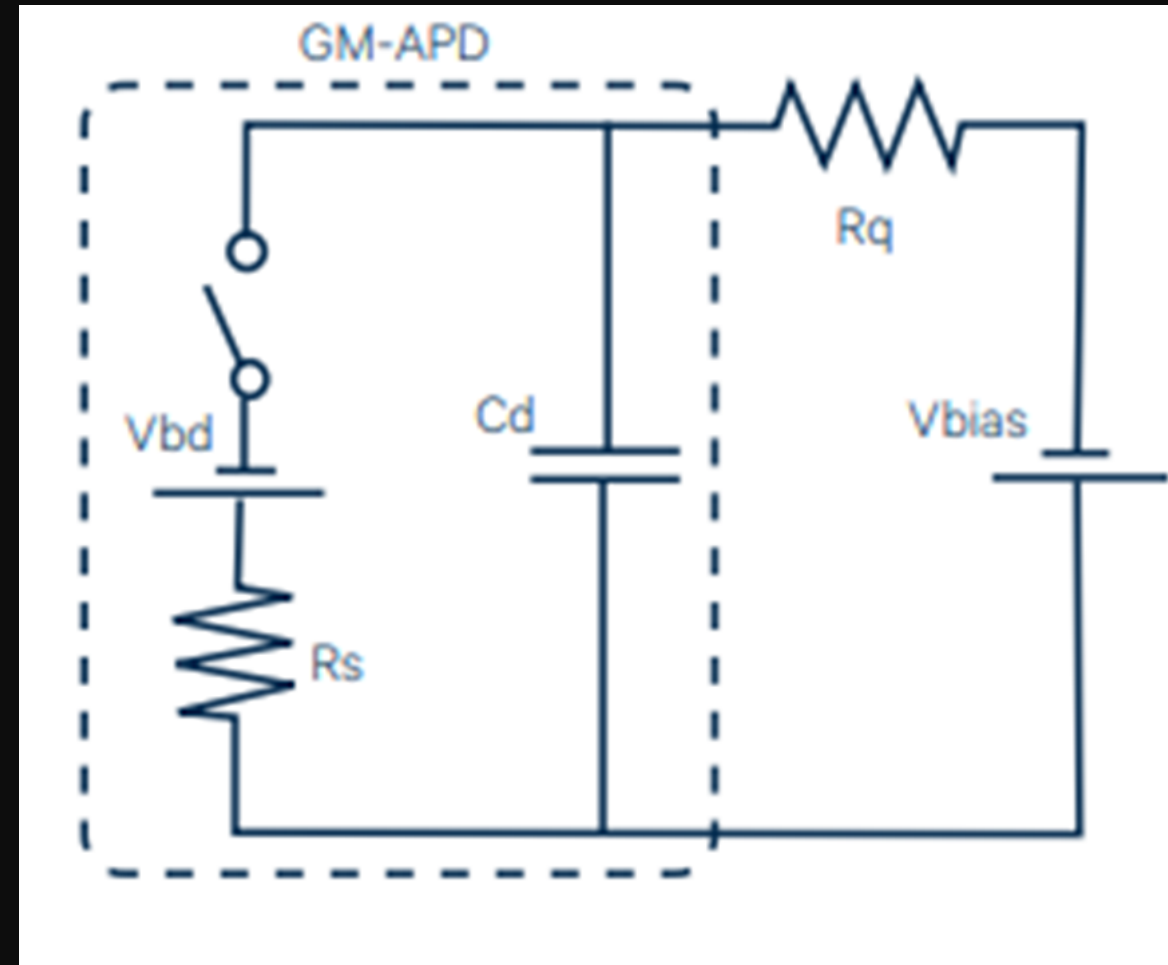
Αναλυτική λειτουργία SiPM

- Το C_d είναι η χωρητικότητα της διόδου ανάστροφα πολωμένη.
 - το R_s (αντίσταση R_S (που αντιπροσωπεύει την αντίσταση ολόκληρου του APD κατά τη διάρκεια μιας εκφόρτισης)) είναι αντίσταση σε σειρά με το υπόστρωμα πυριτίου.
 - το R_q είναι η αντίσταση απόσβεσης ($R_q \gg R_s$).



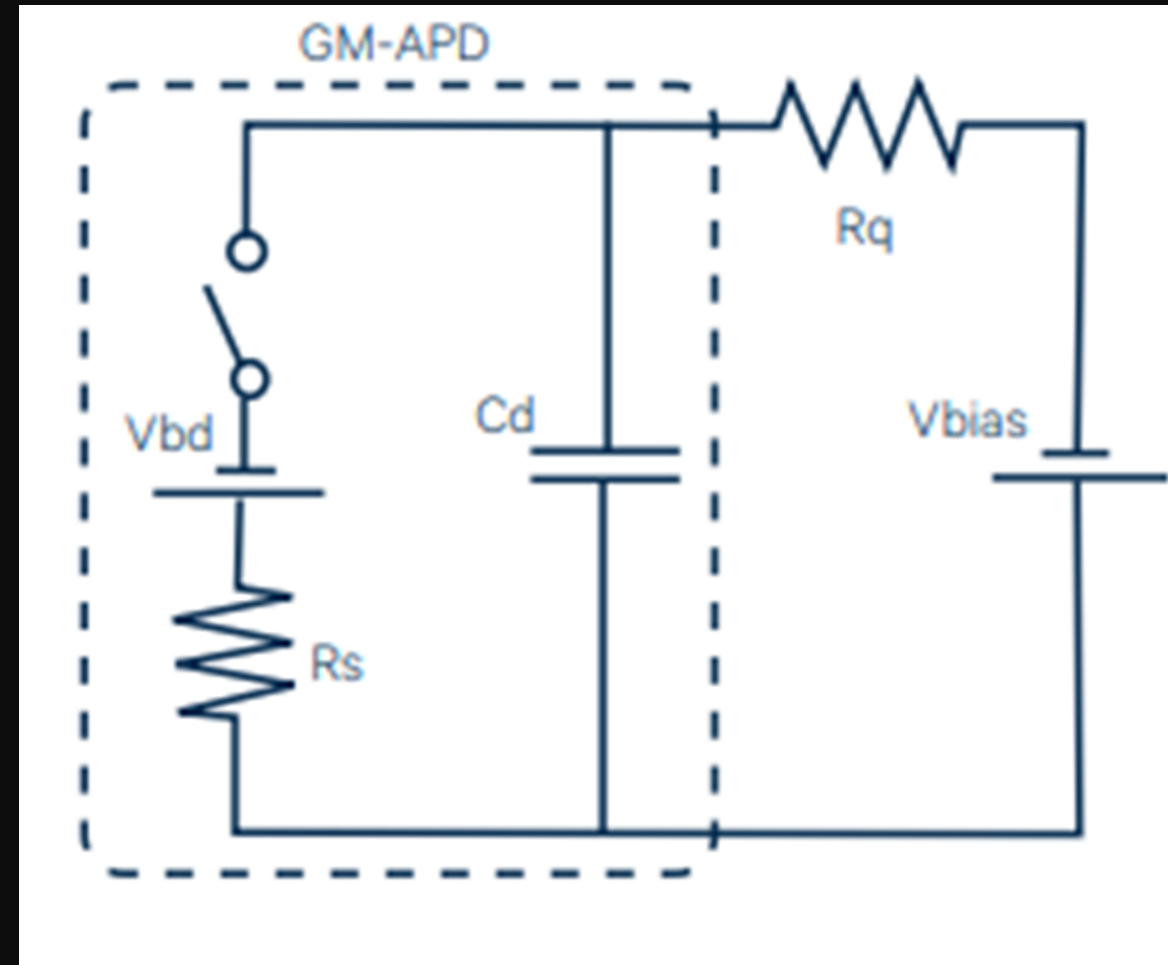
Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι λειτουργίας σε ένα GM-APD: κατάσταση ηρεμίας, φάση εκφόρτισης, φάση αποκατάστασης

- Σε κατάσταση ηρεμίας, η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη όπου $V_{bias} = V_{bd} + V_{on}$.
- Οπου και η δίοδος παραμένει σε αυτήν την κατάσταση χωρίς ρεύμα.
- Όταν ένα φωτόνιο απορροφάτε, ο διακόπτης κλείνει και το Cd αποφορτίζεται από την V_{bias} στο V_{bd} .
- Σε αυτή τη φάση, ο πολλαπλασιασμός των χιονοστιβάδων είναι σε εξέλιξη εντός του GM-APD.



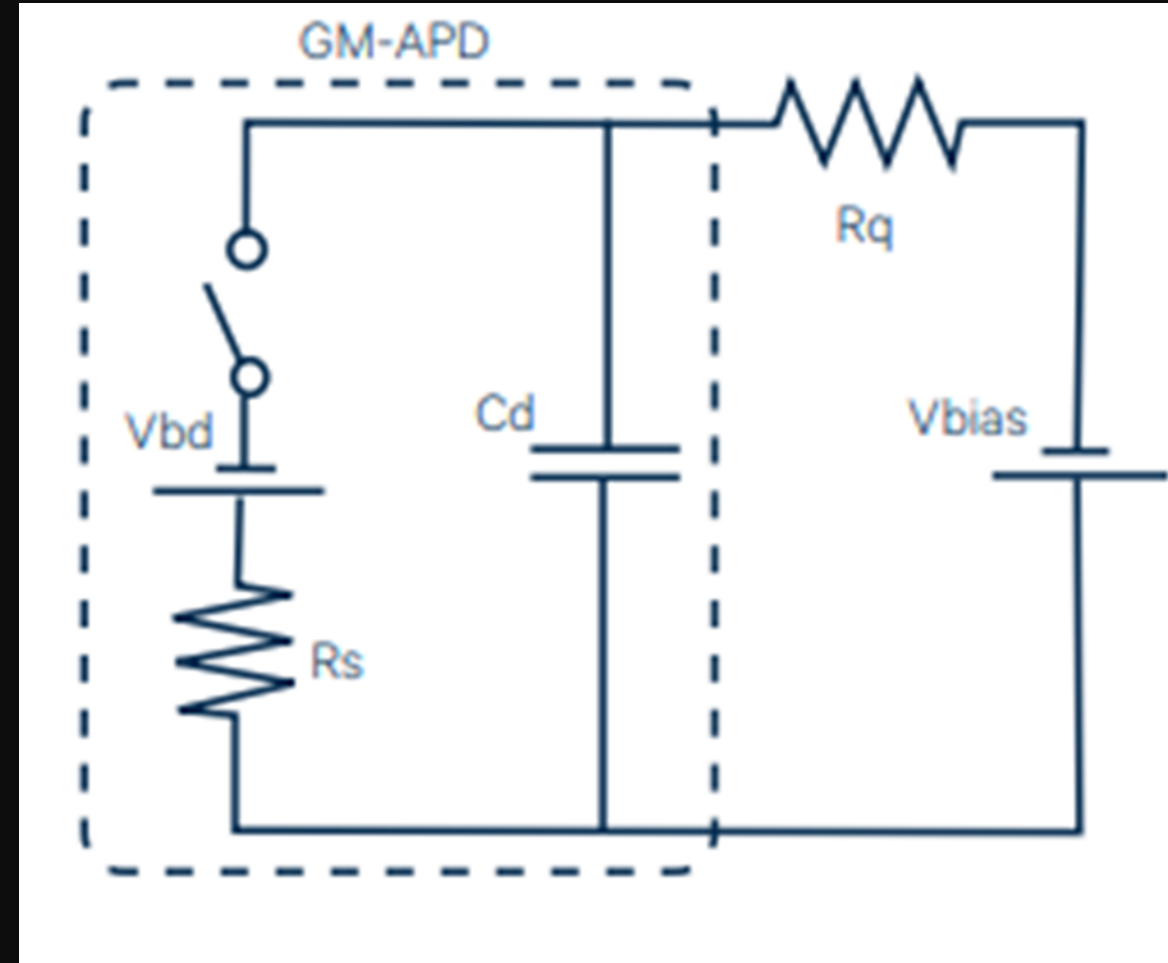
Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι λειτουργίας σε ένα GM-APD: κατάσταση ηρεμίας, φάση εκφόρτισης, φάση αποκατάστασης

- χωρίς απόσβεση, ένα σταθερό ρεύμα ρέει απεριόριστα στη συσκευή.
- Με την R_q , η avalanche, η διαδικασία αποσβήνει και ο διακόπτης στο κύκλωμα ανοίγει ξανά .



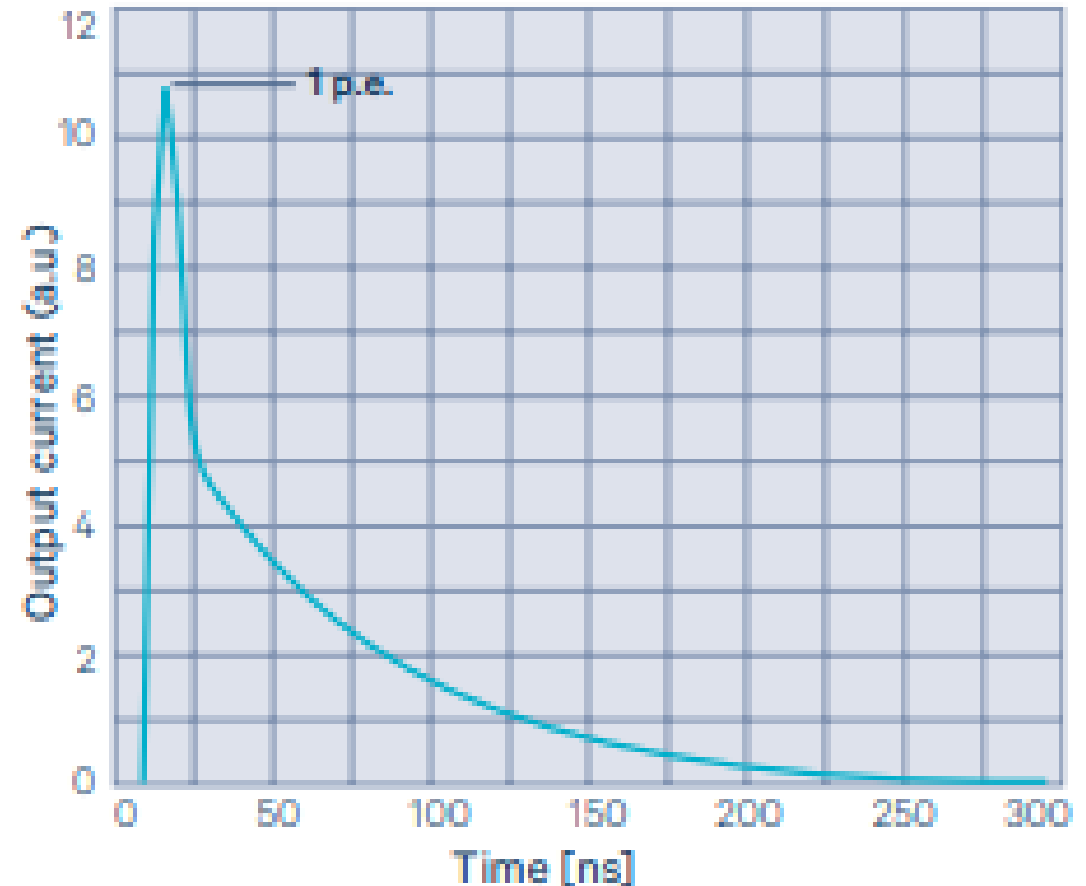
Η GM-APD εισέρχεται τώρα στη φάση ανάκτησης(επαναφορας):

- C_d επαναφορτίζει πίσω στην V_{bias} μέσω της R_q .
- Το GM-APD επιστρέφει σε κατάσταση ηρεμίας.
- Έτοιμο για την ανίχνευση ενός νέου φωτονίου.



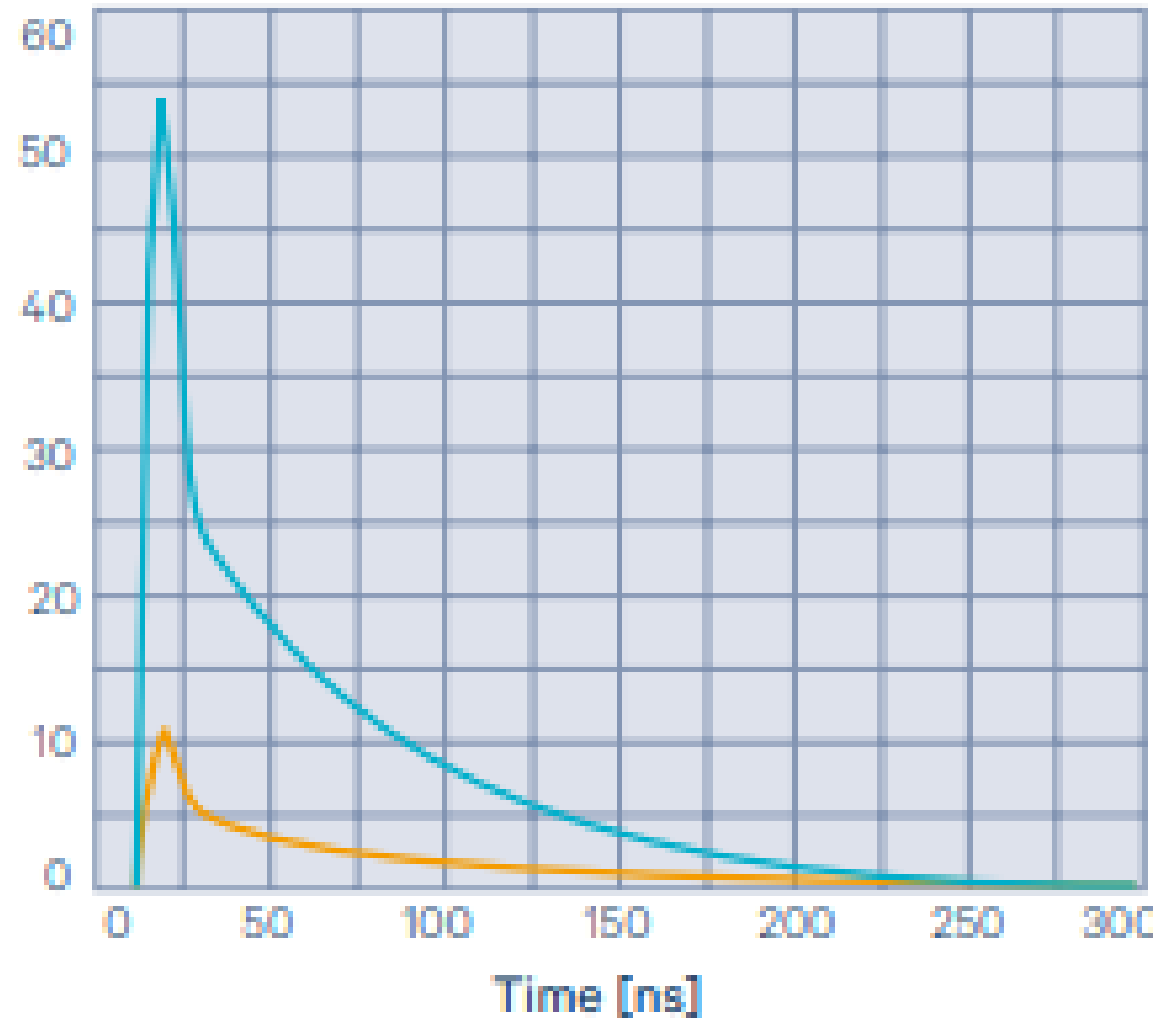
Πως φαίνεται η εκφόρτιση και η επαναφόρτιση του Cd

- Η ανοδική ακμή αντιστοιχεί στη φάση εκφόρτισης .
- ενώ η πιο αργή πίσω ακμή είναι η φάση ανάκτησης.
- Το πλάτος του παλμού SiPM αυξάνεται με την υπέρταση, ενώ τόσο ο χρόνος ανόδου όσο και ο χρόνος ανάκτησης καθορίζονται κυρίως από τα Cd, R_s και R_q



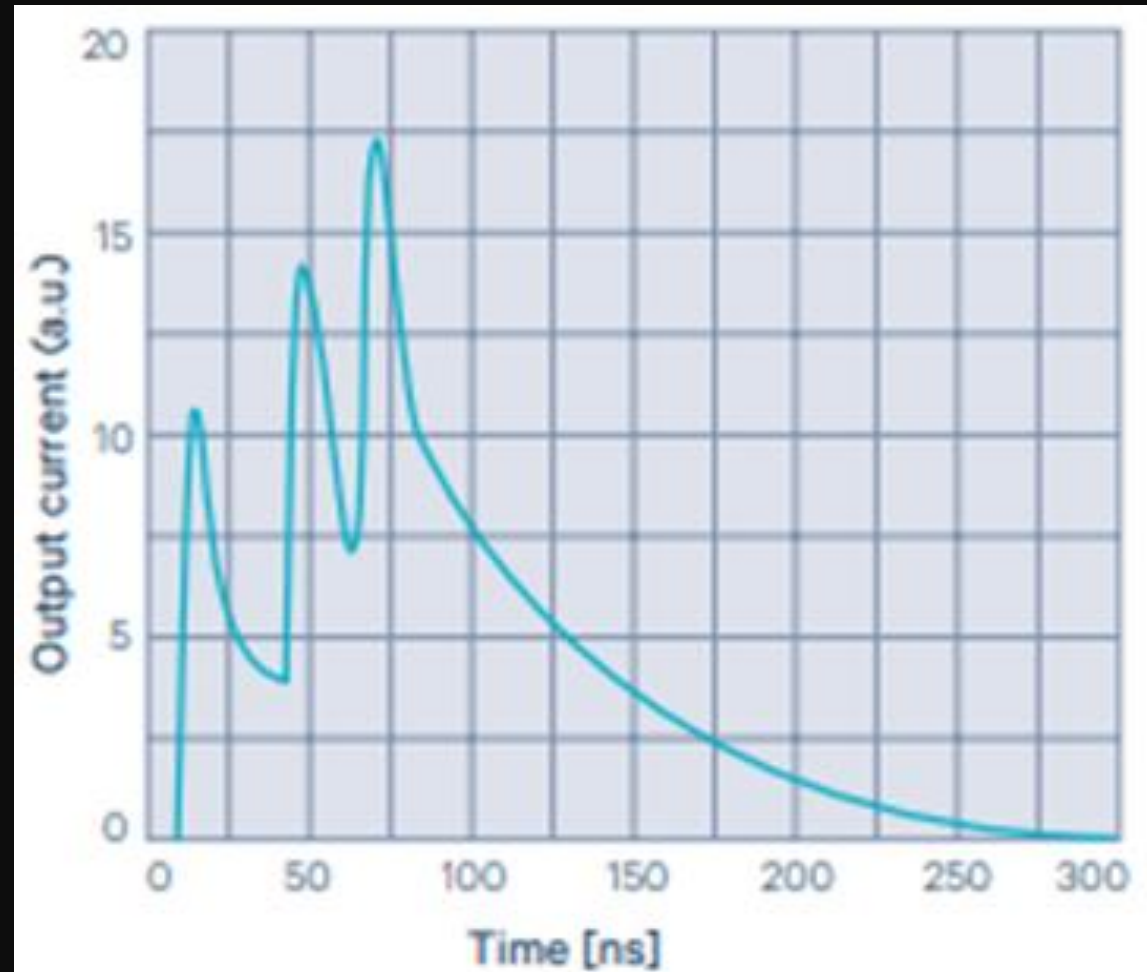
Πως ξεπερνάει το SiPM το πρόβλημα ανιχνεύσεις πολλών φωτονίων

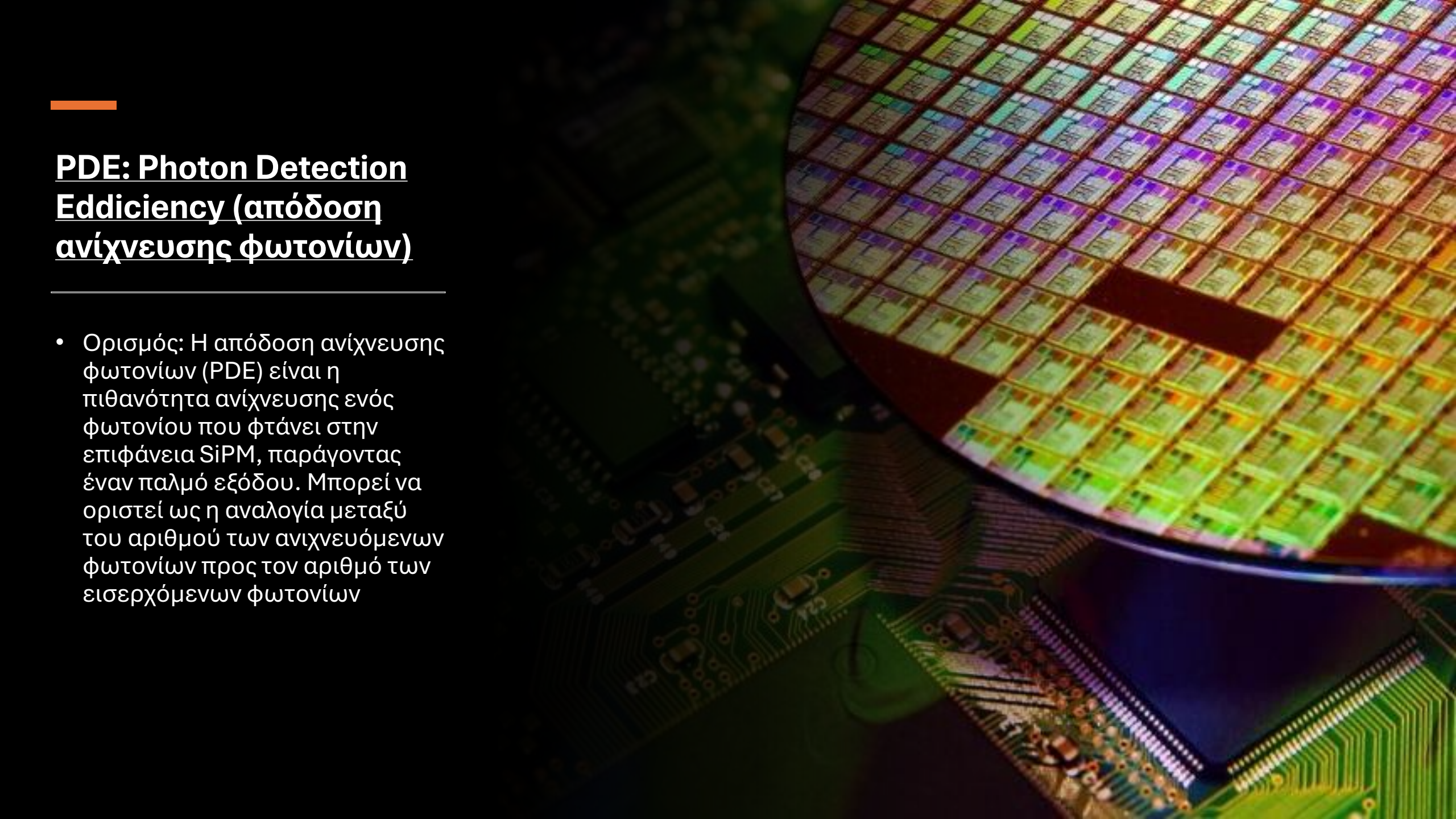
- παράλληλη διάταξη αρκετών μικροκυττάρων
- Με αυτόν τον τρόπο, οι N ανεξάρτητοι παλμοί ρεύματος απλώς αθροίζονται στους ακροδέκτες SiPM
- τόσο το πλάτος όσο και η περιοχή κάθε παλμού, είναι ανάλογα με τον αριθμό των ανιχνευόμενων φωτονίων.



Τι γίνεται όταν τα κελια δεν πυροδοτούν ταυτόχρονα;

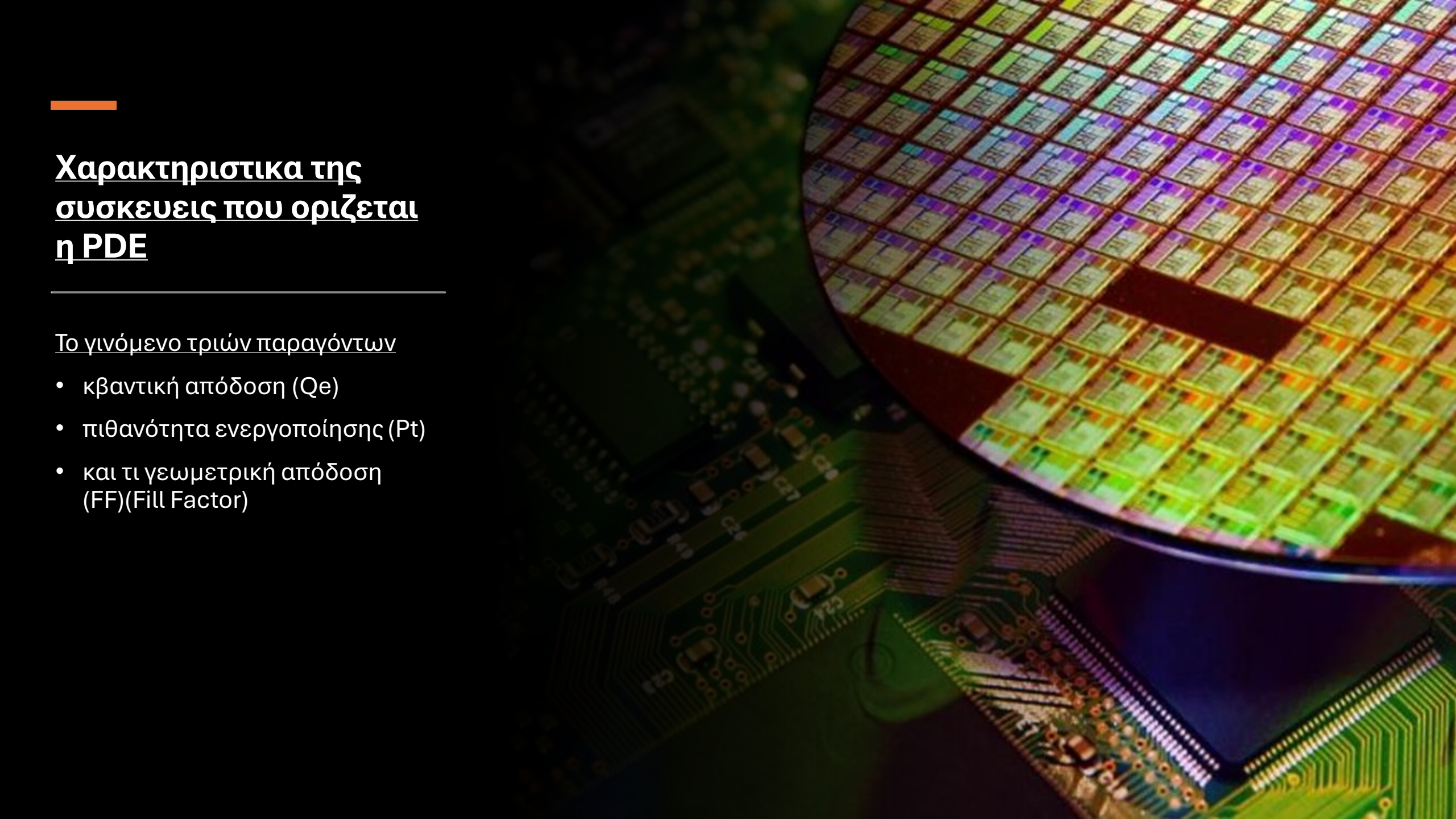
- Στην περίπτωση μη ταυτόχρονης πυροδότησης κυψελών, μπορεί να εμφανιστεί συσσώρευση παλμών στους ακροδέκτες SiPM.





PDE: Photon Detection Efficiency (απόδοση ανίχνευσης φωτονίων)

- Ορισμός: Η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων (PDE) είναι η πιθανότητα ανίχνευσης ενός φωτονίου που φτάνει στην επιφάνεια SiPM, παράγοντας έναν παλμό εξόδου. Μπορεί να οριστεί ως η αναλογία μεταξύ του αριθμού των ανιχνευόμενων φωτονίων προς τον αριθμό των εισερχόμενων φωτονίων



Χαρακτηριστικά της συσκευής που ορίζεται η PDE

Το γινόμενο τριών παραγόντων

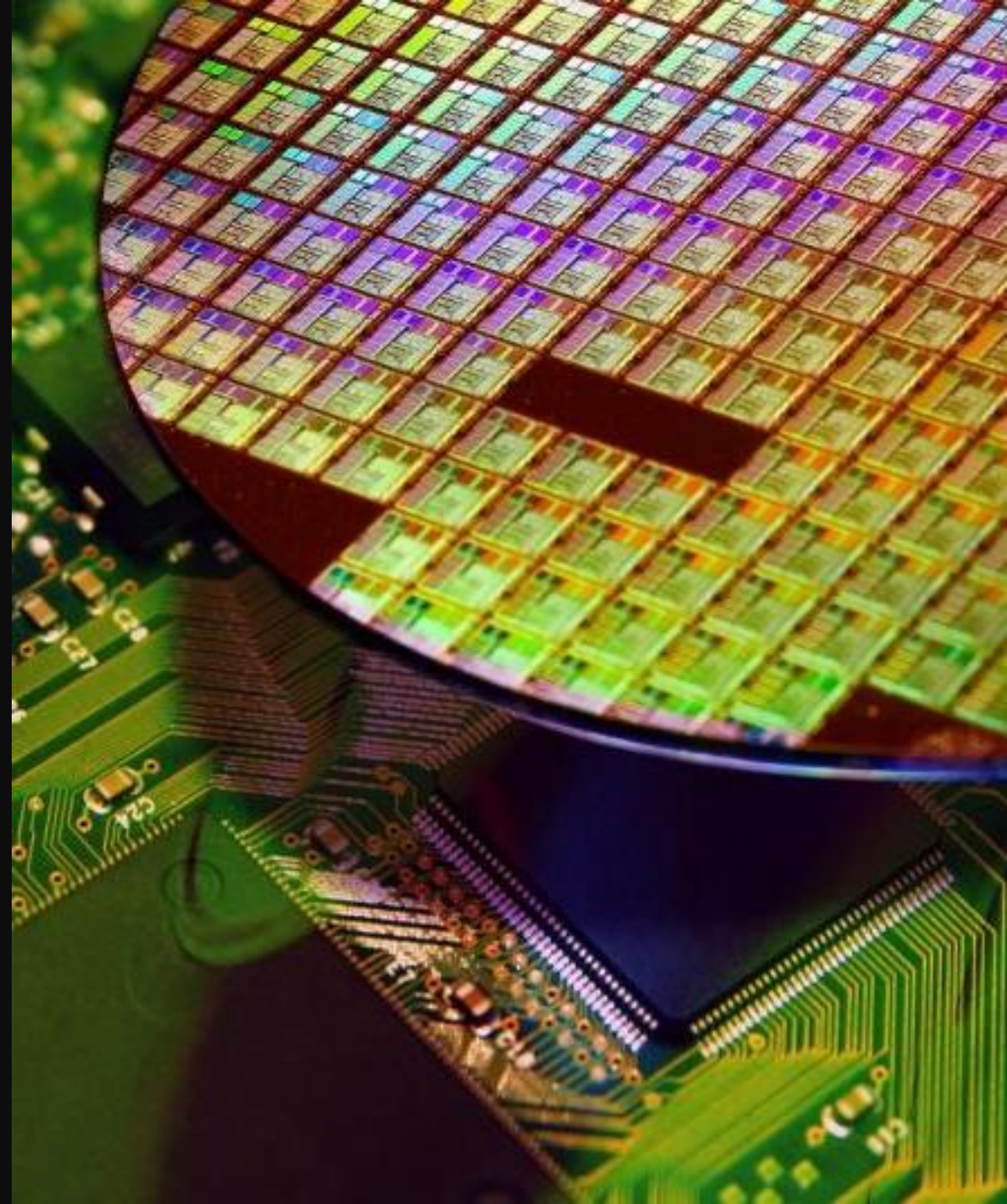
- κβαντική απόδοση (Q_e)
- πιθανότητα ενεργοποίησης (P_t)
- και τι γεωμετρική απόδοση (FF)(Fill Factor)

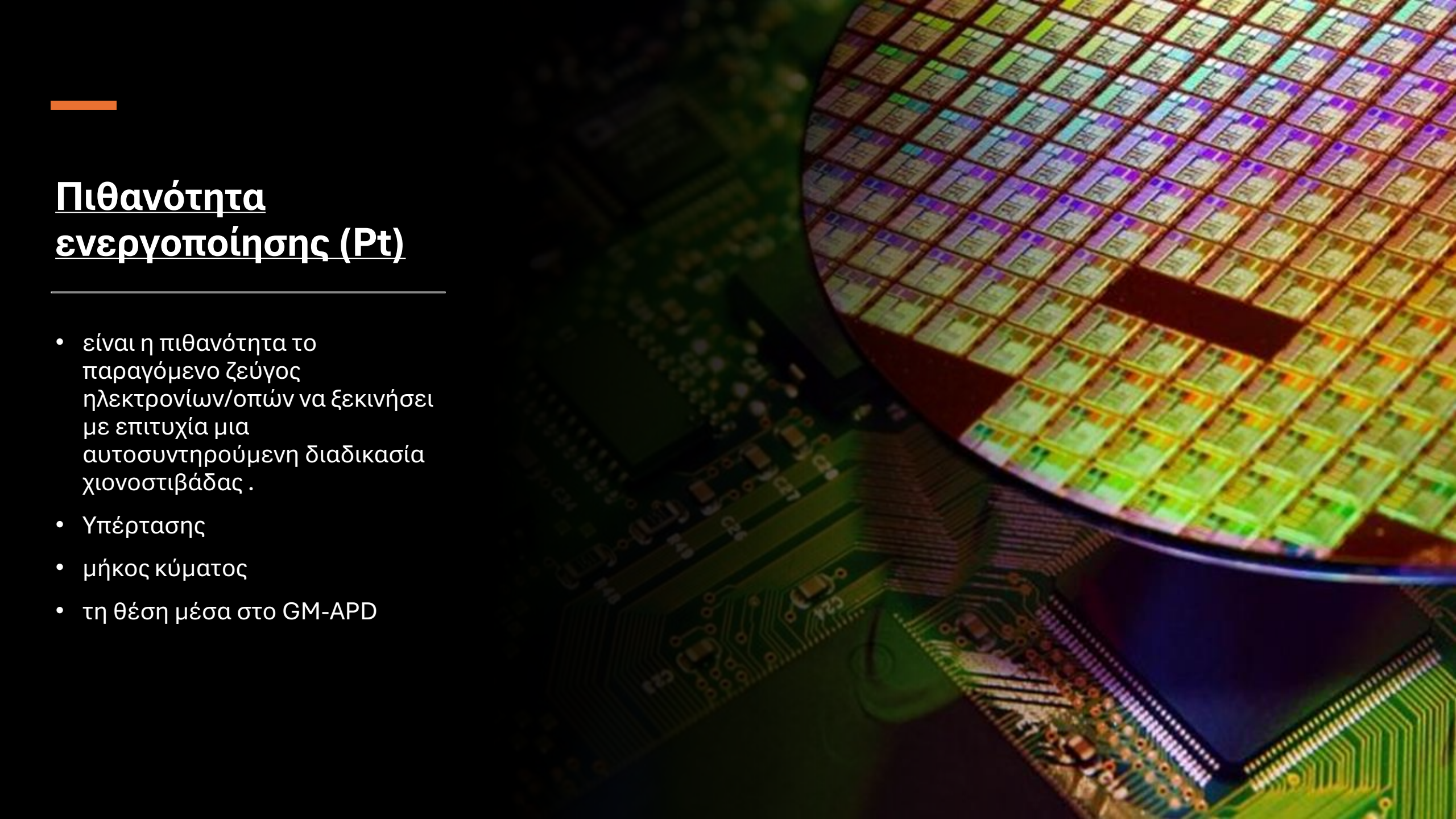
Κβαντική απόδοση (Q_e)

- Η κβαντική απόδοση (Q_e) εκφράζει την πιθανότητα ένα φωτόνιο που προσπίπτει στο SiPM να μεταδοθεί στην πραγματικότητα στο πυρίτιο, να απορροφηθεί από το πυρίτιο και τελικά να μετατραπεί σε ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής.

Συναρτηση του:

- μήκους κύματος
 - της γωνιακής πρόσπτωσης των εισερχόμενων φωτονίων
-



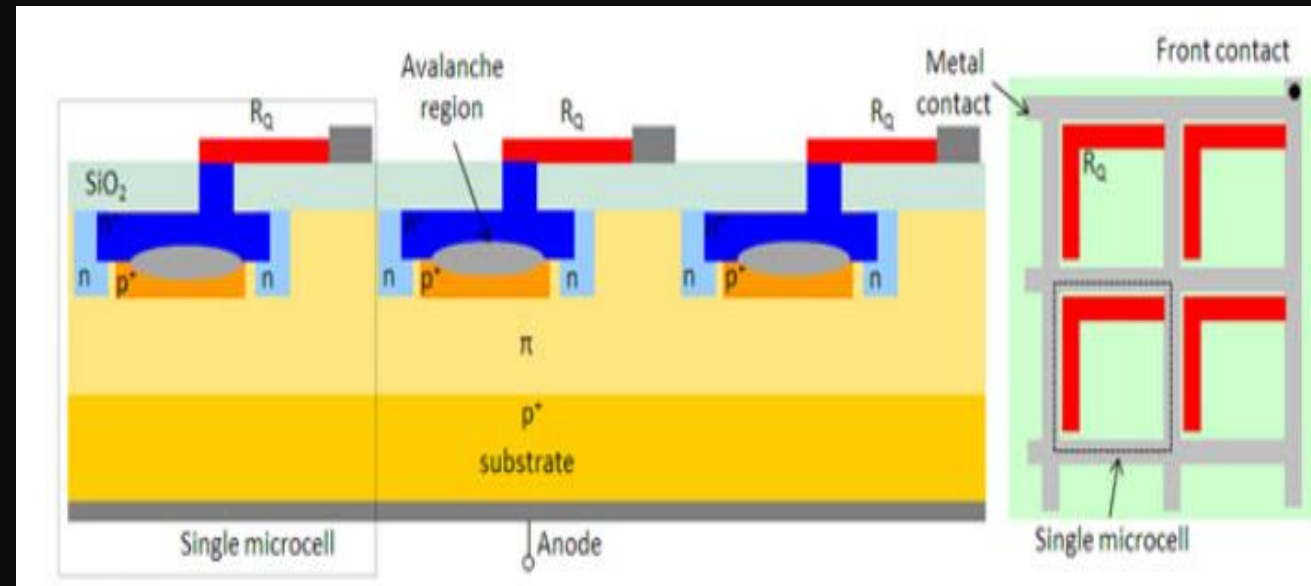
A close-up, artistic photograph of a microchip. The chip is circular and covered in a dense grid of small, colorful squares (purple, green, yellow, and red) representing different circuit components. It is set against a dark background with other electronic components visible in the foreground, including a green printed circuit board (PCB) with various components and a black integrated circuit (IC) with gold pins.

Πιθανότητα ενεργοποίησης (Pt)

- είναι η πιθανότητα το παραγόμενο ζεύγος ηλεκτρονίων/οπών να ξεκινήσει με επιτυχία μια αυτοσυντηρούμενη διαδικασία χιονοστιβάδας .
- Υπέρτασης
- μήκος κύματος
- τη θέση μέσα στο GM-APD

Γεωμετρική απόδοση (ή συντελεστής πλήρωσης, Fill Factor)

- SiPM έχει απαραίτητα κάποια νεκρή περιοχή στην περιφέρειά του για να φιλοξενήσει μονωτικές δομές και μεταλλικές γραμμές για τη μεταφορά του σήματος.

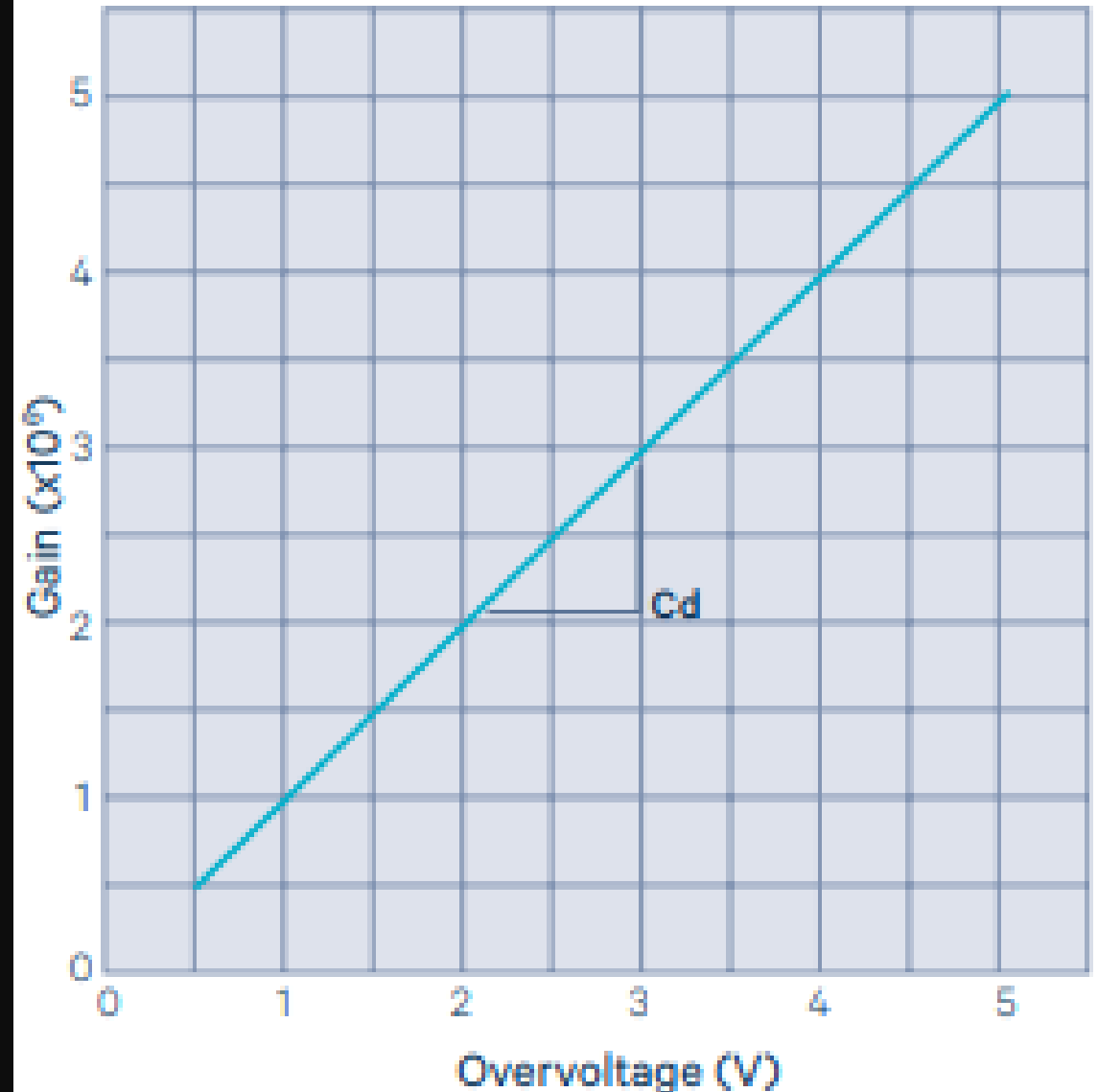


Gain(κερδος)

- Το κέρδος (G) ορίζεται ως ο αριθμός των φορέων που περιέχονται στον παλμό ρεύματος.
- Πόσα charge carriers δημιουργούνται από ένα φωτόνιο κατά την διάρκεια της χιονοστιβάδας
- $G(V_{ov}) = (C_d \times V_{ov}) / q$
- εκφόρτιση του C_d από V_{bias} σε V_{bd}
- Την υπέρταση
- Στοιχειώδες φορτίο

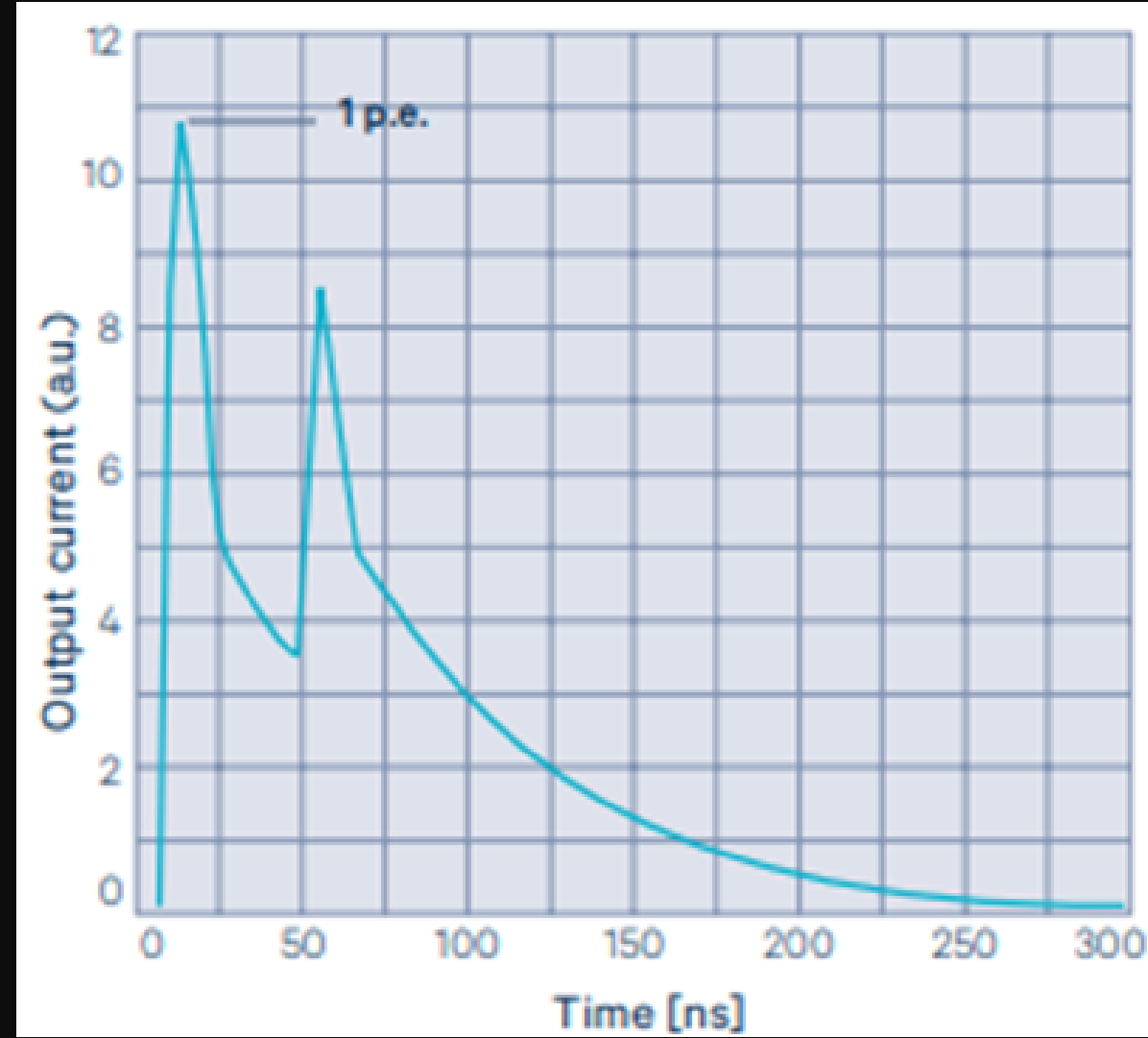
Αν υποθέσουμε ότι C_d είναι σταθερό για $V_{bias} > V_{bd}$

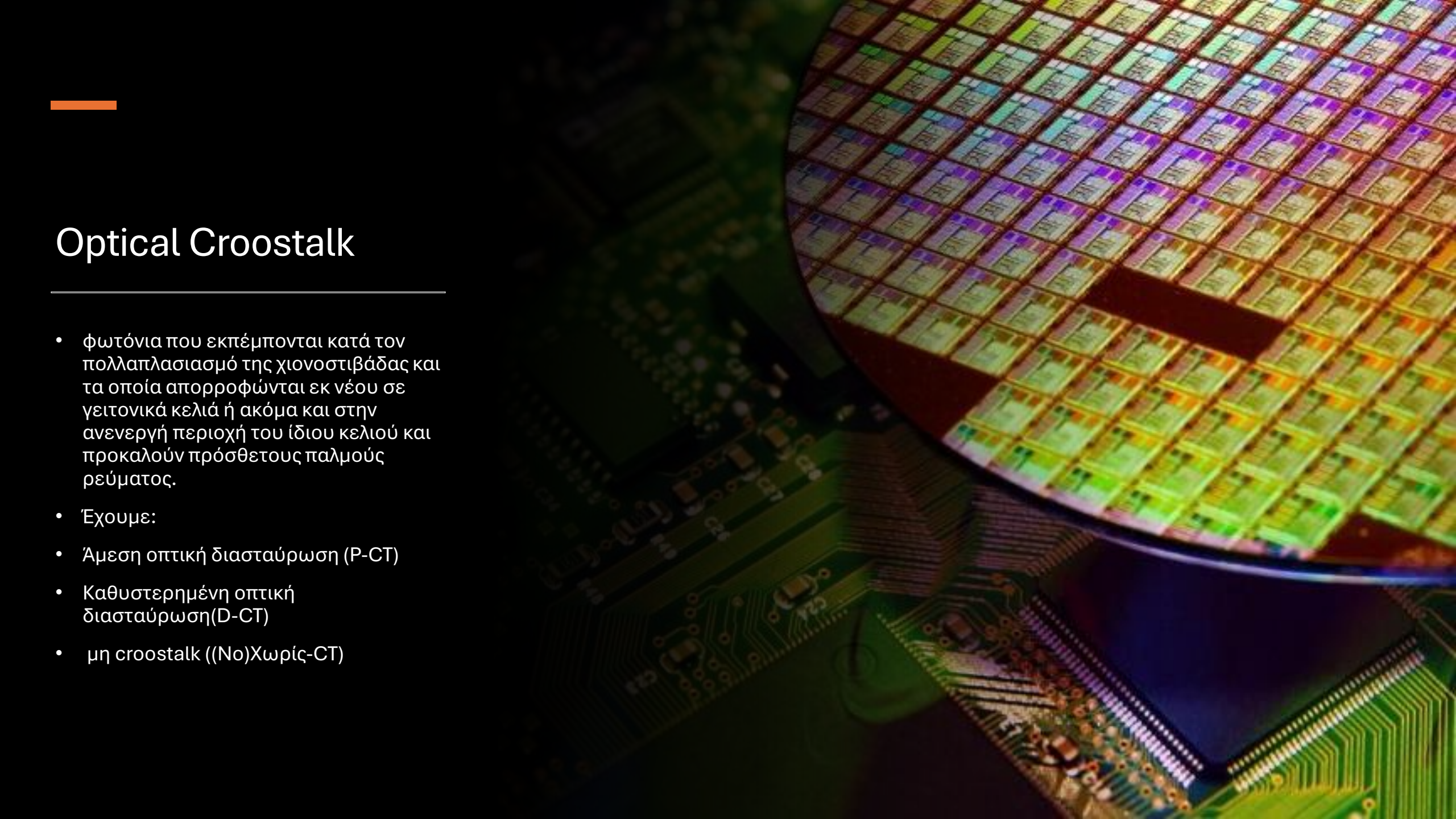
Γραμμική αύξηση του κέρδους με την υπέρταση



Afterpulsing(μεταπαλμος)

- Ο μεταπαλμός οφείλεται στους φορείς που παγιδεύονται σε ελαττώματα πυριτίου κατά τον πολλαπλασιασμό της χιονοστιβάδας, τα οποία απελευθερώνονται αργότερα κατά τη φάση επαναφόρτισης του GM-APD.
-



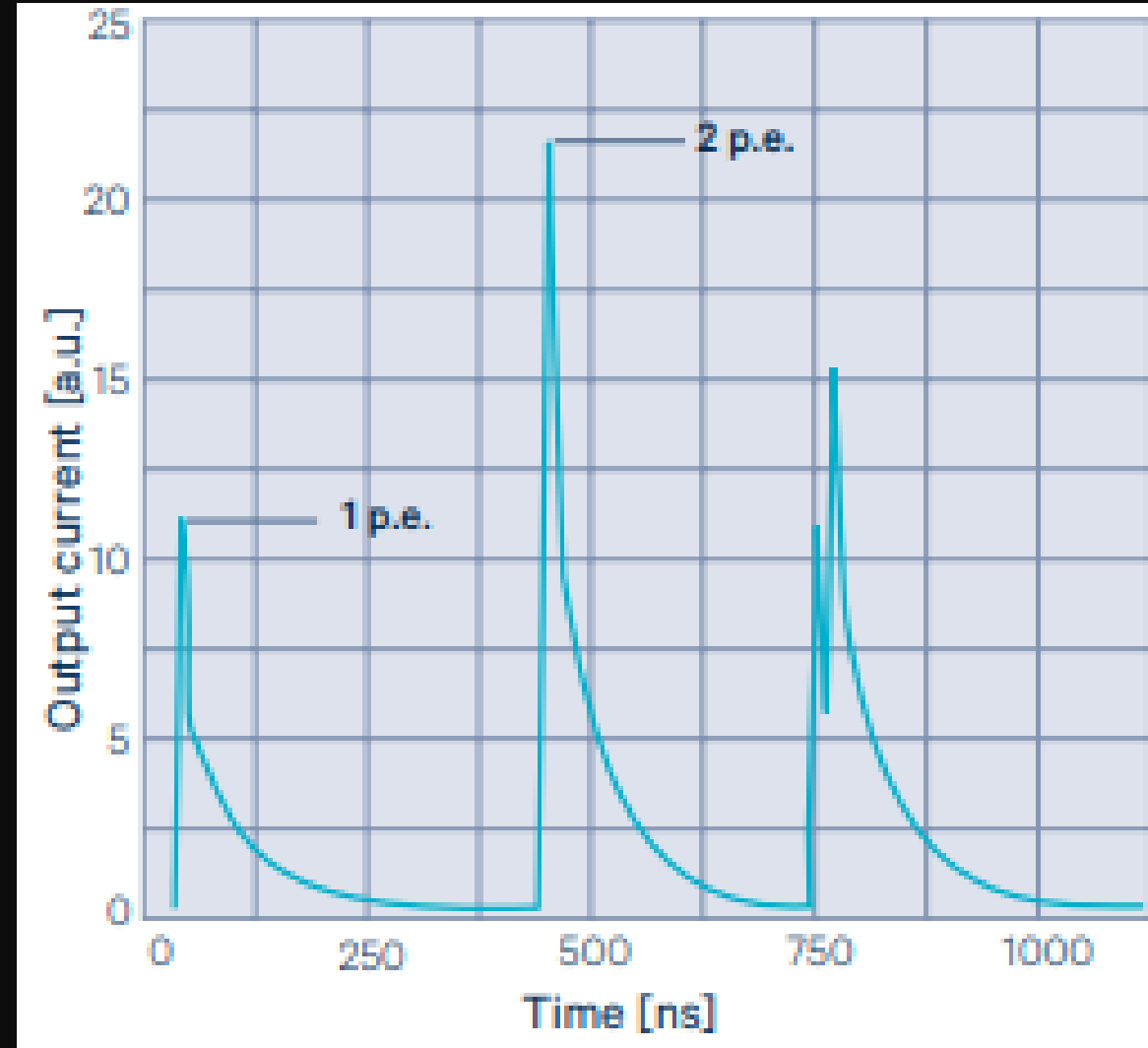
A close-up, artistic photograph of a microchip. The chip's surface is covered in a dense grid of small, colorful squares (purple, green, yellow, and red) representing different circuit components. The chip is mounted on a green printed circuit board (PCB) with visible gold-colored traces and solder points. The lighting is dramatic, with the chip's surface reflecting light in various colors, creating a vibrant, almost iridescent effect. The background is dark, making the chip stand out.

Optical Croostalk

- φωτόνια που εκπέμπονται κατά τον πολλαπλασιασμό της χιονοστιβάδας και τα οποία απορροφώνται εκ νέου σε γειτονικά κελιά ή ακόμα και στην ανενεργή περιοχή του ίδιου κελιού και προκαλούν πρόσθετους παλμούς ρεύματος.
- Έχουμε:
- Άμεση οπτική διασταύρωση (P-CT)
- Καθυστερημένη οπτική διασταύρωση (D-CT)
- μη croostalk ((No)Χωρίς-CT)

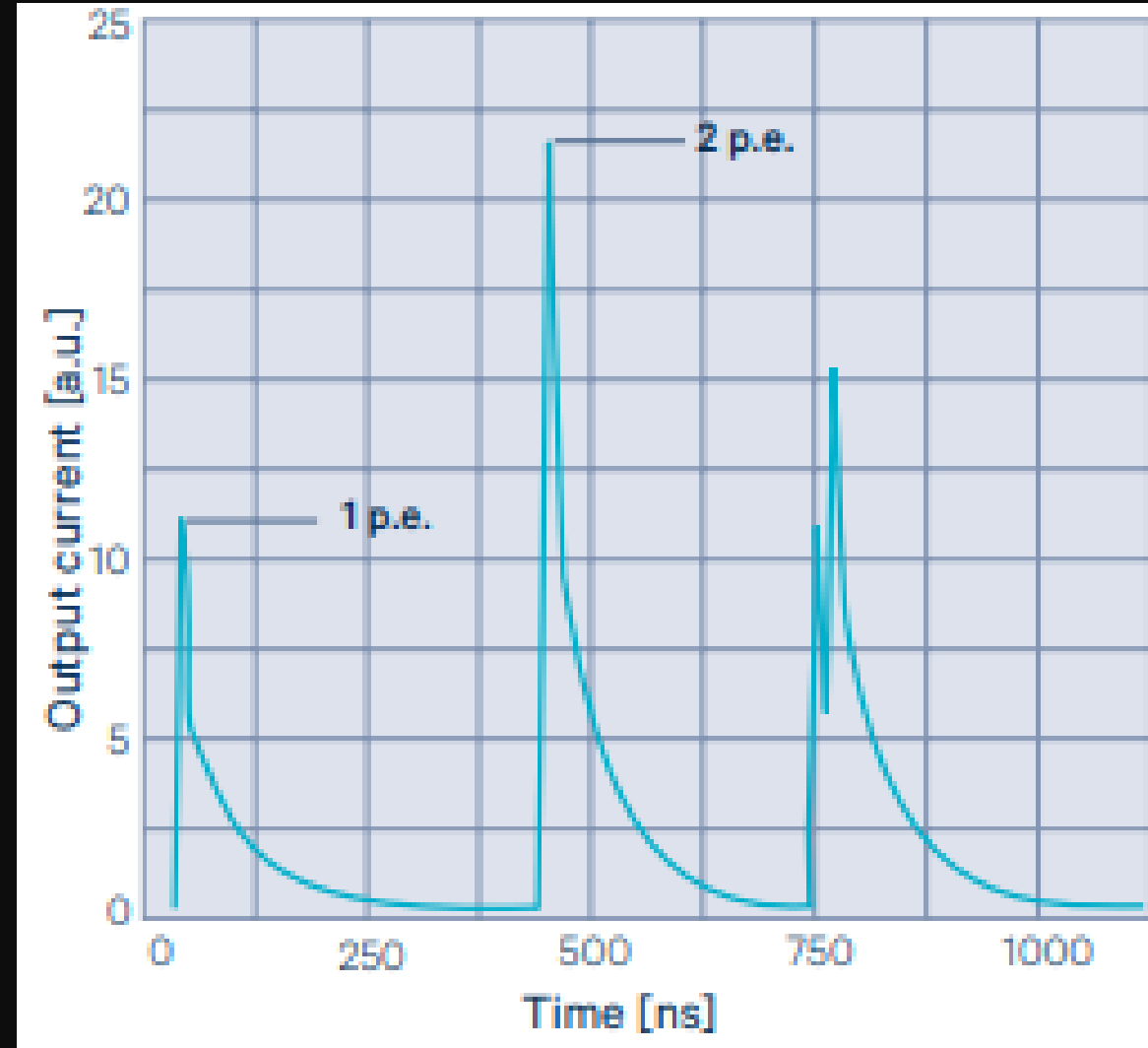
Άμεση οπτική διασταύρωση (P-CT)

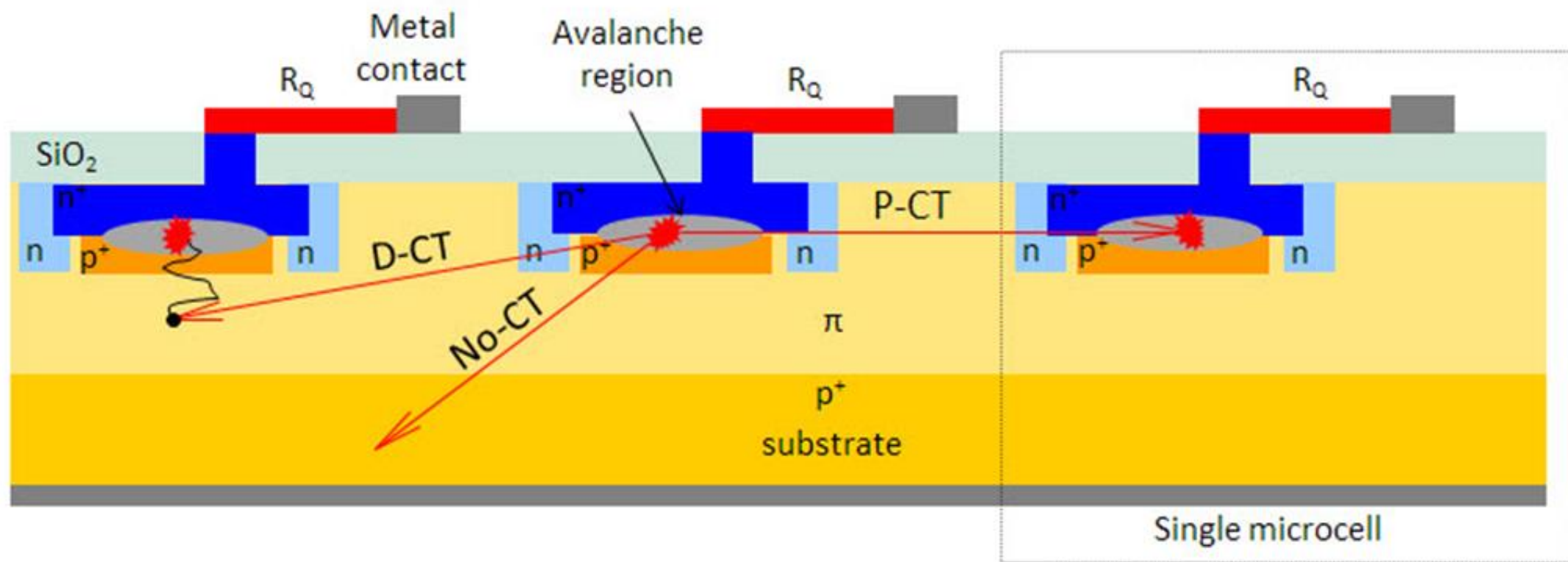
- ένα εκπεμπόμενο φωτόνιο φτάνει στην ενεργή περιοχή ενός άλλου κελιού προκαλώντας μια επιπλέον χιονοστιβάδα σχεδόν την ίδια στιγμή με την αρχική χιονοστιβάδα.
-



Καθυστερημένη οπτική διασταύρωση(D-CT)

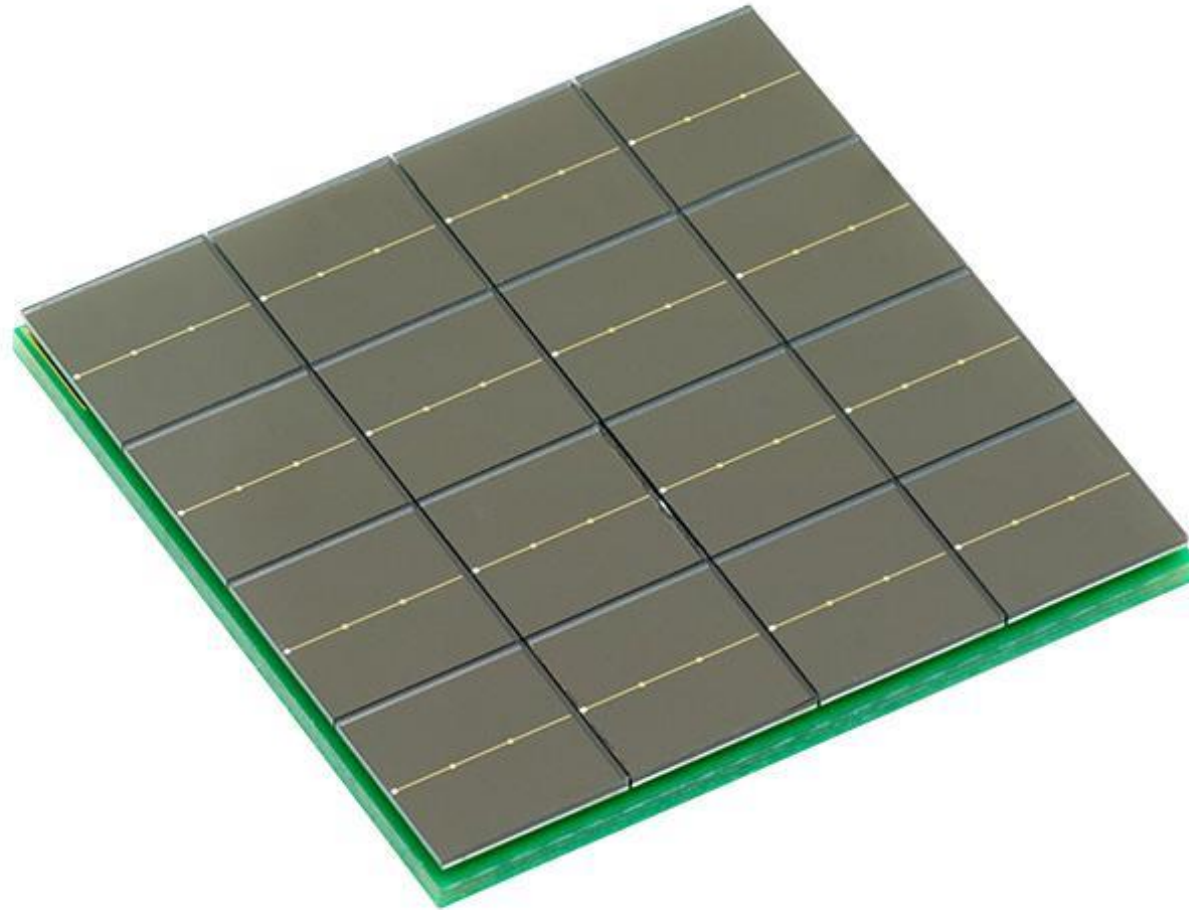
- φωτόνια που επανααπορροφώνται στις ανενεργές περιοχές του SiPM.
- Το παραγόμενο ηλεκτρόνιο (ή οπή) πρέπει στη συνέχεια να διαχυθεί στην ενεργή περιοχή ενός κελιού
- πριν μπορέσει να προκαλέσει μια χιονοστιβάδα





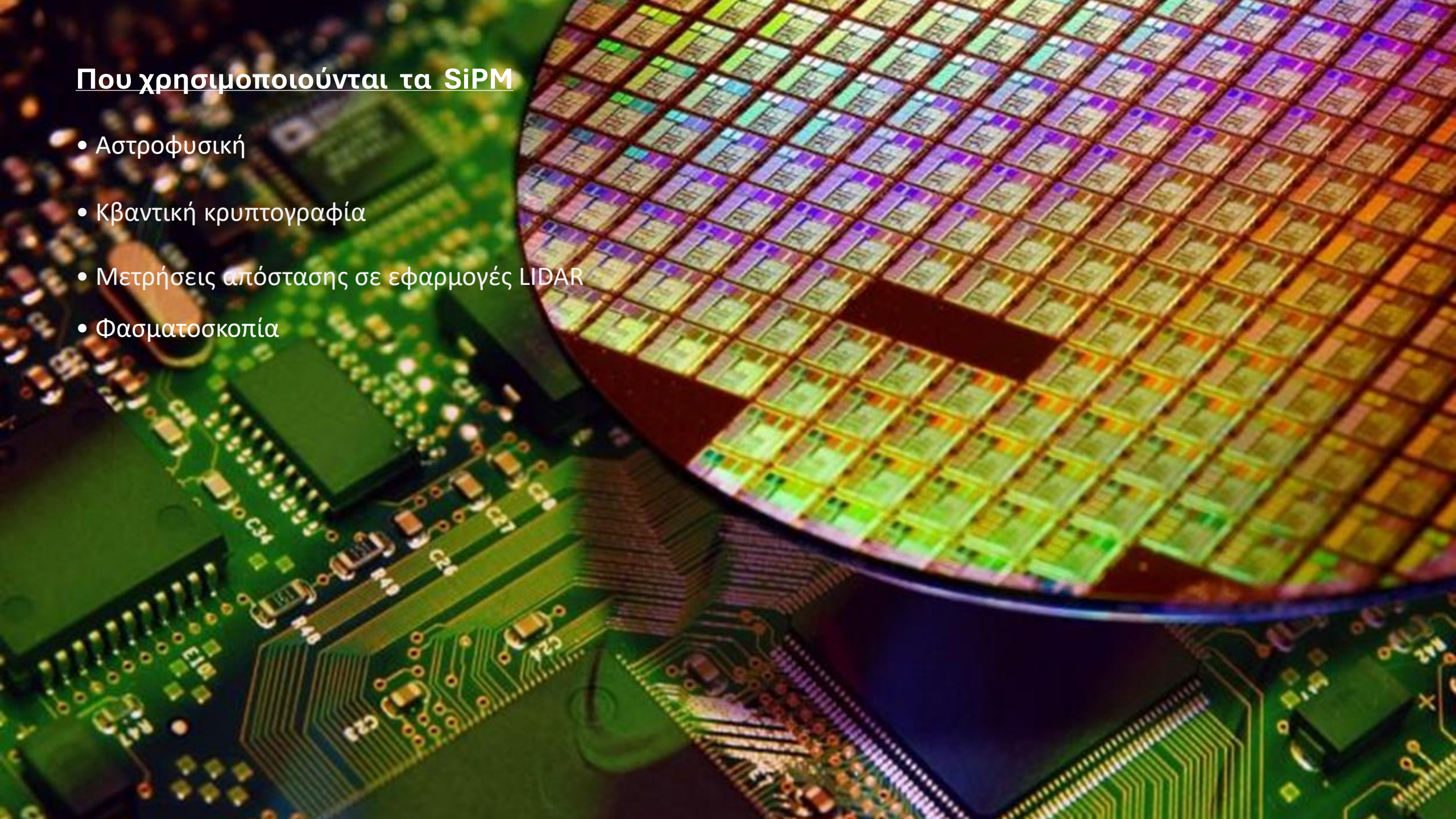
Σχήμα περιπτώσεων

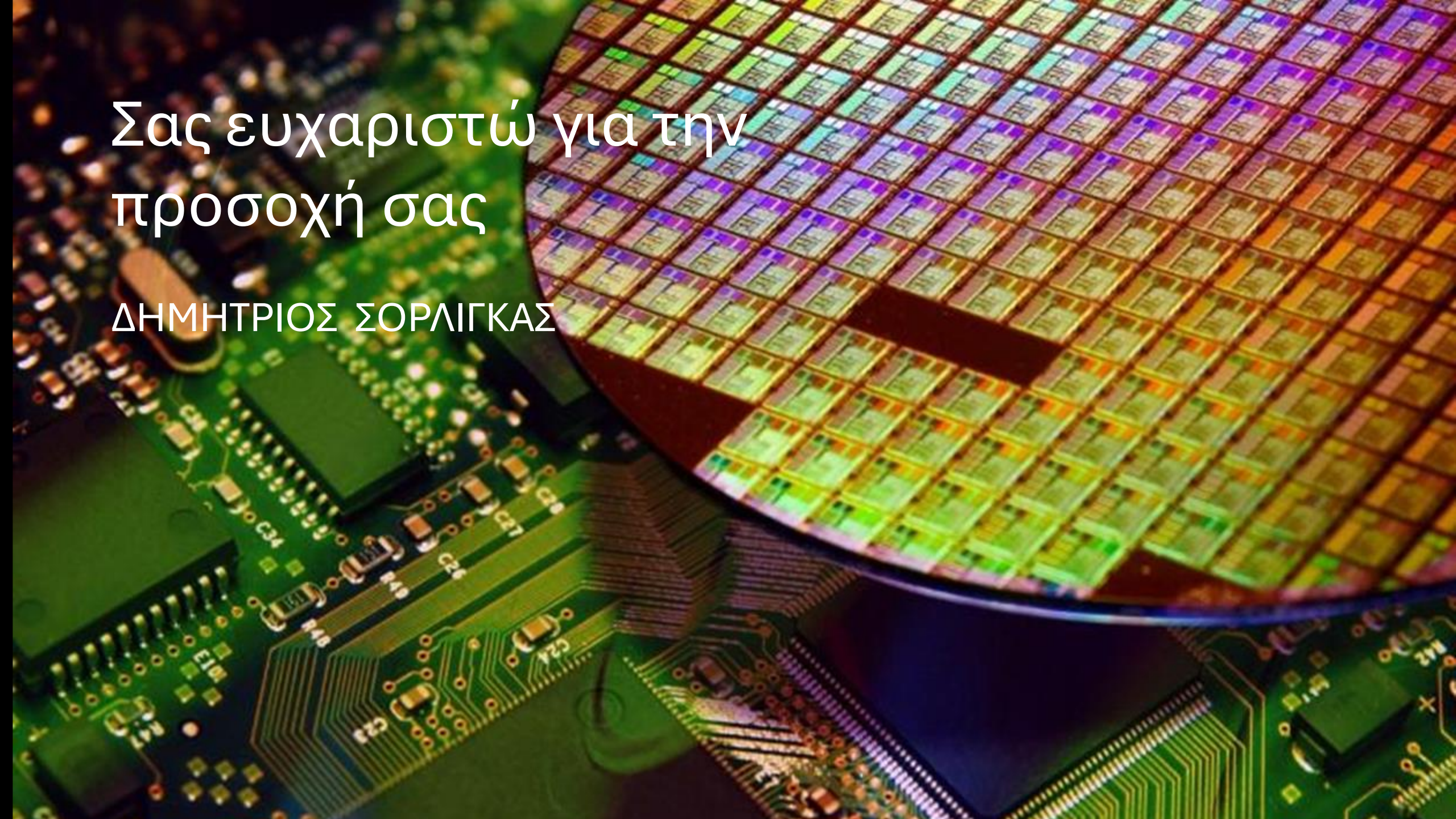
Πως είναι ένας SiPM



Που χρησιμοποιούνται τα SiPM

- Αστροφυσική
- Κβαντική κρυπτογραφία
- Μετρήσεις απόστασης σε εφαρμογές LIDAR
- Φασματοσκοπία





Σας ευχαριστώ για την
προσοχή σας

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΟΡΛΙΓΚΑΣ

Πηγές:

<https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/what-is-an-SiPM-and-how-does-it-work.html>

https://www.first-sensor.com/cms/upload/appnotes/AN_SiPM_Introduction_E.pdf

<https://docs.broadcom.com/doc/AFBR-S4XX-Working-with-Broadcom-SiPMs>

<https://www.laserfocusworld.com/home/article/16546382/glossary-of-silicon-photomultipliers-sipm-terms>

http://tmurphy.physics.ucsd.edu/apollo/doc/Aull_LLJ.pdf

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32109891/>

