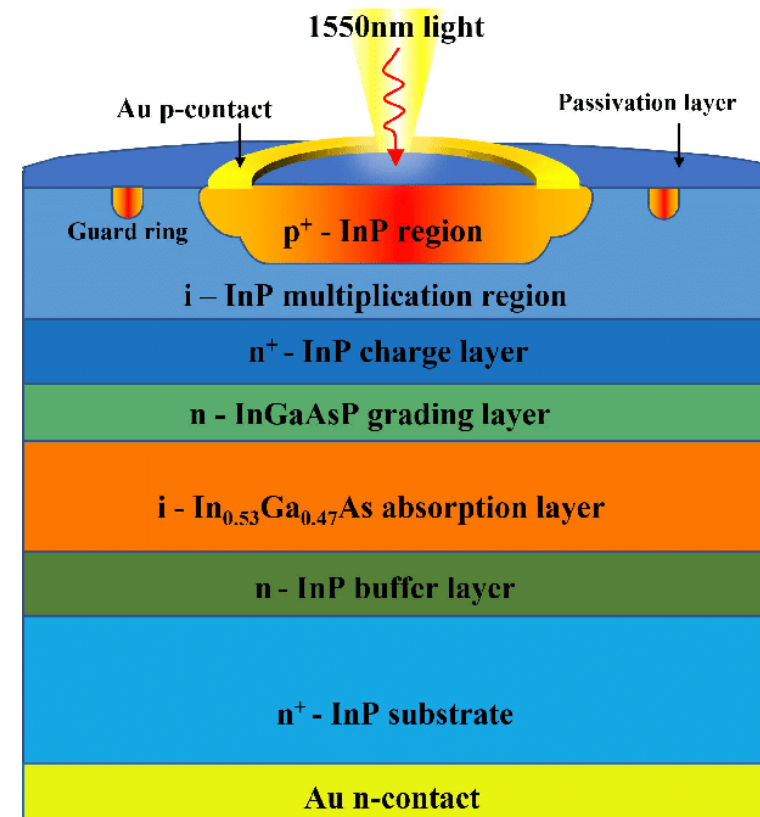




## Полупроводникови детектори на единични фотони – ключов елемент в апаратурата за QKD



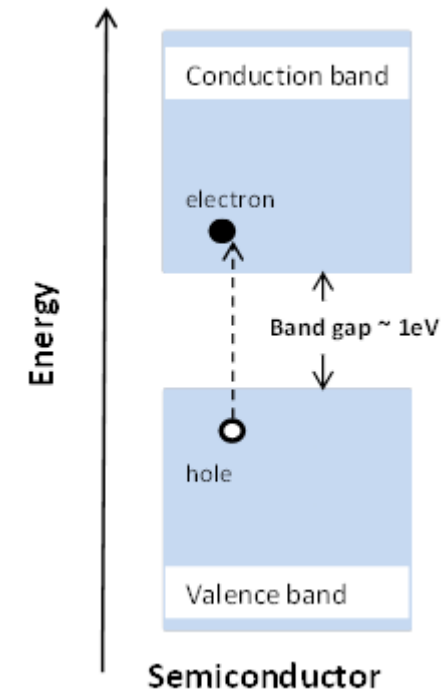
[IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 69, No. 9, September 2022]

[Hamamatsu InGa As APD]



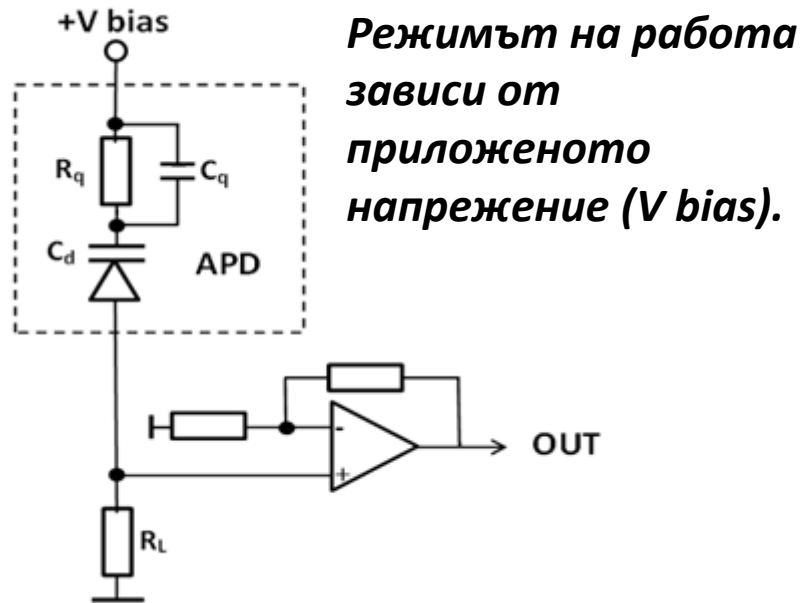
## Общи положения

- При попадане на фотон в полупроводника в него се генерират токоносители – електрони и дупки. При прилагане на електрично поле те се насочват към електродите – потича ток, който може да бъде измерен.
- За да може да се регистрира фотона, енергията му трябва да е по-голяма от ширината на забранената зона на полупроводника. Например за  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$  тя е  $0.75\text{ eV}$ .
- Енергията на единичния фотон зависи от неговата дължина на вълната. Енергията на един фотон с дължина на вълната  $1550\text{ nm}$  е  $0.8\text{ eV}$ .

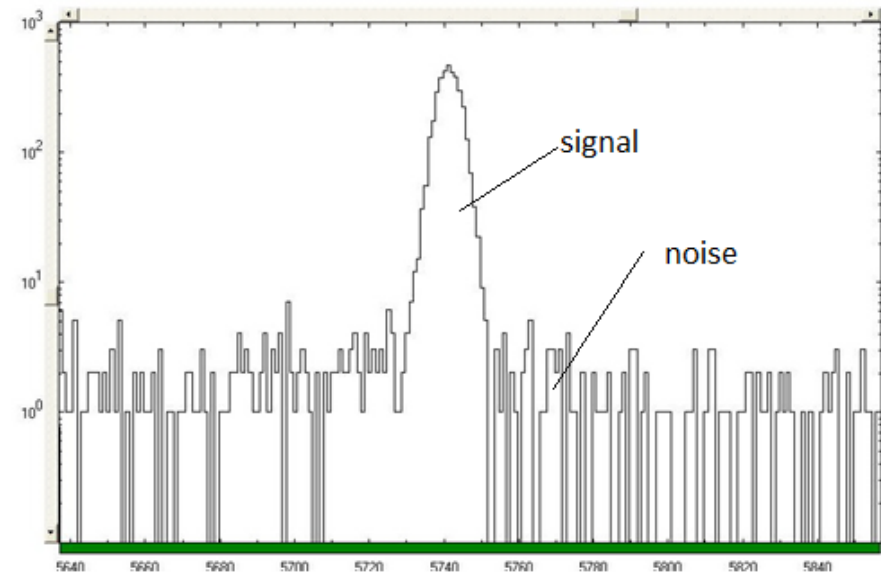


На границата между два полупроводника с различен тип проводимост се получава *p-n*-преход – обеднена на токоносители област. Именно в нея се регистрират фотоните. При прилагане на обратно напрежение големината на прехода расте. **Фотодиодите са полупроводникови устройства с обратно поляризиран *p-n*-преход и тънък входен прозорец.**

- **Основна задача на детектора – да преобразува енергията на фотона в измерим електрически сигнал.**
- **Използват се лавинни фотодиоди, работещи в гайгеров режим. При него единичен фотон е в състояние да индуцира лавина от електрони.**



**Режимът на работа  
зависи от  
приложеното  
напрежение ( $V_{bias}$ ).**



**За достоверна регистрация е необходимо  
сигналят да има амплитуда няколко  
пъти по – голяма от ширината на  
шумовата линия!**

- **С увеличаване на напрежението ( $V_{bias}$ ) токоносителите достигат скорости достатъчни за ударна йонизация.**
- **След възникването на лавината тя трябва да се „загаси“ за да е възможно регистрирането на следващ фотон.**

[www.euroqci.bg](http://www.euroqci.bg)

Проект 101091399 “Национален план за изграждане на QCI за България” е съфинансиран от Европейския съюз.

Изразените позиции са на автора/авторите и не отразяват непременно гледната точка на Европейския съюз и Европейската комисия.

Нито Европейският съюз, нито съфинансиращият орган не носят отговорност за тях.



## Основни характеристики на лавинните фотодиоди

- **Квантова ефективност** - съотношението между генерираните във фотодиода електрони и броя на падналите фотони. В идеалната ситуация един фотон освобождава един електрон и “идеалната” квантова ефективност е “1”. В реалните устройства квантовата ефективност е различна за всяка дължина на вълната. *Винаги, когато се дава квантовата ефективност на диода трябва да се каже и за каква дължина на вълната се отнася тя.*
- **Ефективност на регистрация на фотоните (photon detection efficiency), PDE** – броят регистрирани фотони към броя фотони, попаднали върху активната площ на фотодиода. Зависи от: вероятността за адсорбция на фотона (зависи от отражателната способност на детектора, дълбочината на прехода и дебелината на обеднената област) и вероятността за предизвикване на лавина (нараства с увеличаване на полето). Ефективността расте с понижаване на температурата и с увеличаване на работното напрежение.
- **Времево трептене (Jitter)** - статистическите флуктуации на времевия интервал между момента на пристигане на фотона в детектора и предния фронт на изходния импулс. Зависи от фотодиода и схемата на гасене. Собственият „Jitter“ на фотодиода намалява с увеличаване на напрежението.
- **Мъртво време на детектора** – времето, необходимо на детектора да се възстанови от лавината и да бъде готов да регистрира следващия фотон. То ограничава **максималната скорост на броене** и зависи от детектора и свързаната с него електроника.



## Недостатък на лавинните фотодиоди

**Тъмнови импулси** - появяват на изхода на детектора в отсъствие на светлина и предизвикват лавина по същия начин както и при регистриране на фотон → на изхода на детектора се получават фалшиви импулси.

- **Първични (Dark count rate)** - резултат от топлинно възбуждане на електрони, които получават достатъчно енергия за да преминат от валентната зона в зоната на проводимост. Увеличават се с нарастване на напрежението - увеличава се електрическото поле през прехода, което води до нарастване скоростта на генерация на електрони и до увеличаване на вероятността за предизвикване на лавина от тях. При едно и също работно напрежение скоростта на първичните тъмнови импулси нараства с повишаване на температурата.
- **Вторични (послеимпулси (afterpulses))** – получават се при захващане на носители на заряд от уловки. След освобождаването си от уловките тези носители предизвикват лавина и генерират фалшив импулс, който не е свързан с попадане на фотон в детектора. Броят носители, които могат да бъдат захванати от уловки нараства с общия брой създадени носители. Затова броят на послеимпулсите се увеличава със забавяне гасенето на лавината и с нарастване интензитета на тока, който от своя страна е пропорционален на напрежението. Послеимпулсите се увеличават с понижаване на температурата, защото времето на престой в уловките расте експоненциално с понижаване на температурата.

[www.euroqci.bg](http://www.euroqci.bg)

Проект 101091399 “Национален план за изграждане на QCI за България” е съфинансиран от Европейския съюз.

Изразените позиции са на автора/авторите и не отразяват непременно гледната точка на Европейския съюз и Европейската комисия.

Нито Европейският съюз, нито съфинансиращият орган не носят отговорност за тях.



## Основни работни параметри

**Настройването и калибрирането на лавинните фотодиоди е сложен процес, тъй като е необходимо да се вземат предвид противоречащи си параметри.**

**Напрежение** – с повишение на напрежението се увеличава ефективността и се намалява “Jitter”-а, но расте броя на тъмновите импулси.

**Температура** – подбира се оптимална стойност. Понижаването на температурата намалява обратните токове и първичните тъмнови импулси, но увеличава послеимпулсите.

Освен температурата и работното напрежение, други важни параметри са пробивното напрежение, обратният ток, мъртвото време, времето на задръжка, ширината на времевите прозорци и т.н.