

Фотодетекторы

Лекция 3



Литература

- 1) Р. Ю. Шендрик, Е. А. Раджабов, Введение в физику сцинтилляторов-2, ИГУ, 2014
<http://medphysics-irk.ru/publ-kef/pdf-shendrik/handbook/Shendrik-scint-2.pdf>
- 2) S-O. Flyckt, C. Marmonier PHOTOMULTIPLIER TUBES. principles & applications
http://www2.pv.infn.it/~debari/doc/Flyckt_Marmonier.pdf
- 3) Hamamatsu. Photomultipliers tube
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf
- 4) Б. Салех, М. Тейх Оптика и фотоника. Принципы и применения. Часть 2. Москва, Интеллект, 2012

Про вторичную электронную эмиссию

1956

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Т. XVI, вып. 4

ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Н. С. Хлебников и В. В. Налимов, Москва

1. ВВЕДЕНИЕ

Под эмиссией вторичных электронов в широком смысле понимают испускание электронов различными веществами, подвергнутыми бомбардировке заряженными частицами (электроны, ионы) или метастабильными атомами. Часто также называют вторичными электронами те, которые освобождаются при действии на вещество рентгеновских квантов. При этом имеется в виду способ получения рентгеновых лучей — бомбардировка антикатада трубки электронами. Если, однако, не думать о происхождении рентгеновских квантов и обратиться к сущности явления, то будет ясно, что в этом случае мы имеем дело с фотоэффектом.

http://nuclphys.sinp.msu.ru/UFN/r364_d.pdf

План лекции

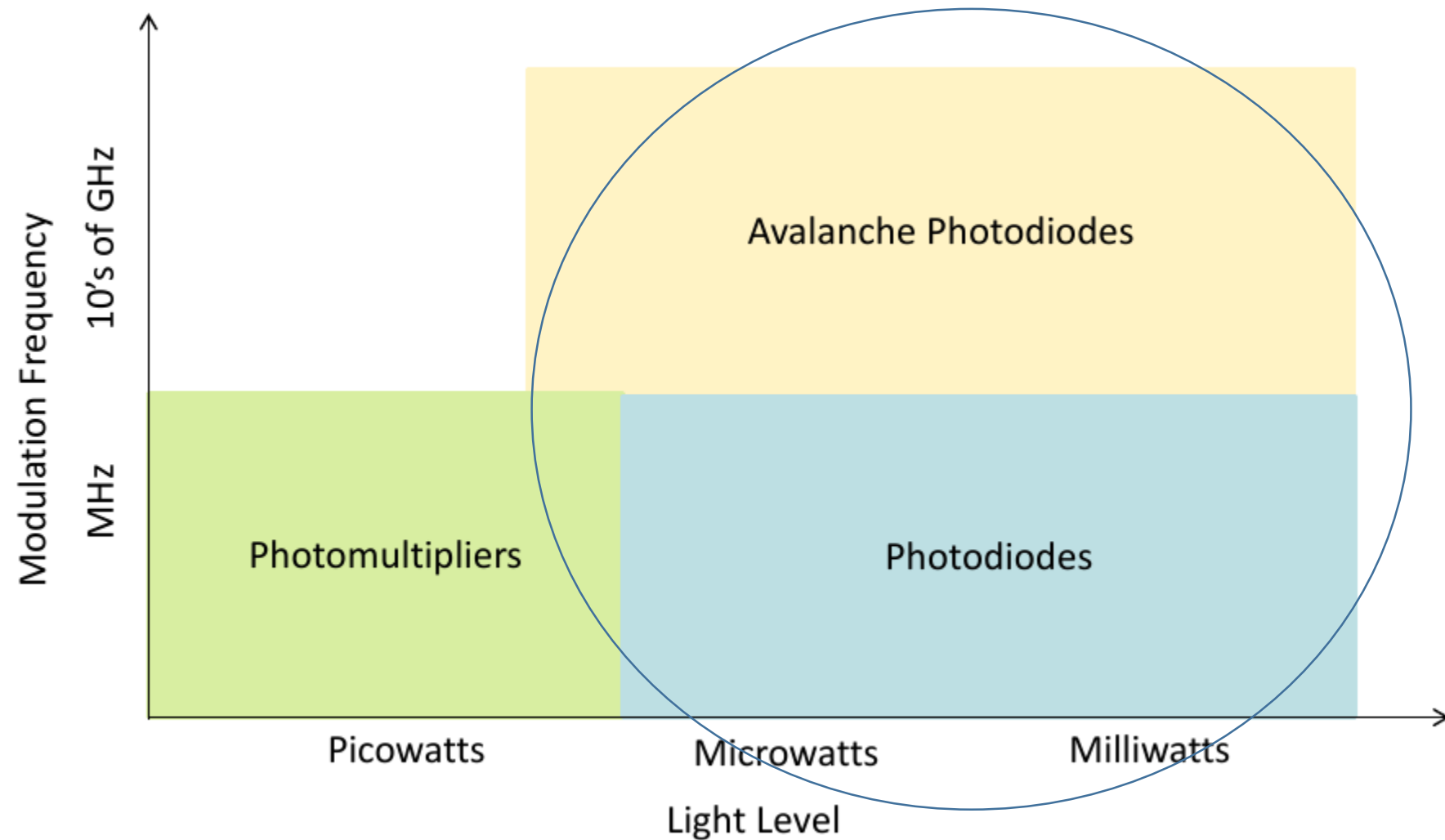


Таблица 18.1. Некоторые примесные полупроводниковые материалы со своей энергией активации и длиной волны красной границы

Фотодиоды.

$$\lambda_A = hc_0/E_A$$

Полупроводник: примесь	E_A , эВ	λ_A , мкм
Ge: Hg	0,088	14
Ge: Cu	0,041	30
Ge: Zn	0,033	38
Ge: Ga	0,010	115
Si: B	0,044	23

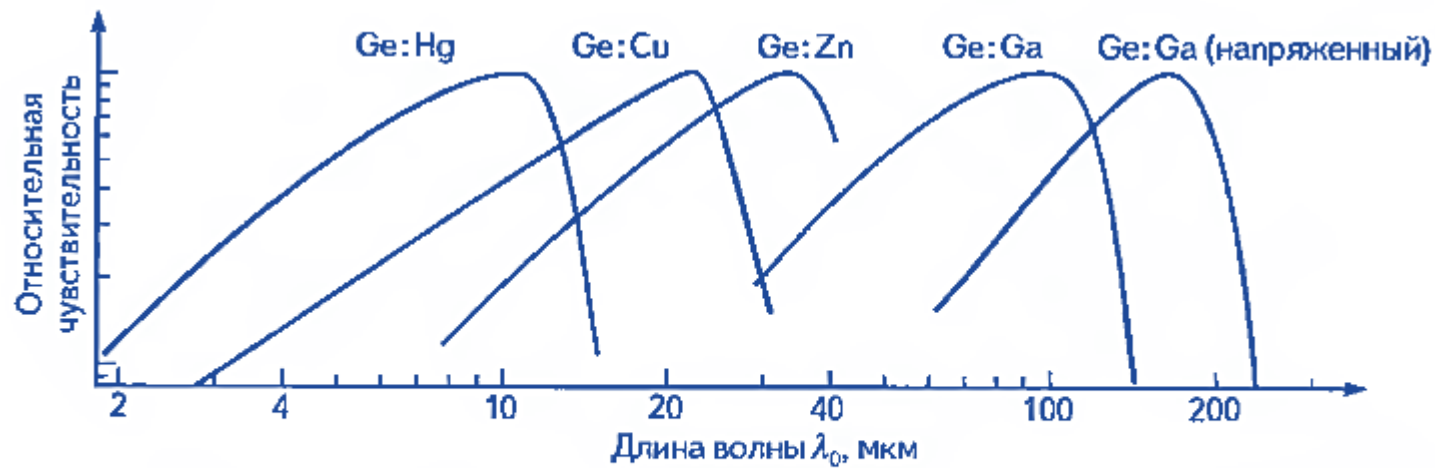
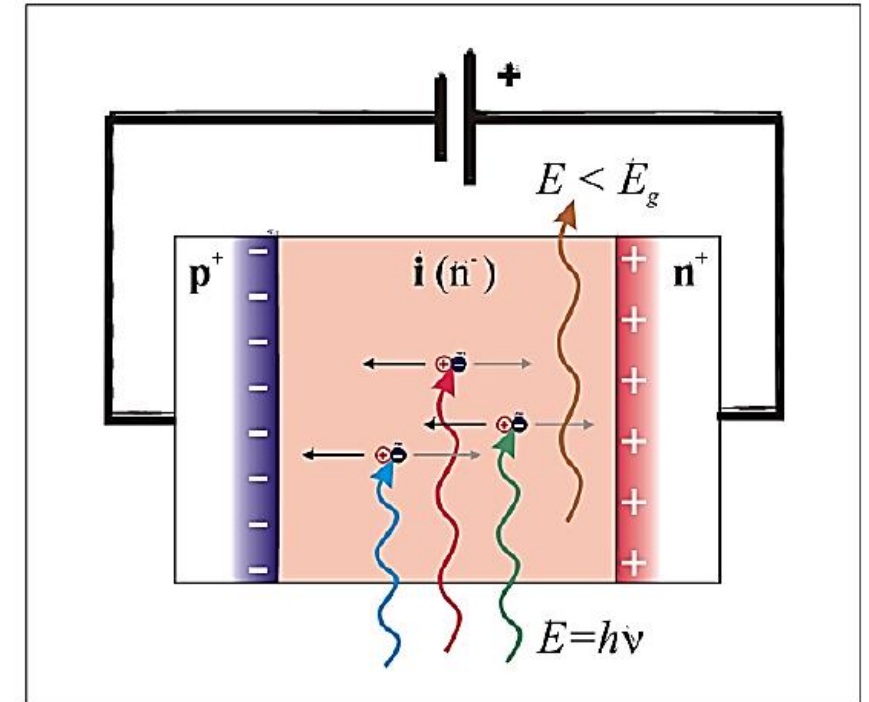
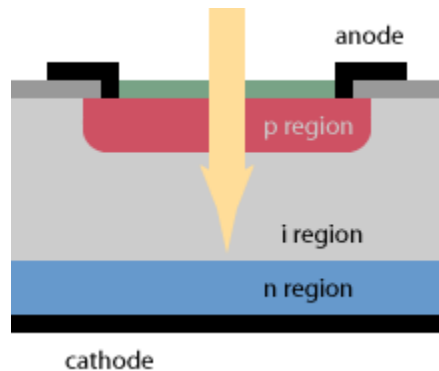


Рис. 18.9. Относительная чувствительность в зависимости от длины волны λ_0 (мкм) для пяти различных материалов на основе германия, отличающихся примесями и используемых как фотопроводящие приемники инфракрасного света

Фотодиоды. Pin-фотодиоды

Введение слоя собственного полупроводника между p- и n-слоями примесного полупроводника позволяет существенно увеличить размер области пространственного заряда. В i-слое свободные носители практически отсутствуют. Силовые линии электрического поля начинаются с доноров в n-области без экранировки проходят через i-слой и заканчиваются на акцепторах p-области



Фотодиоды. Pin-фотодиоды

Ширина i -слоя составляет обычно 500–700 мкм. В отличие от i -зоны, легированные слои очень тонкие. Все вместе это сделано для того, чтобы все оптическое излучение поглощалось в i -слое и сокращалось время переноса зарядов из i -зоны в легированные области. Итак, основное преимущество pin-фотодиода заключается в быстром переключении, так как поглощение излучения происходит в i -слое, где за счет дрейфового переноса носители заряда имеют высокие скорости. Другим преимуществом является высокая квантовая эффективность, поскольку толщина i -слоя обычно больше обратного коэффициента поглощения, и все фотоны поглощаются в i -слое.

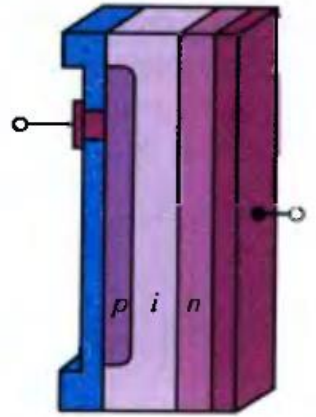
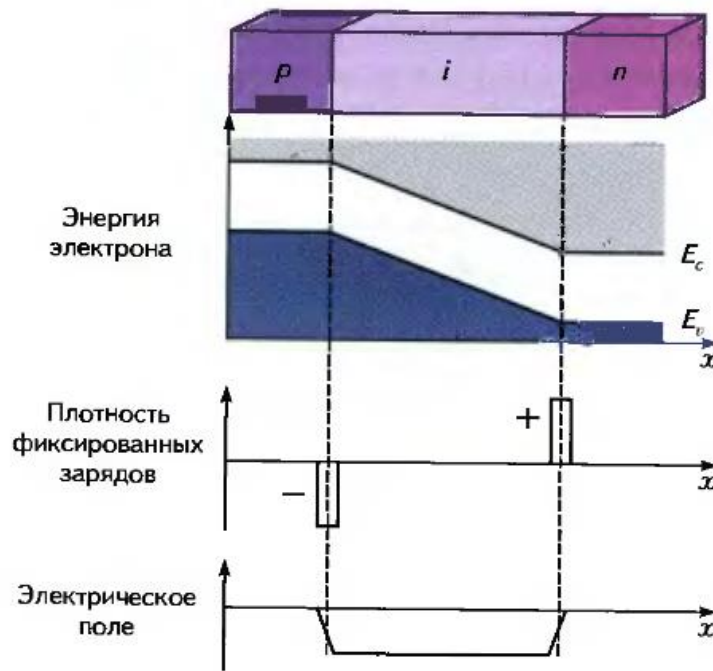
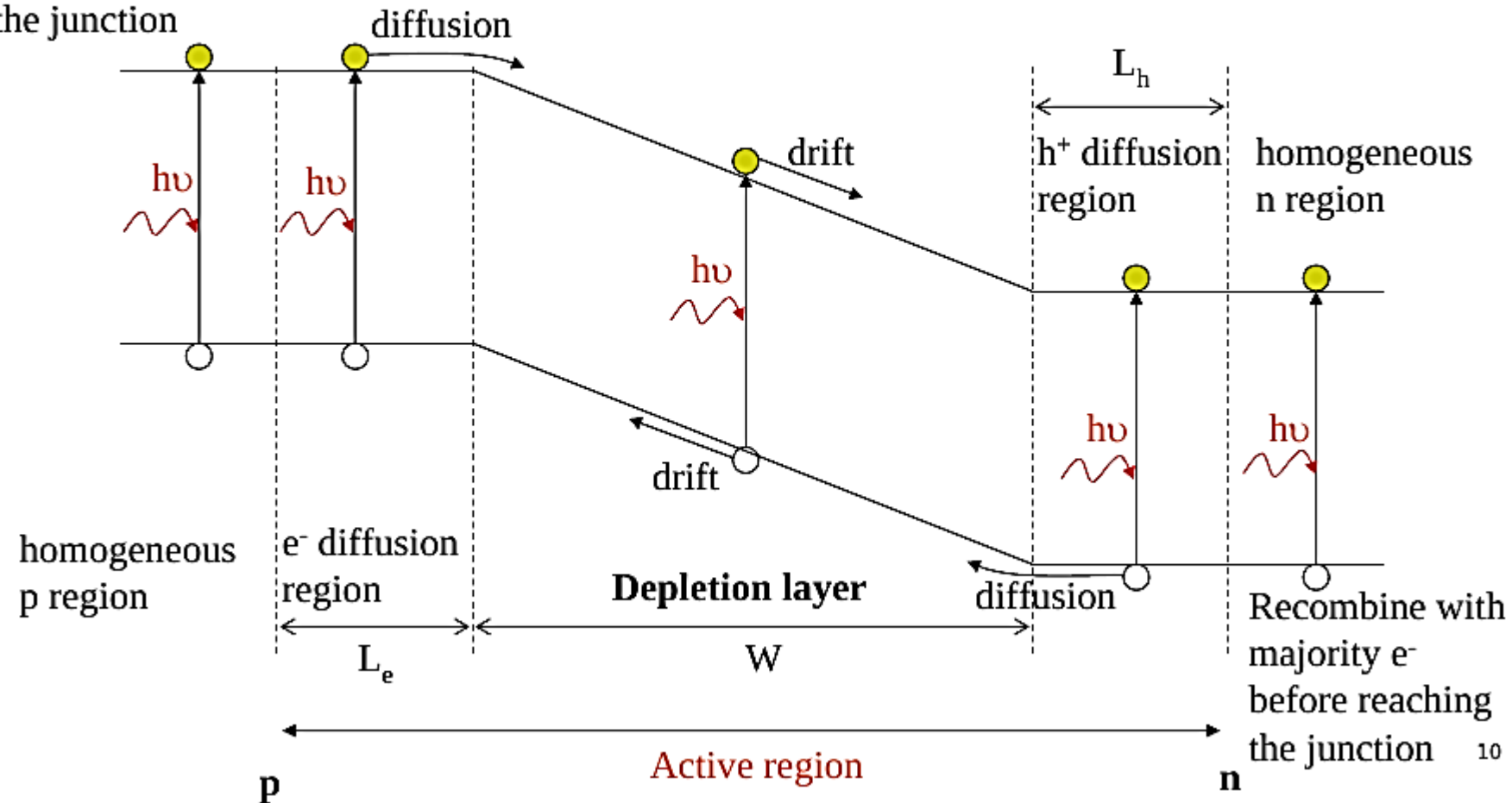


Рис. 18.16. Структура $p-i-n$ -фотодиода, схема энергетических зон, распределение заряда и электрического поля. Прибор может освещаться либо перпендикулярно, либо параллельно плоскости перехода

Фотодиоды. Pin-фотодиоды

Recombine with
majority h^+
before reaching
the junction



Фотодиоды. Pin-фотодиоды

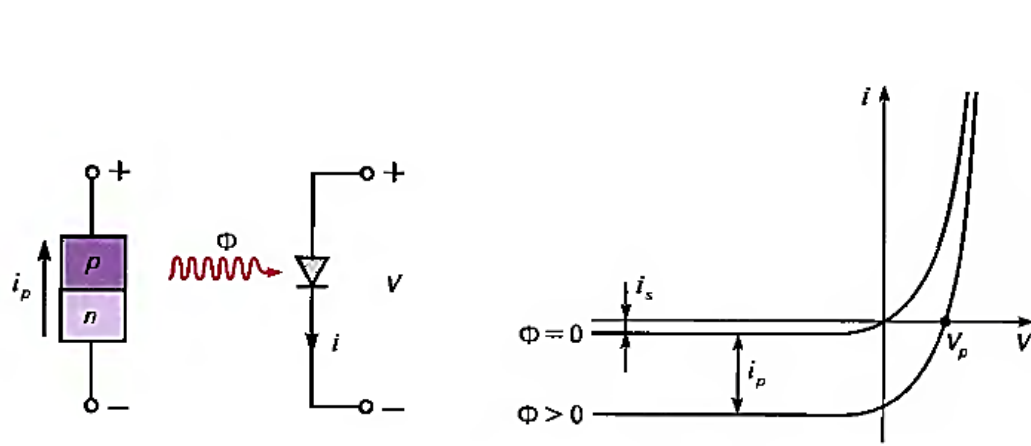


Рис. 18.12. Общая схема фотодиода и его вольт-амперная характеристика

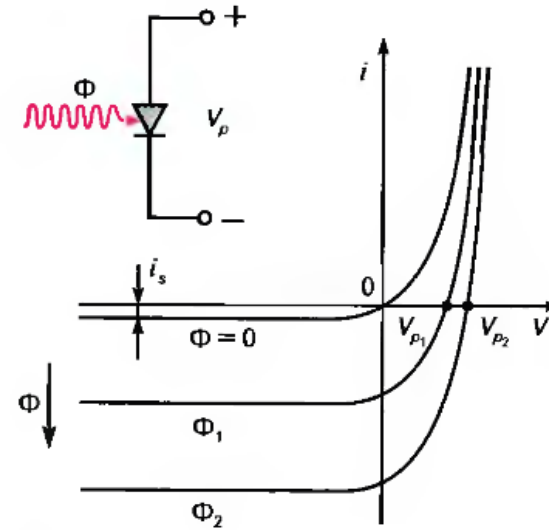


Рис. 18.13. Фотогальванический режим работы фотодиода

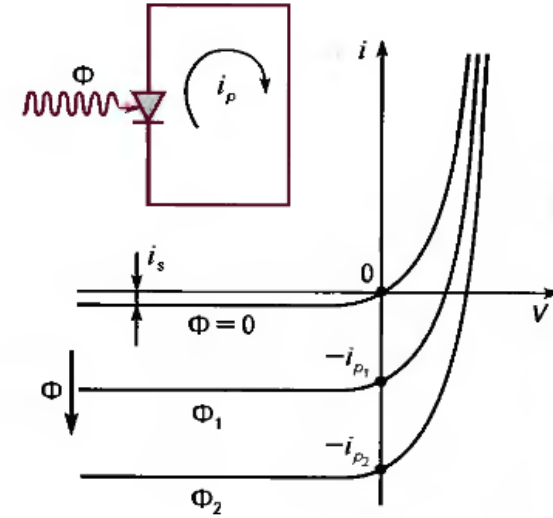


Рис. 18.14. Короткозамкнутый режим работы фотодиода

Существует три классических режима работы фотодиода: режим холостого хода (фотогальванический), короткозамкнутый и обратносмещенный (фотопроводящий). В режиме холостого хода (рис. 18.13) свет генерирует электронно-дырочные пары в обедненном слое. Дополнительные электроны, высвобожденные с n -стороны слоя, рекомбинируют с дырками с p -стороны и наоборот. В результате повышается электрическое поле, что создает на приборе фотоЭДС, величина которой растет с увеличением потока фотонов. Этот режим используется, например, в солнечных батареях. Чувствительность фотогальванического диода измеряется в вольтах на ватт, а не в амперах на ватт

Фотодиоды. Pin-фотодиоды

Наконец, фотодиод может работать в режиме обратного смещения, или «фотопроводящем» режиме, как показано на рис. 18.15, *а*. Если в цепь последовательно включается сопротивление нагрузки, прибор работает, как показано на рис. 18.15, *б*.

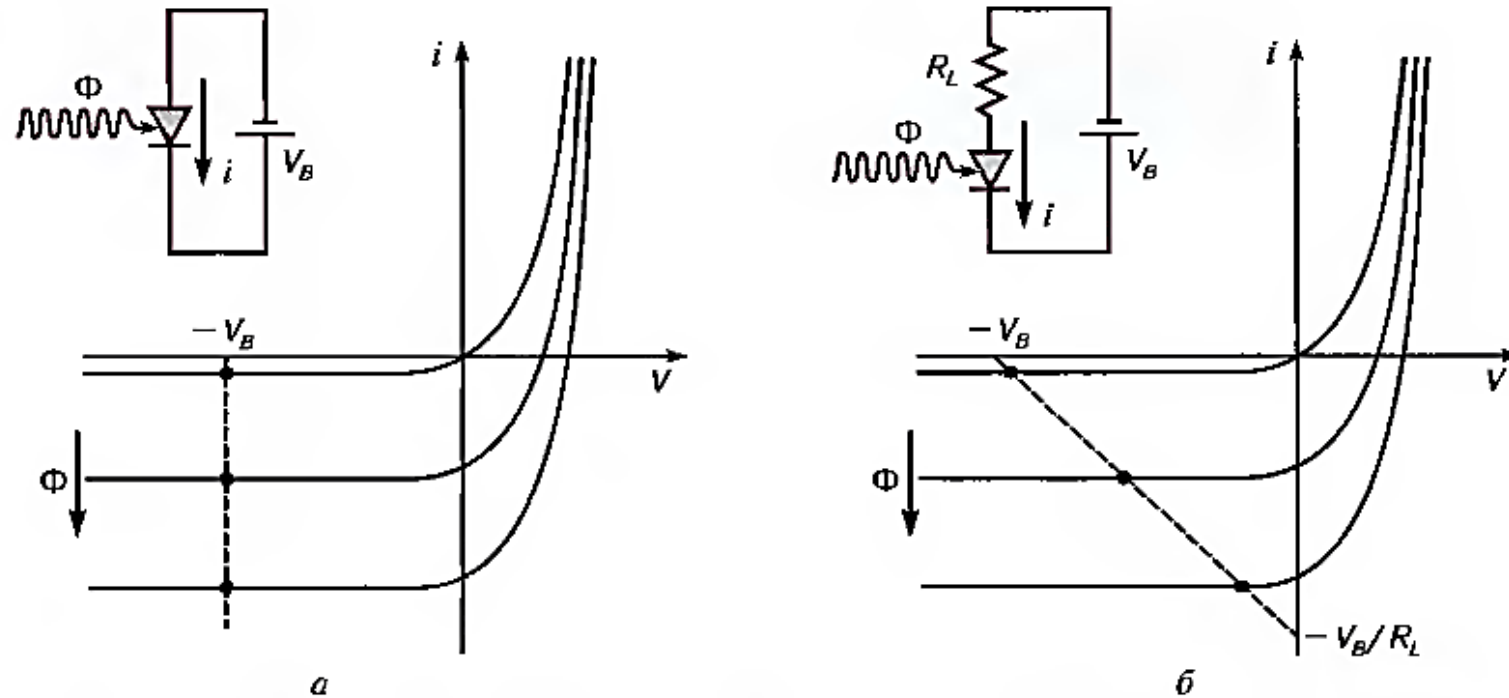
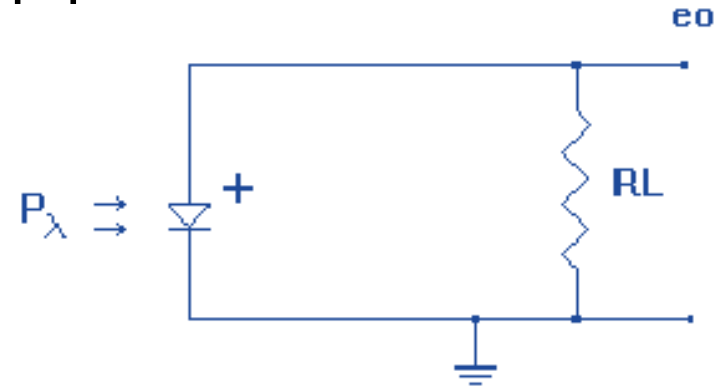


Рис. 18.15. Обратносмещенный режим работы фотодиода без сопротивления нагрузки (*а*) и с сопротивлением нагрузки (*б*). Рабочая точка лежит на штриховой линии

Фотодиоды. Pin-фотодиоды

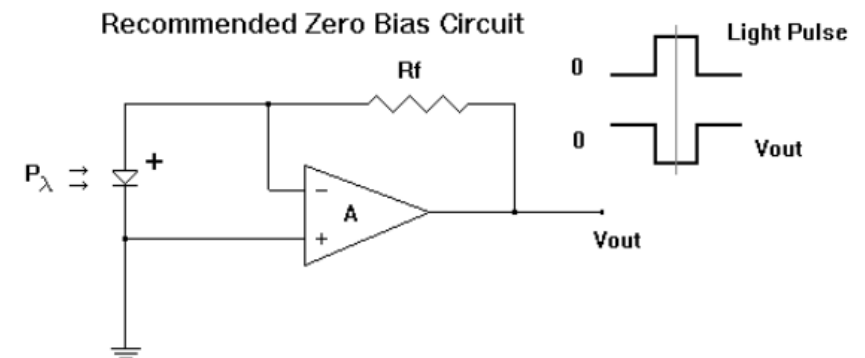
1. Фотовольтаический режим ($R_L \gg R_d$)

Сопротивление фотодиода R_d экспоненциально падает с увеличением освещенности.



2. Режим с нулевым напряжением смещения ($V=0$; $R_L \ll R_d$)

Напряжение линейно зависит от освещенности. Малый шум вследствие низких токов утечки, линейный отклик.



Фотодиоды. Pin-фотодиоды

3. Фотопроводящий режим ($V < 0$)

R_d является постоянным, R_l делается высоким, чтобы обеспечить линейный отклик фотоприемника (линейная зависимость выходного напряжения от интенсивности падающего света).

Обратное смещение обеспечивает высокое быстродействие.

Negative Bias Circuit

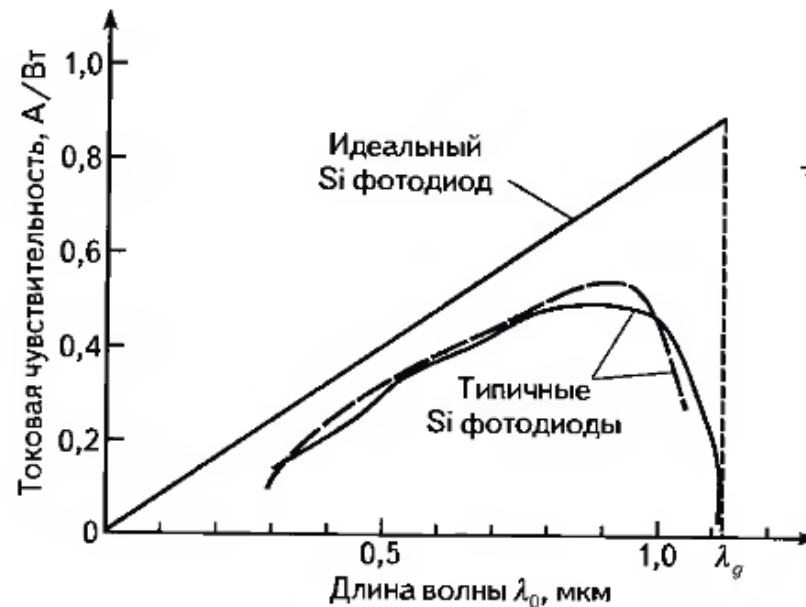
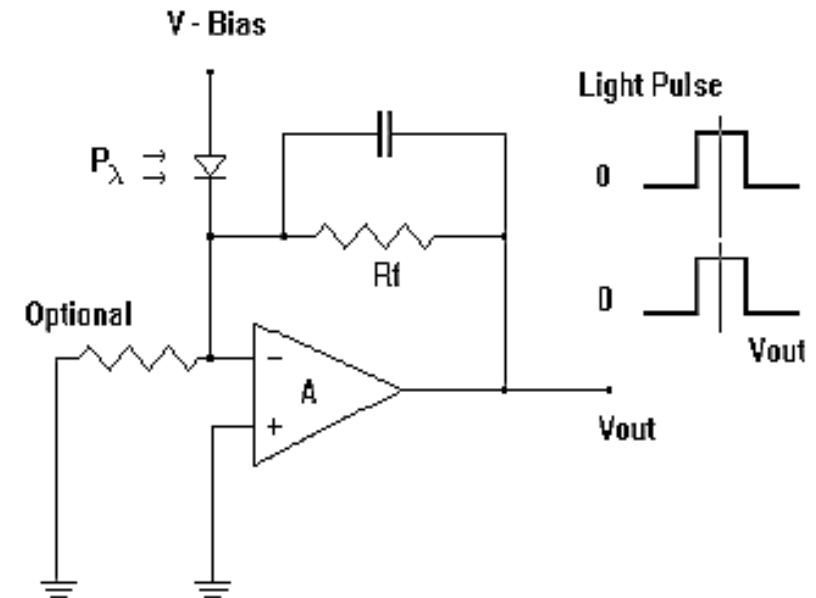


Рис. 18.17. Зависимость токовой чувствительности от длины волны (мкм) для идеального и двух серийно выпускаемых кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов. Квантовая эффективность тщательно спроектированного кремниевое фотодиода с антиотражательными покрытиями может приближаться к единице

Фотодиоды. Pin-фотодиоды

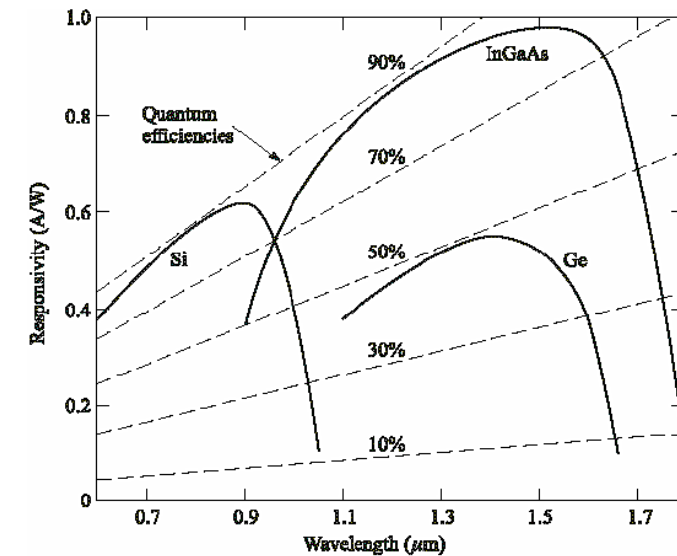
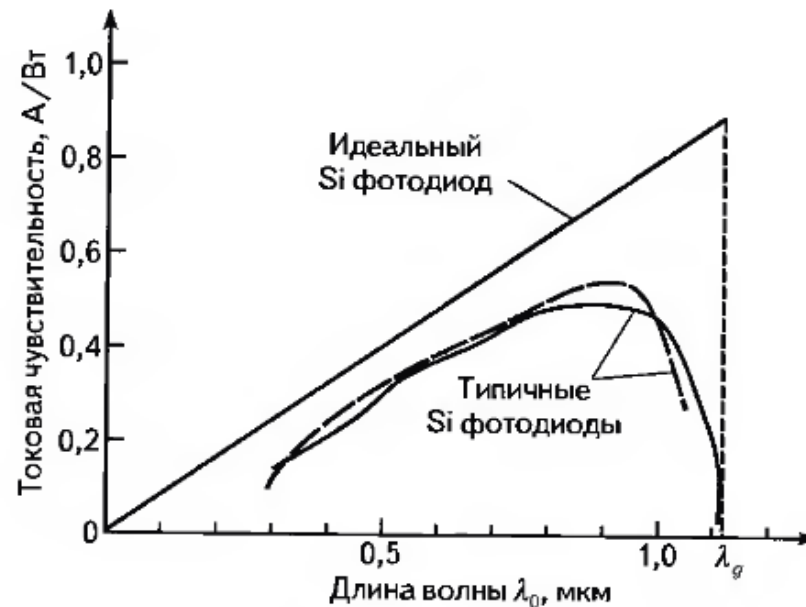
Квантовая эффективность фотодиода:

$$\eta = \frac{N_{phe}}{N_{ph}}$$

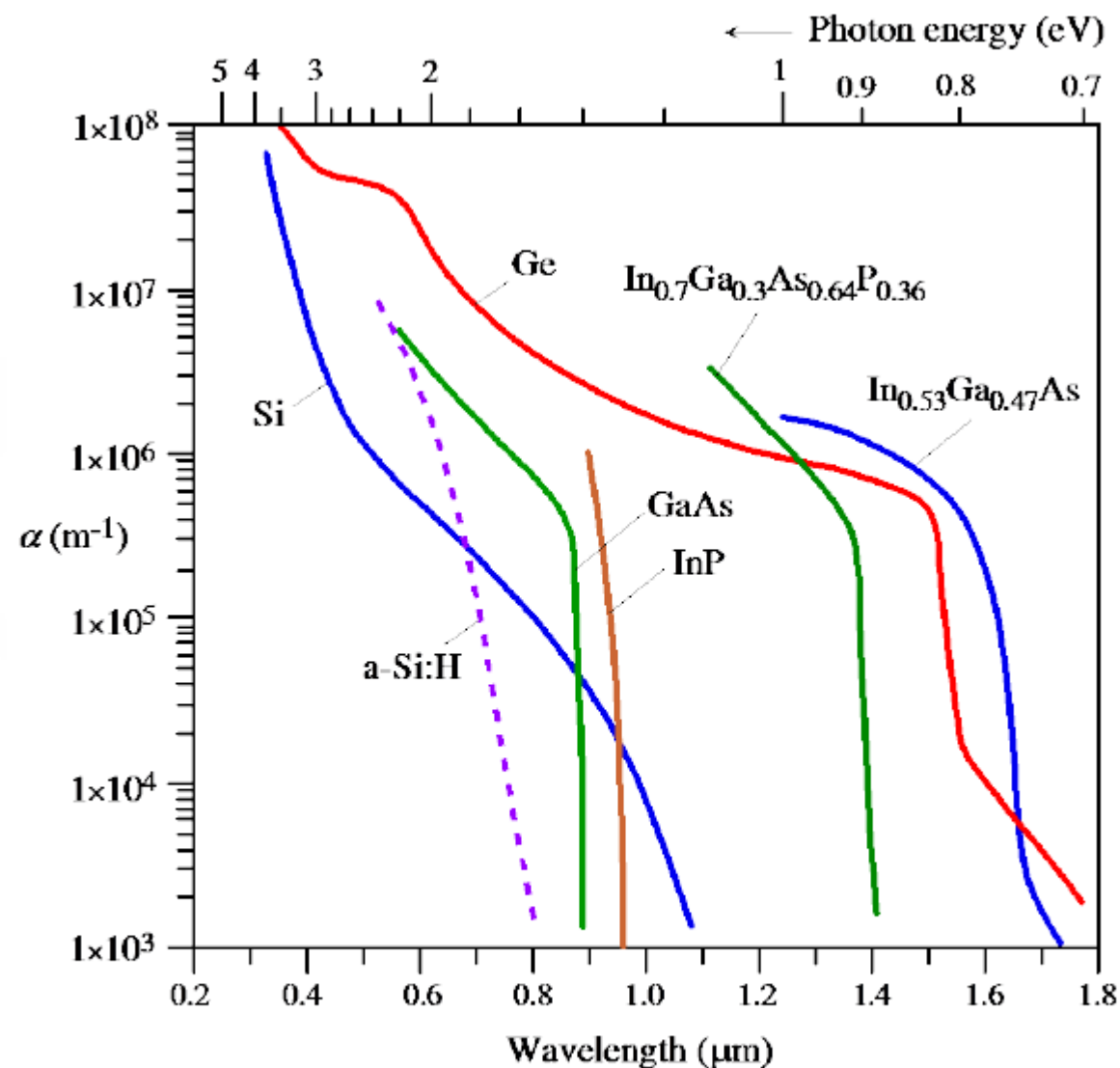
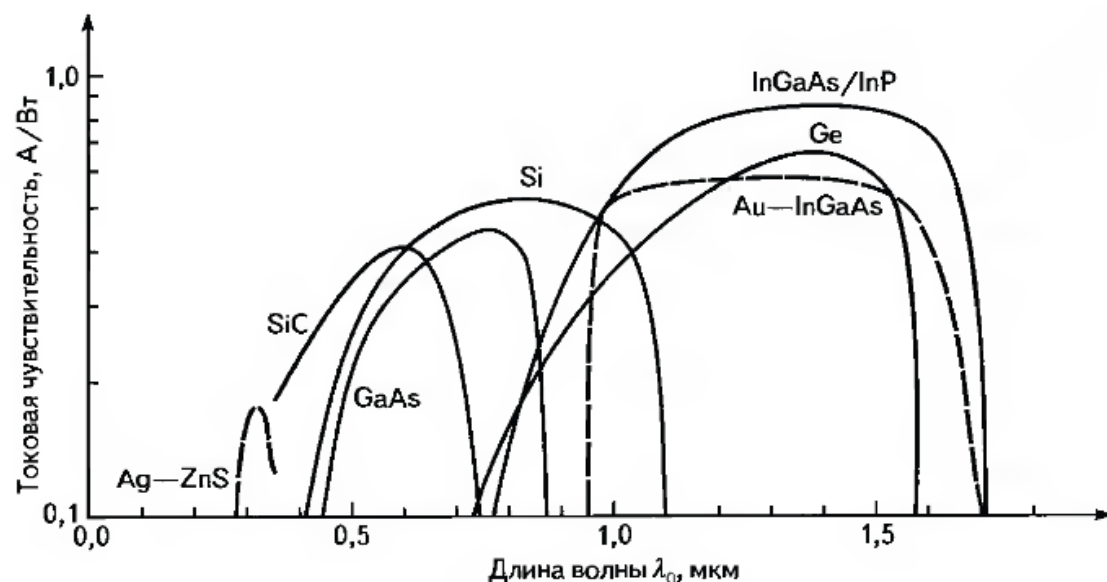
Токовая чувствительность (Responsivity):

$$R = \frac{I_p}{P} = \frac{\eta e}{h\nu}$$

Рис. 18.17. Зависимость токовой чувствительности от длины волны (мкм) для идеального и двух серийно выпускаемых кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов. Квантовая эффективность тщательно спроектированного кремниевое фотодиода с антиотражательными покрытиями может приближаться к единице



План лекции



Absorption coefficient (α) vs. wavelength (λ) for various semiconductors
(Data selectively collected and combined from various sources.)

Фотодиоды. Pin-фотодиоды

Квантовая эффективность фотодиода:

$$\eta = \frac{N_{phe}}{N_{ph}}$$

Квантовая эффективность – вероятность того, что фотоэлектрон, поглощенный фотодиодом, создаст в материале электрон-дырочную пару, которая даст вклад в ток, измеряемый на фотодиоде.

$$\eta(\lambda) = \zeta (1-R) [1 - \exp(-\alpha(\lambda)d)]$$

R – эффективный коэффициент отражения от фотокатода, α – коэффициент поглощения на длине волны λ , d – толщина фотодиода, ζ – число электрон-дырочных пар, которые дают вклад в ток

Фотодиоды. Лавинный фотодиод

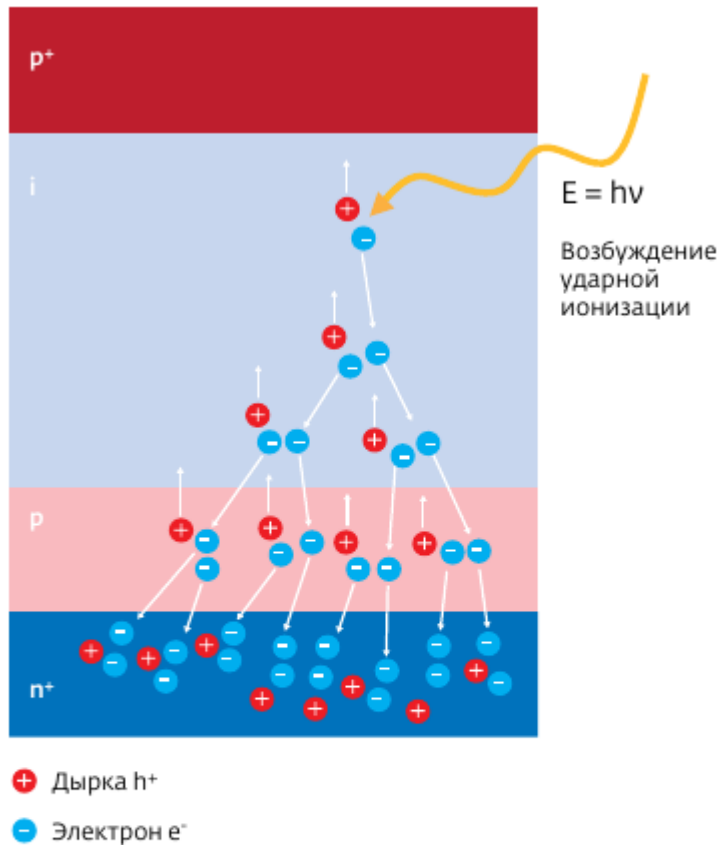
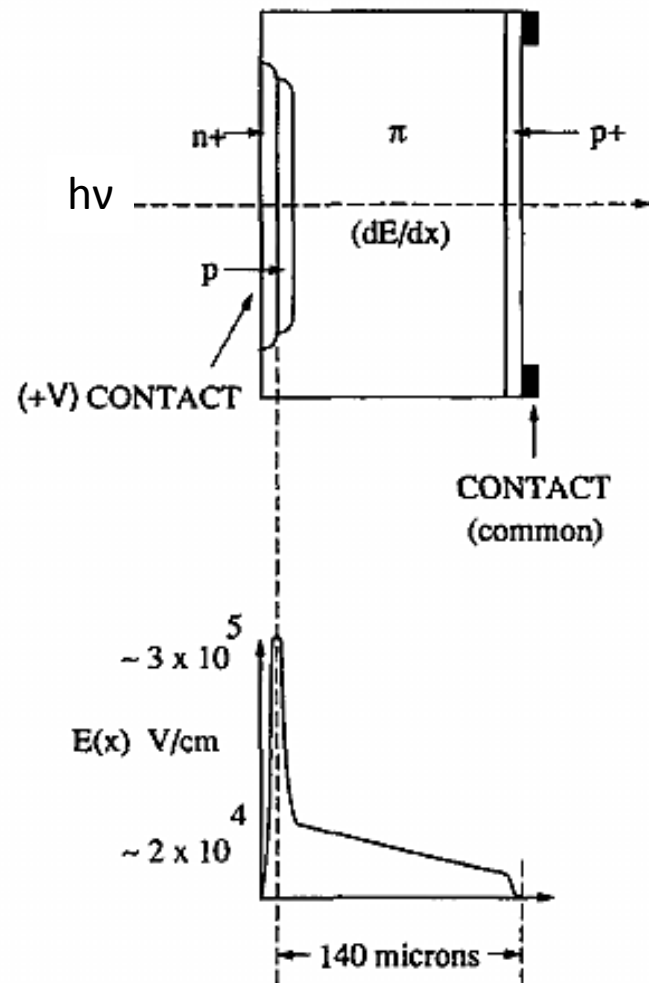


Рис.3. Принцип работы лавинного фотодиода. Падающий фотон создает электронно-дырочную пару. Электрон, который ускоряется, создает дополнительную электрон-дырочную пару посредством ударной ионизации, и возникает эффект лавины

Лавинное умножение достигается за счет увеличения напряжения до величины, близкой к пробойному. При этом на $p - n$ -переходе устанавливается очень сильное электрическое поле ($E > 10^5$ В/см). Под действием поля свободный носитель заряда (электрон или дырка) приобретает энергию, достаточную для ионизации нейтрального атома и освобождения еще одной электронно-дырочной пары, причем такой процесс может повторяться неоднократно. Для размножения дырок необходима большая напряженность электрического поля, чем для размножения электронов. На самом $p - n$ -переходе при подаче соответствующего напряжения возможно достижение стабильного умножения электронов, притом что лавинного умножения дырок не происходит. Как правило, максимальное усиление M , которого возможно достичь в такой структуре, колеблется от 10 до 200.

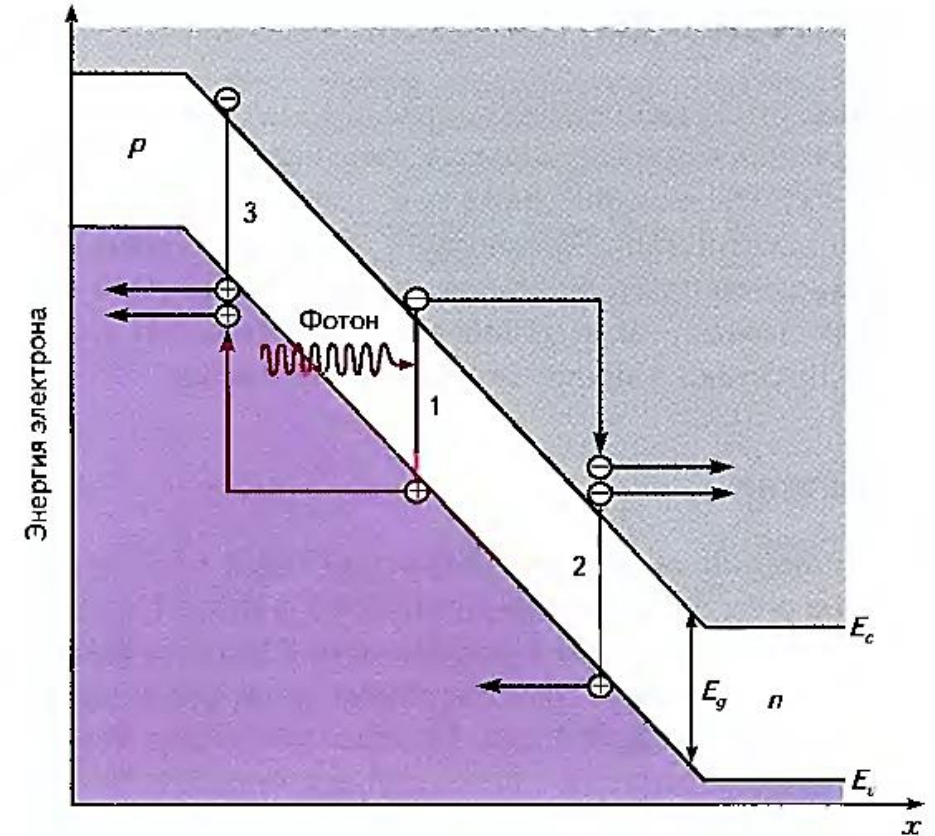
Фотодиоды. Лавинный фотодиод



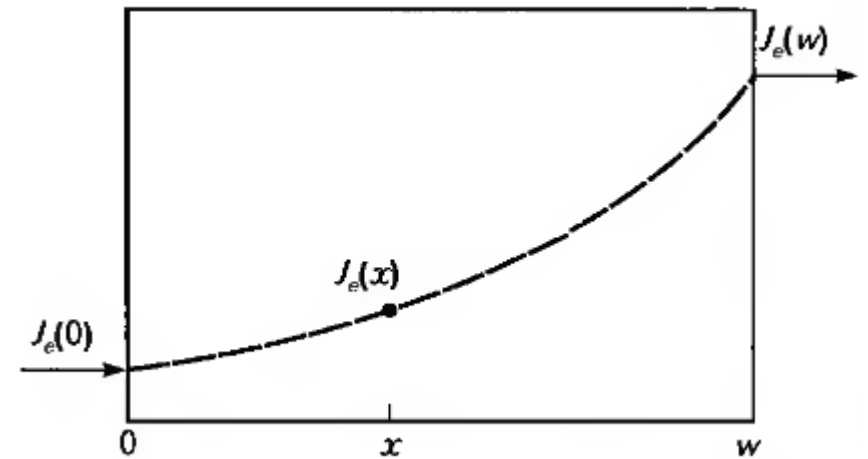
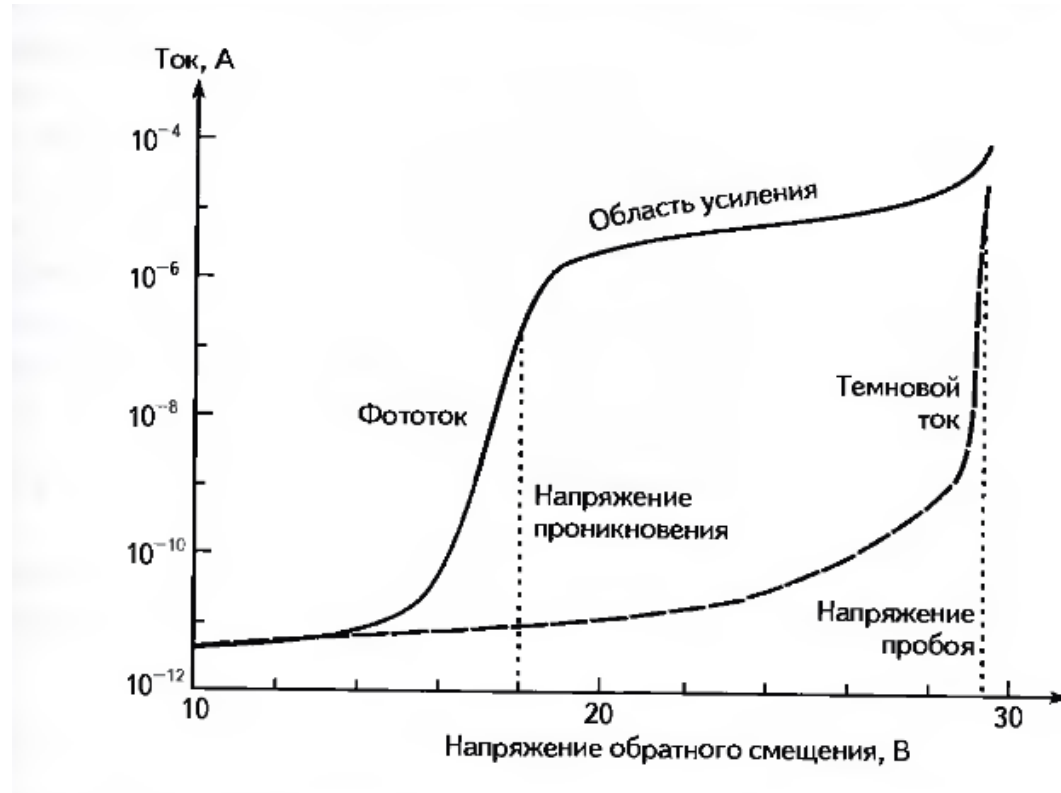
Лавинное умножение достигается за счет увеличения напряжения до величины, близкой к пробойному. При этом на $p - n$ -переходе устанавливается очень сильное электрическое поле ($E > 10^5 \text{ В/см}$). Под действием поля свободный носитель заряда (электрон или дырка) приобретает энергию, достаточную для ионизации нейтрального атома и освобождения еще одной электронно-дырочной пары, причем такой процесс может повторяться неоднократно. Для размножения дырок необходима большая напряженность электрического поля, чем для размножения электронов. На самом $p - n$ -переходе при подаче соответствующего напряжения возможно достижение стабильного умножения электронов, притом что лавинного умножения дырок не происходит. Как правило, максимальное усиление M , которого возможно достичь в такой структуре, колеблется от 10 до 200.

Фотодиоды. Лавинный фотодиод

Благодаря ряду особых качеств лавинные детекторы конкурируют с обычными детекторами. Применение кремниевых приборов с лавинным усилением наиболее эффективно для регистрации слабых потоков света, именно в этой области особенно четко выявляются преимущества лавинных детекторов. Они обладают высоким отношением сигнала к шуму за счет внутреннего усиления и поэтому могут быть использованы для регистрации малых интенсивностей света. Обычный кремниевый фотодиод способен регистрировать потоки света, начиная с нескольких тысяч фотонов, в то время как даже обычные лавинные детекторы регистрируют поток света на уровне нескольких сотен фотонов. Также они имеют высокую квантовую эффективность регистрации света. Если у лучших образцов ФЭУ квантовая эффективность составляет порядка 25 % (обычно 10–15 %), то у лавинных фотодиодов, или APD (*Avalanche PhotoDiode*), эффективность, как правило, более 50 %, а может достигать и 90 %.

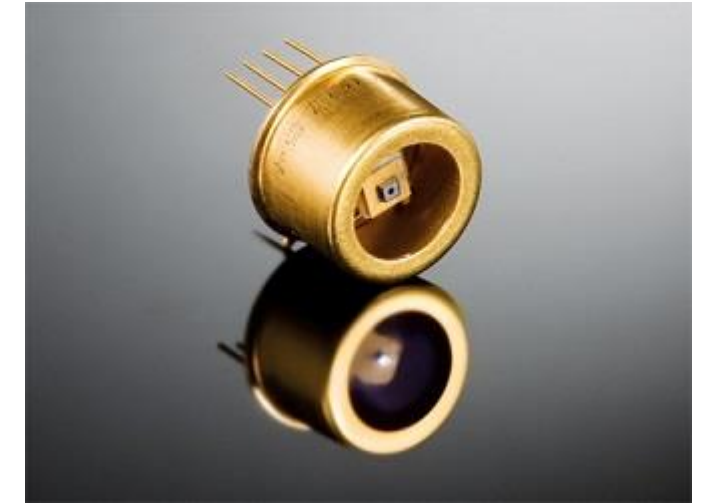
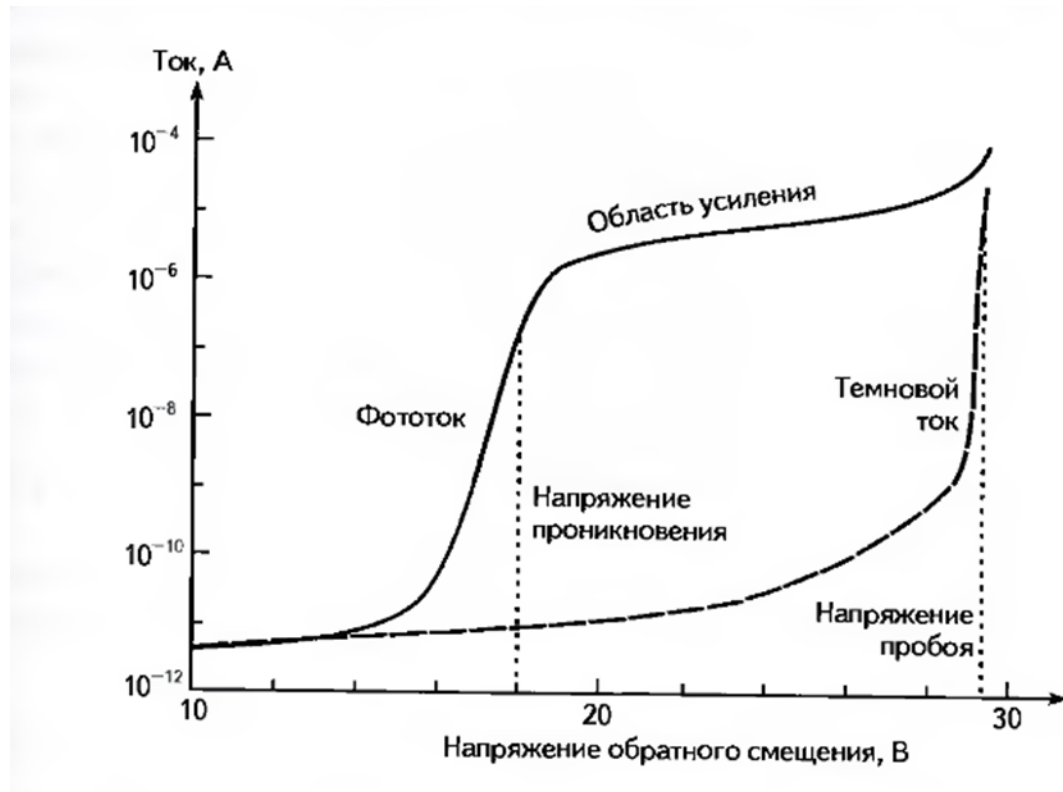


Фотодиоды. Лавинный фотодиод



Плотность электрического тока возрастает экспоненциально с ростом произведения коэффициента ионизации α_e и толщины умножающего слоя w . Результат аналогичен усилению в лазере [см. (14.7)].

Фотодиоды. Лавинный фотодиод для счета фотонов



Если требуются очень высокие коэффициенты усиления (10^5 — 10^6), возможна эксплуатация некоторых типов ЛФД при напряжениях выше пробойных. В этом случае требуется подавать на фотодиод ограниченные по току быстро спадающие импульсы. Для этого могут использоваться активные и пассивные стабилизаторы тока. Приборы, действующие таким образом работают в режиме Гейгера (Geiger mode). Этот режим применяется для создания однофотонных детекторов (при условии, что шумы достаточно малы)

Фотодиоды. Лавинный фотодиод для счета фотонов

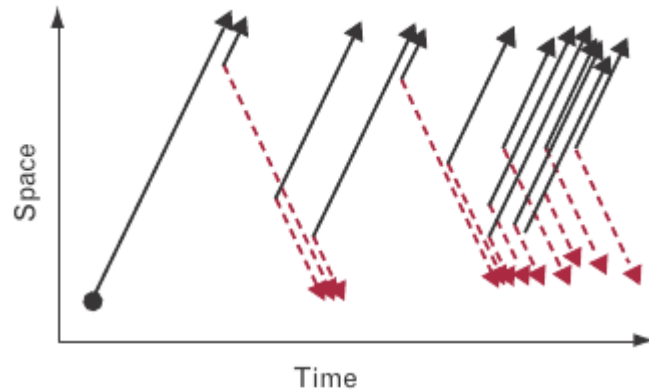


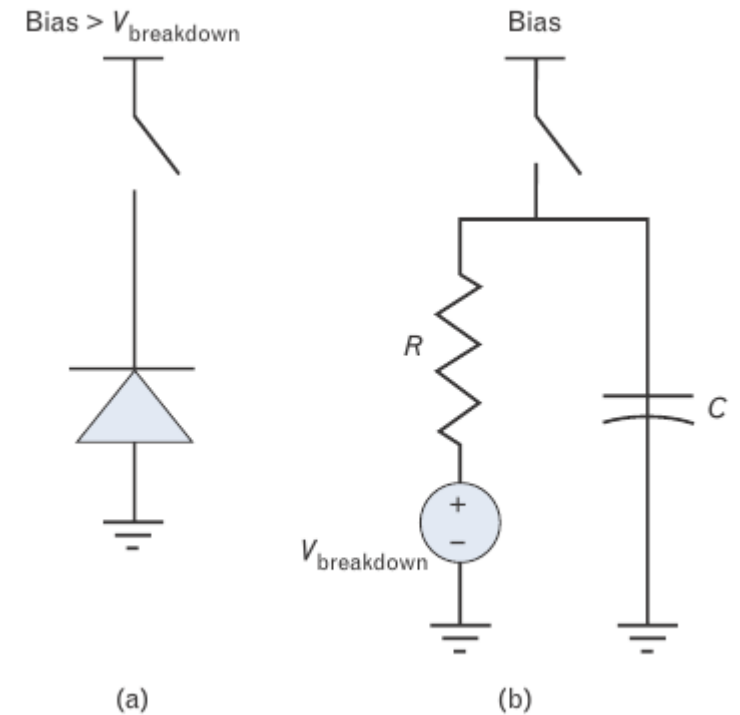
FIGURE 4. Concept of avalanche breakdown voltage. In Geiger mode, in which the avalanche photodiode (APD) is biased above the avalanche breakdown voltage, the growth in the population of electrons and holes due to impact ionization outpaces the rate at which they can be extracted, leading to exponential growth of current.

В случае если обратное напряжение, приложенное к лавинному фотодиоду, превышает напряжение пробоя, внутреннее электрическое поле становится настолько сильным, что позволяет получить высокий коэффициент усиления фотодиода (10^5 – 10^6). Такой режим работы лавинного фотодиода называется «режим Гейгера».

Генерируемые носители заряда создают новые электрон-дырочные пары, которые ускоряются высоким внутренним электрическим полем. Вновь созданные носители также ускоряются в приложенном поле, чтобы создать еще больше носителей, и этот процесс повторяется снова и снова (лавинное умножение) – коэффициент усиления становится пропорциональным приложенному напряжению. При работе фотодиода в режиме Гейгера возникает очень большой импульс, вызванный инжекцией в лавинный слой носителя заряда, созданного фотоном, падающим на активную поверхность фотодиода. Появление этого импульса позволяет обнаружить единичные фотоны. Каждый пиксель состоит из лавинного фотодиода, работающего в гейгеровском режиме, к которому последовательно подключен гасящий резистор (добавочное сопротивление).

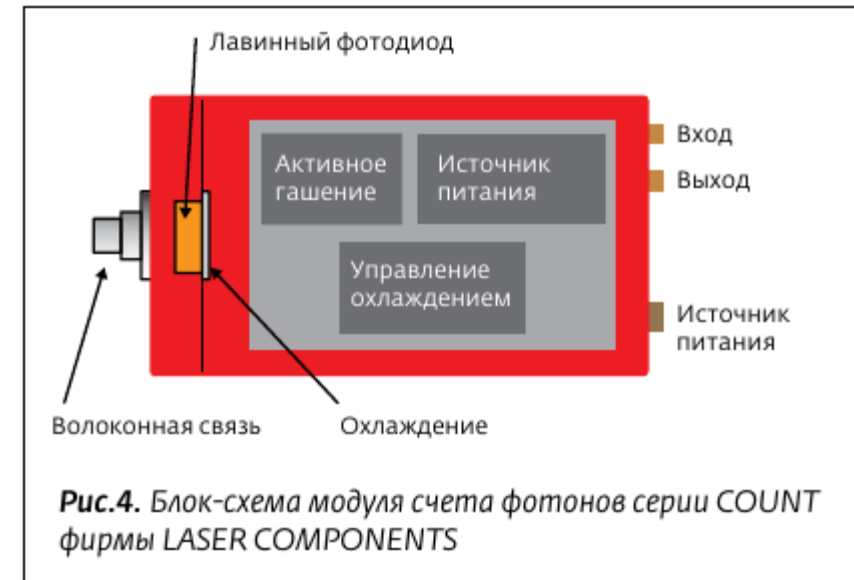
Фотодиоды. Лавинный фотодиод для счета фотонов

Гейгеровский режим работы при таком высоком коэффициенте усиления неизбежно приводит к очень высокому значению тока, протекающего в SPAD-диоде. Оно должно постоянно находиться под контролем, чтобы успеть с помощью соответствующей схемы гашения предотвратить повреждение фотоприемника. В своей простейшей форме, схема гашения может быть реализована на токоограничивающем резисторе, расположенном последовательно с лавинным фотодиодом, который будет гасить лавину, если значение резистора достаточно велико. Однако такие схемы обычно имеют долгое время восстановления, а оно ограничивает максимальную скорость счета. По этой причине большинство коммерчески доступных модулей счета фотонов на основе SPAD-диодов имеют активную схему гашения. Она регистрирует возникновение лавины, а затем снижает в течение нескольких наносекунд напряжение смещения на лавинном фотодиоде ниже напряжения пробоя.



Фотодиоды. Лавинный фотодиод для счета фотонов

Активная система регистрирует наступление лавины и в течение нескольких наносекунд снижает напряжение смещение ниже пробойного. Такая система обеспечивает относительно низкое мертвое время и быстрое время срабатывания. Скорость счета фотонов может достигать 10 МГц.



Гибридные ФЭУ

Кремниевый фотоумножитель (далее Si-ФЭУ) представляет собой микропиксельный лавинный фотодиод, работающий в гейгеровском режиме и предназначенный для счета фотонов. Каждый пиксель Si-ФЭУ создает импульсный выходной сигнал при обнаружении единичного фотона. Общий выходной сигнал кремниевого фотоумножителя представляет собой сумму выходных сигналов с каждого пикселя. Кремниевые фотоумножители обладают высокой обнаружительной способностью, необходимой для счета фотонов, и используются, если требуется зарегистрировать очень слабые световые сигналы на уровне единичных фотонов. На рисунке 1.18 показано строение кремниевого ФЭУ.

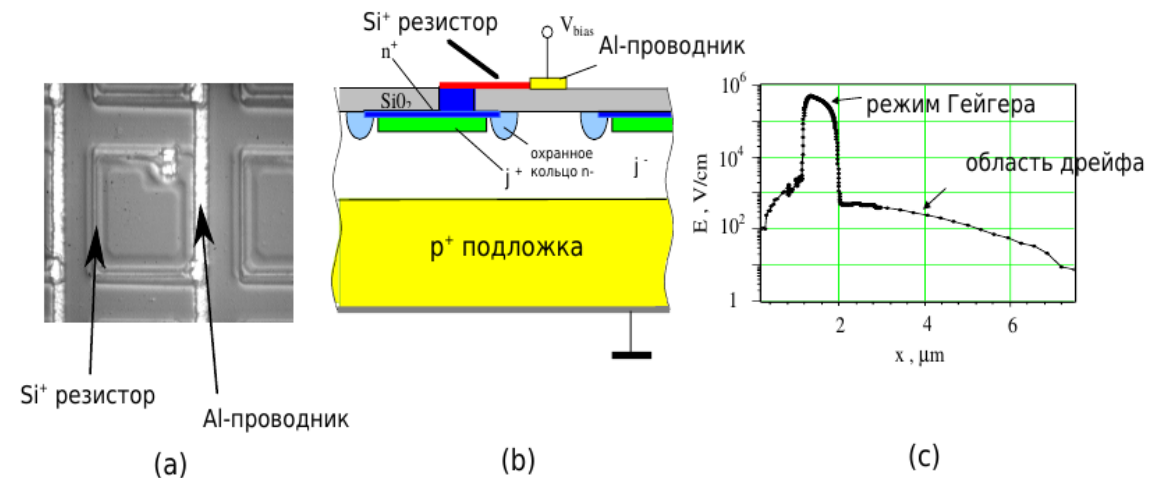
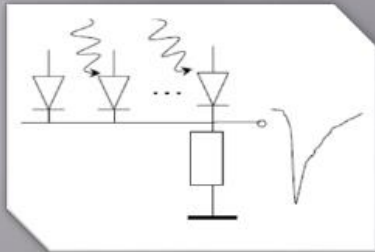
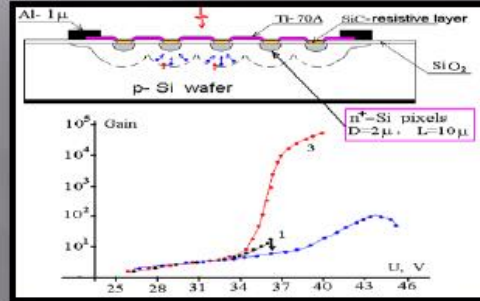


Рис. 1.18. Si-ФЭУ: (а) микрофотография Si-ФЭУ; (б) топология и (с) распределение электрического поля внутри эпитаксиального слоя

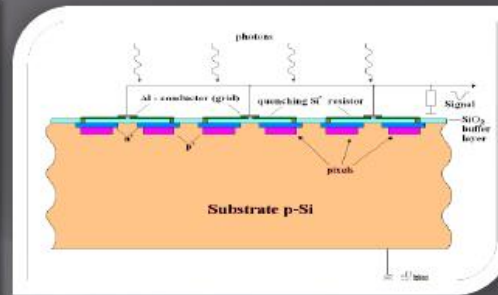
Гибридные ФЭУ



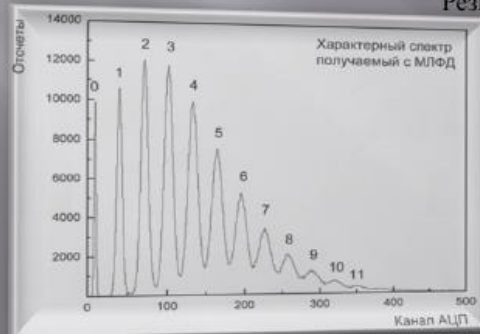
Отклик МЛФД на несколько фотонов (линейный)



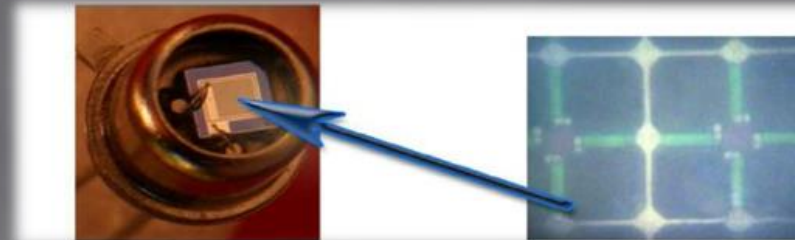
Первый работающий образец Металл-Резистор-Полупроводник - MRS



Схематическое изображение структуры современного МЛФД с поверхностными резисторами и пикселями



Спектр отклика МЛФД при малой интенсивности света.



Общий вид и фотография структуры (под микроскопом) современного МЛФД с поверхностными резисторами и пикселями

Кремниевый фотоумножитель состоит из лавинных фотодиодов в режиме Гейгера - пикселей. Суммарный выходной сигнал, получаемый с каждого пикселя, представляет собой выходной сигнал кремниевого фотоумножителя.

Гибридные ФЭУ

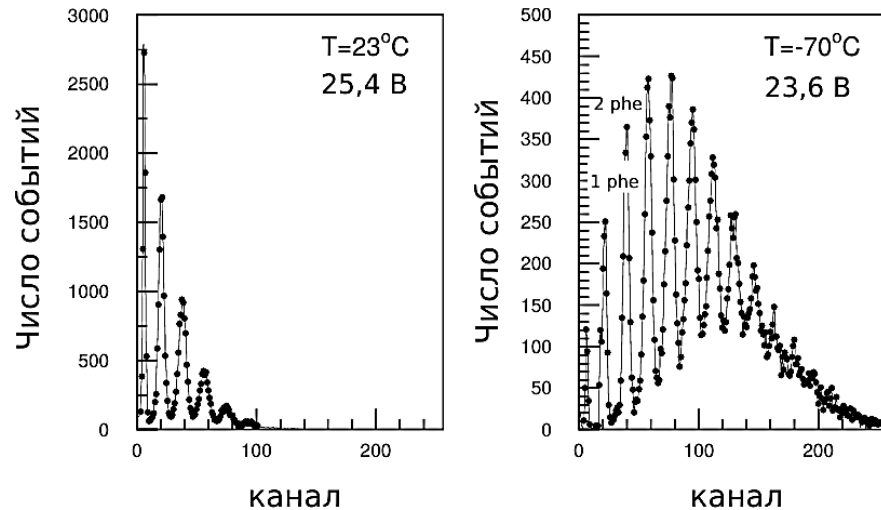
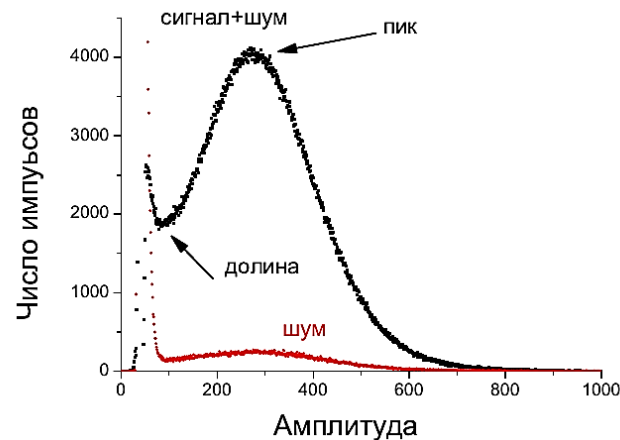


Рис. 1.19. Амплитудный спектр импульсов Si-ФЭУ



Кремниевый фотоумножитель состоит из множества пикселей лавинных фотодиодов, соединенных параллельно и работающих в гейгеровском режиме. При попадании фотона на активную область фотодиода выходной сигнал с каждого пикселя постоянен и не зависит от числа падающих фотонов. Это означает, что каждый пиксель фотодиода позволяет получить информацию о том, сколько фотонов попало на поверхность фотодиода. Гасящий резистор (добавочное сопротивление) присоединен к каждому пикселю и позволяет выходному току протекать через него. Поскольку все пиксели фотодиода соединены в один считывающий канал, то выходные импульсы с пикселей суммируют друг друга, создавая большой импульс. Измеряя амплитуду или электрический заряд этого импульса, можно определить количество фотонов, детектируемое кремниевым ФЭУ.

Si-ФЭУ широко используются для медицинской визуализации, например в позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), а также в однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ). Кроме того, кремниевые фотоумножители широко применяются для регистрации очень слабых световых сигналов на уровне счета единичных фотонов. Si-ФЭУ обеспечивает высокую обнаружительную способность, необходимую для счета фотонов. Этот детектор обладает такими преимуществами, как высокий коэффициент усиления при работе при низком напряжении смещения, высокая эффективность обнаружения фотона, быстрое действие, высокая скорость

Схемы считывания данных

1. *ПЗС-технология.* В ПЗС заряд, создаваемый отдельным элементом детектора, передается в скрытый ПЗС-канал в заданный момент времени. Затем через этот канал заряд последовательно передается от одного положения детектора к другому, пока не достигнет угла микросхемы, где считывается. Множество электродных структур и синхронизирующих элементов разработано для периодического считывания заряда, накопленного каждым элементом, и генерации потока данных, представляющих изображение.

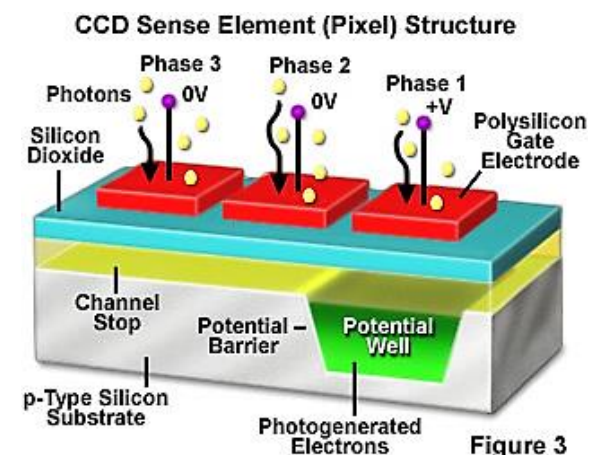
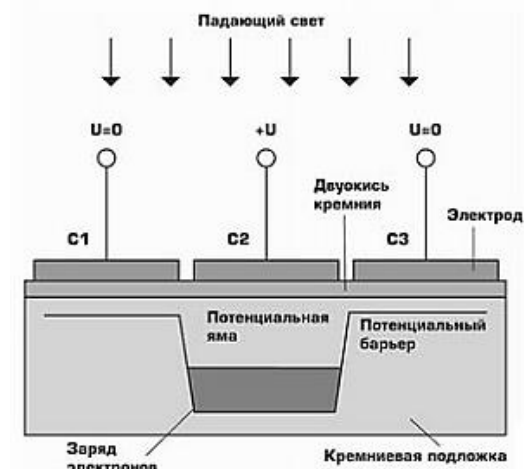
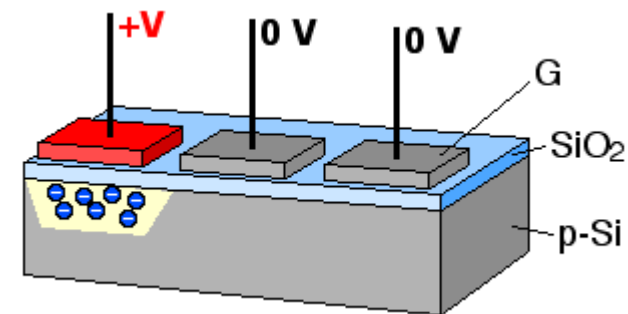
2. *КМОП-технология.* Технология комплементарных структур металл—оксид—полупроводник (КМОП) широко применяется при изготовлении электронных приборов и интегральных схем. Благодаря низкому энергопотреблению и сравнительной дешевизне, эта технология стимулировала массовое производство матричных видеопреобразователей. Каждый элемент детектора соединен с несколькими полевыми МОП-транзисторами, которые усиливают и считывают сигнал детектора. В отличие от последовательного считывания в ПЗС, считывание с каждого элемента матрицы детекторов производится индивидуально.

Схемы считывания данных. ПЗС

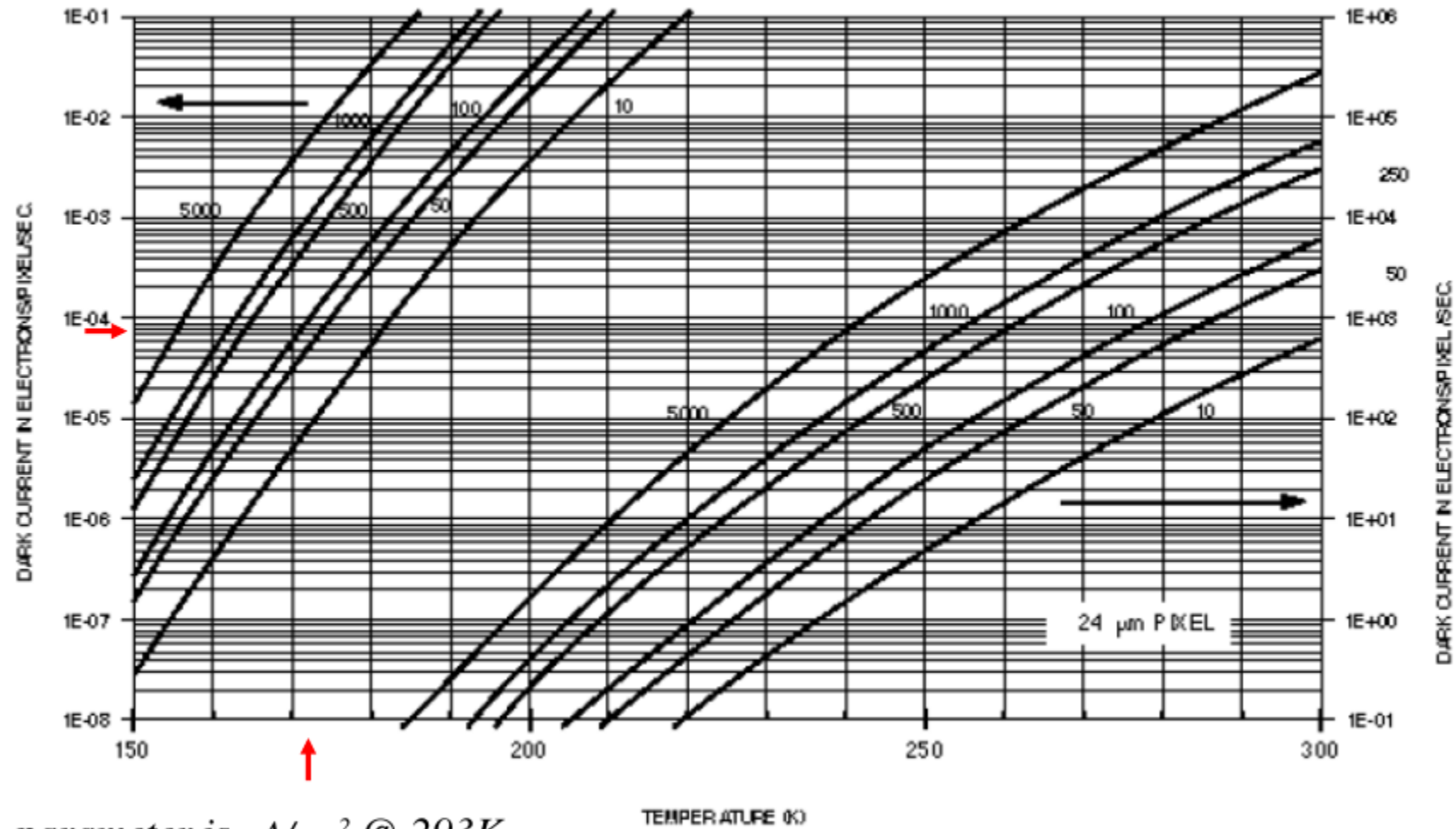
ПЗС устройство состоит из поликремния, отделённого от кремниевой подложки, у которой при подаче напряжения через поликремневые затворы изменяются электрические потенциалы вблизи электродов. Один элемент ПЗС-матрицы формируется тремя или четырьмя электродами. Положительное напряжение на одном из электродов создаёт потенциальную яму, куда устремляются электроны из соседней зоны. Последовательное переключение напряжения на электродах перемещает потенциальную яму, а следовательно, и находящиеся в ней электроны, в определённом направлении. Так происходит перемещение по одной строке матрицы.

Если речь идёт о ПЗС-линейке, то заряд в её единственной строке «перетекает» к выходным каскадам усиления и там преобразуется в уровень напряжения на выходе микросхемы.

У матрицы же, состоящей из многих видеострок, заряд из выходных элементов каждой строки оказывается в ячейке ещё одного сдвигового устройства, устроенного обычно точно таким же образом, но работающего на более высокой частоте сдвига.

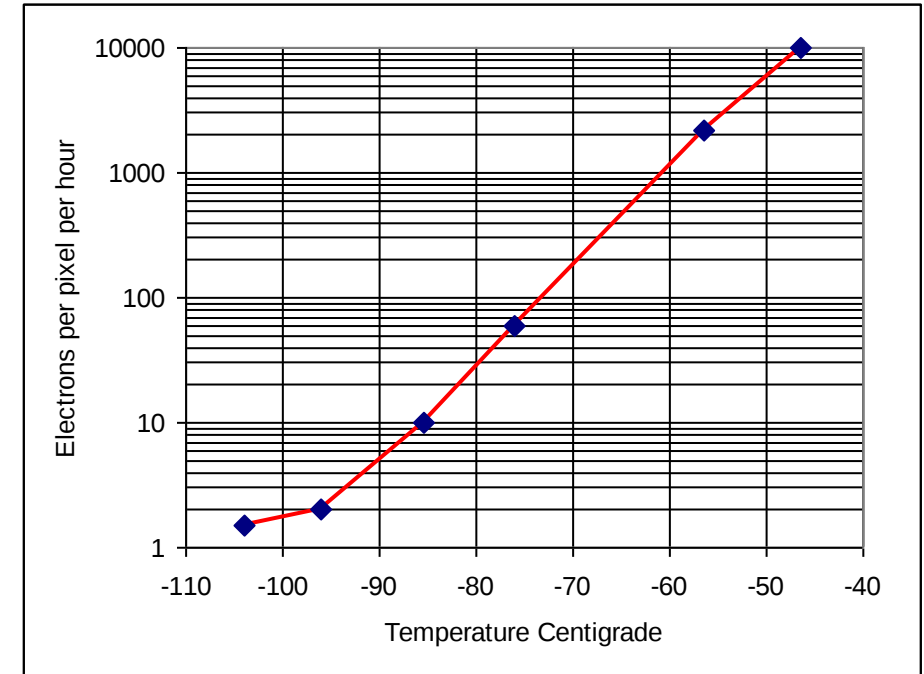
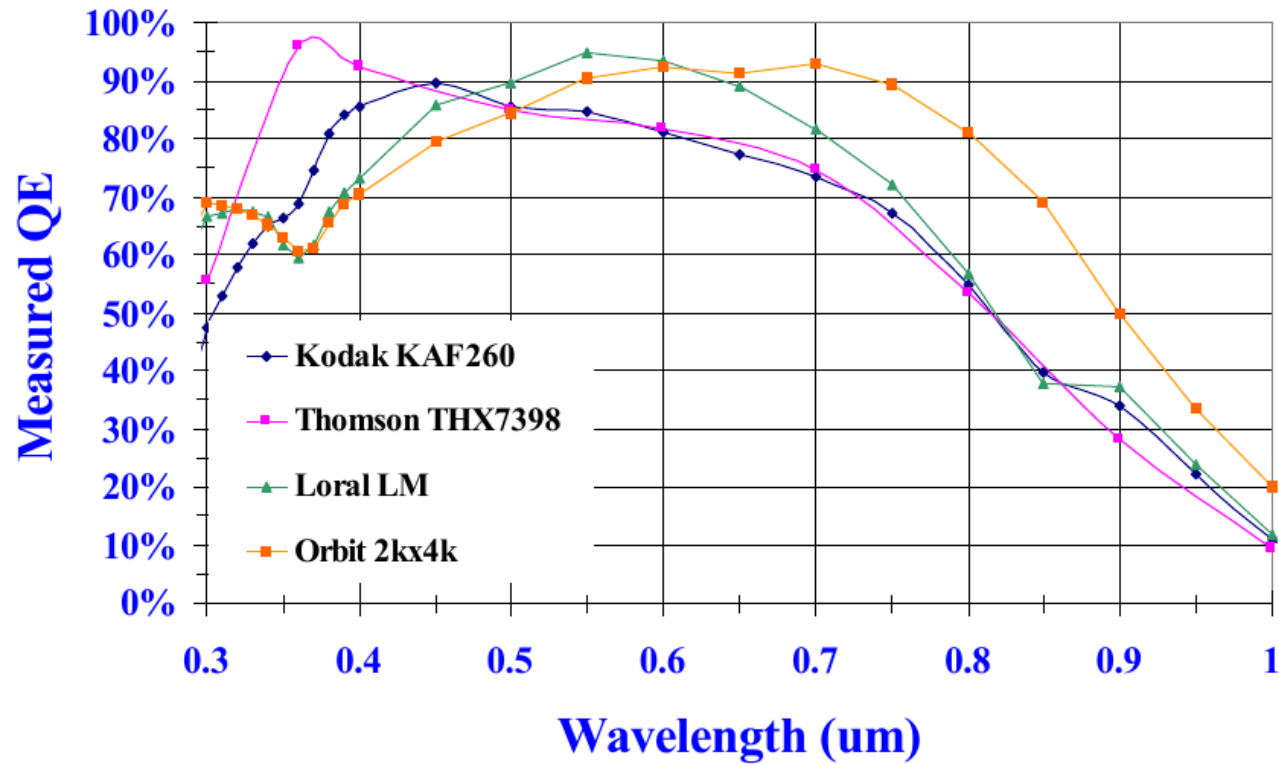


Схемы считывания данных. ПЗС

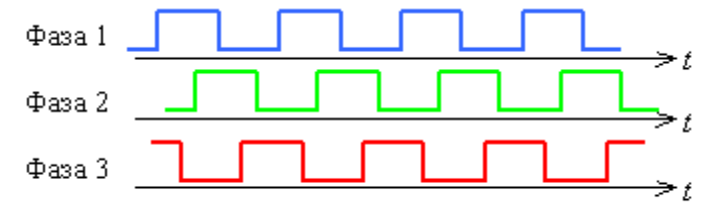
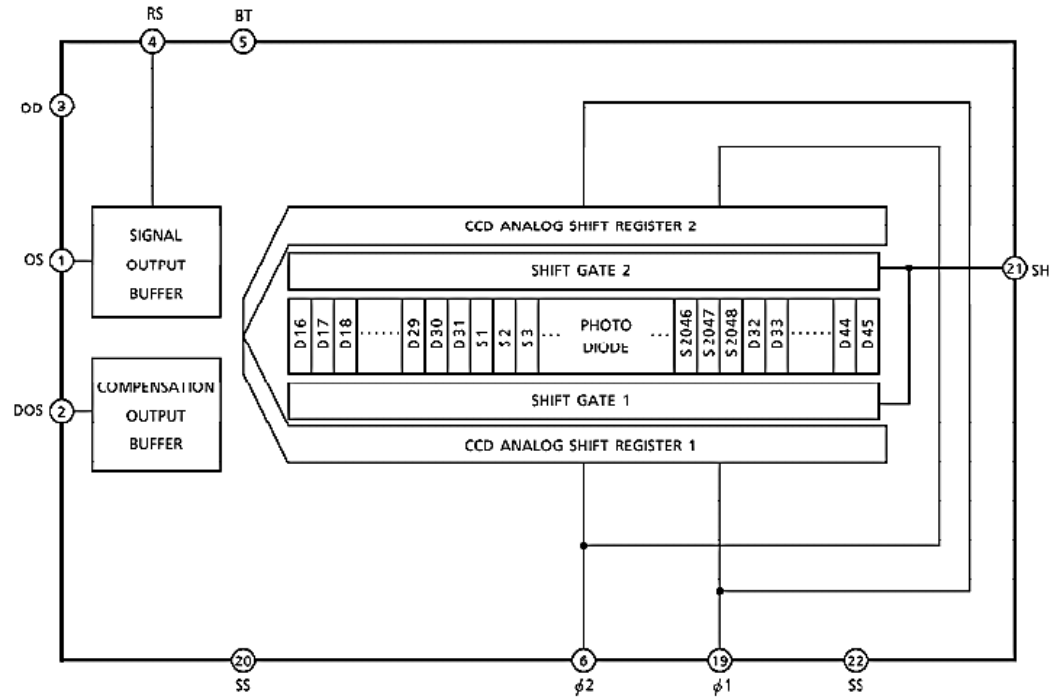


parameter is pA/cm^2 @ 293K

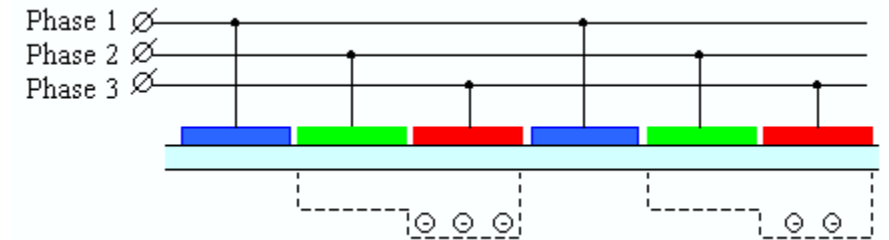
Схемы считывания данных. ПЗС



Схемы считывания данных. ПЗС



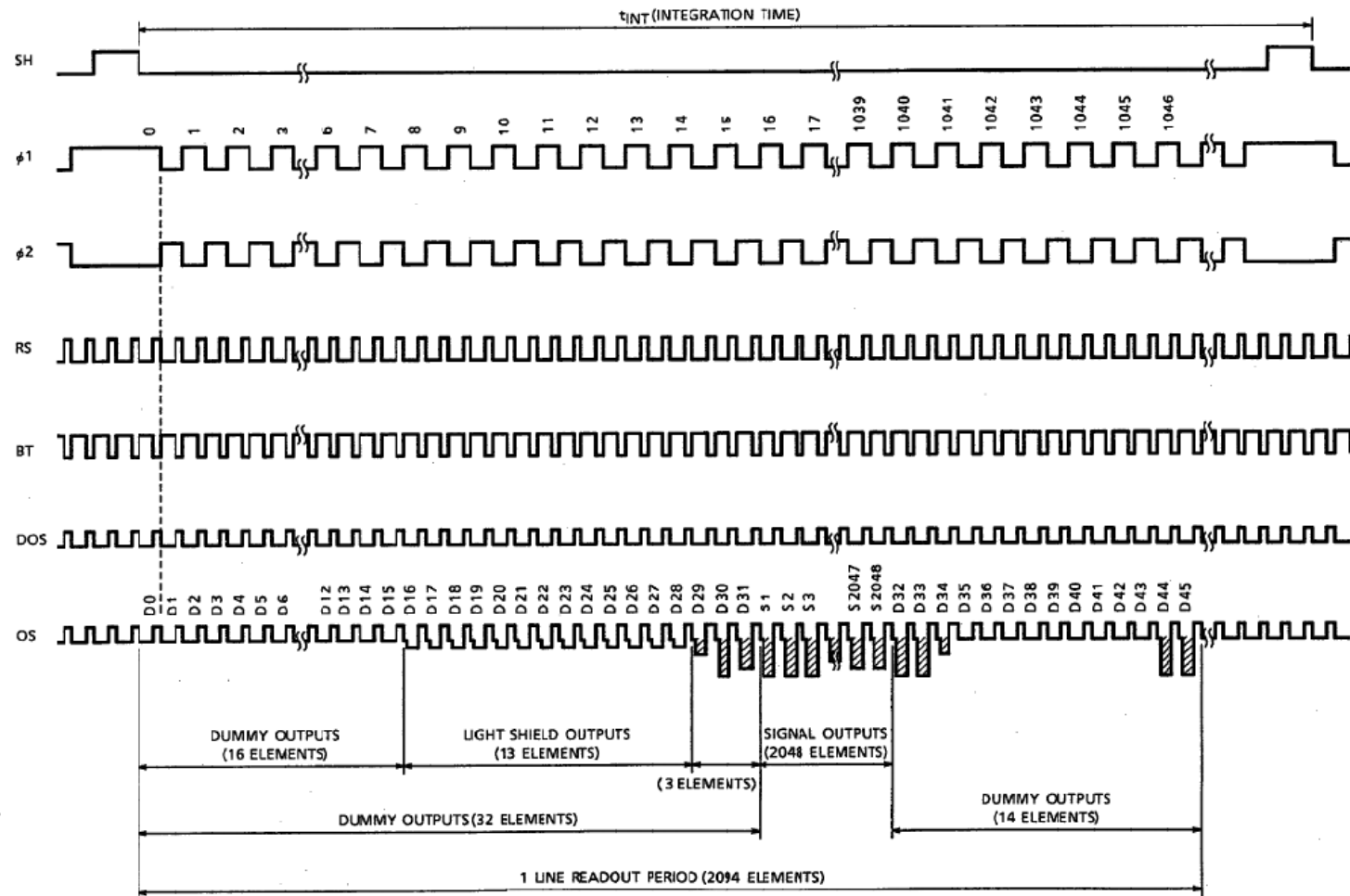
WWW.STARTCOPY.NET



PIN NAMES

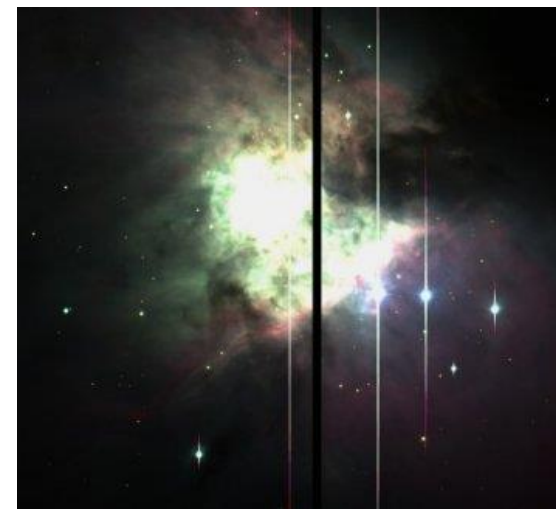
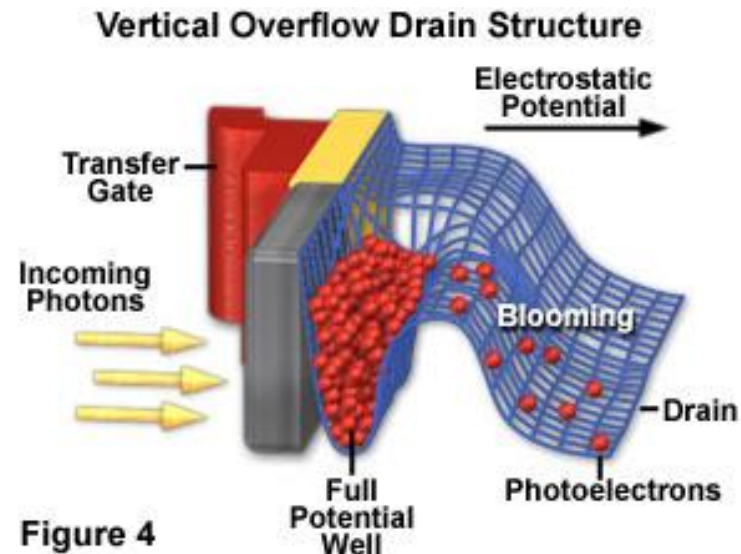
$\phi 1$	Clock (Phase 1)
$\phi 2$	Clock (Phase 2)
BT	Boost Pulse
SH	Shift Gate
RS	Reset Gate
OS	Signal Output
DOS	Compensation Output
OD	Power
SS	Ground
NC	Non Connection

Схемы считывания данных. ПЗС

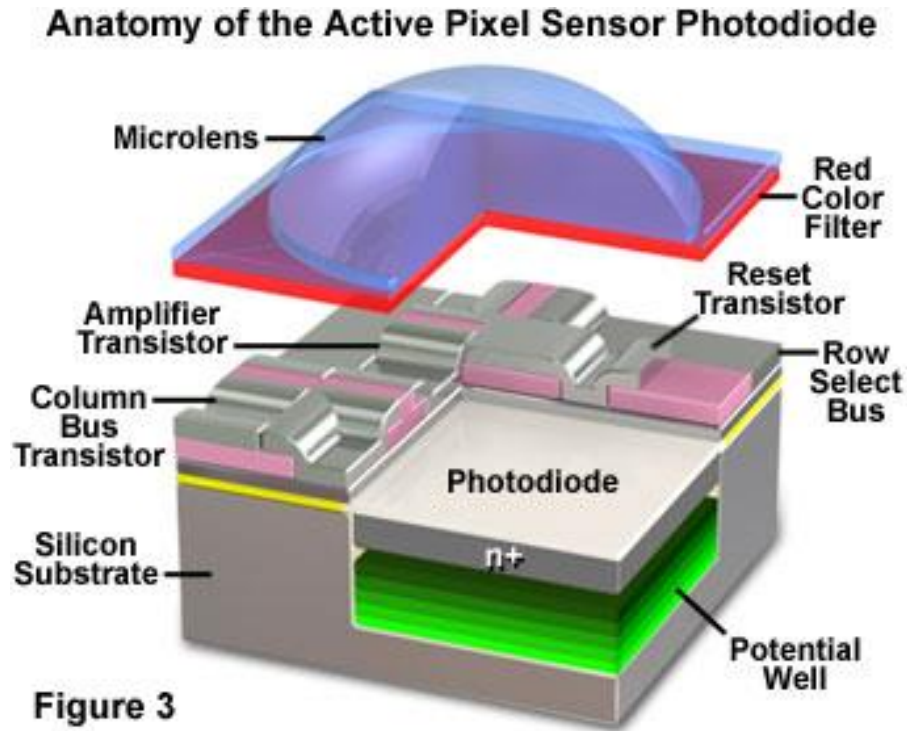


Схемы считывания данных. ПЗС

Блуминг (или блюминг) (от англ. bloom — цветок) в ПЗС — это эффект «растекания» избыточного заряда от пересвеченных областей матрицы ПЗС в соседние ячейки. Основная причина возникновения — ограниченная ёмкость потенциальной ямы для фотоэлектронов в ячейке. Блуминг имеет характерную симметричную форму, определяемую геометрией расположения элементов на матрице. В настоящее время (приблизительно с 2006 года) в любительских устройствах блуминг обычно не проявляется, так как в них используются специальные антиблуминговые цепи, которые отводят избыточные электроны из ячеек. Однако, отвод электронов по мере заполнения потенциальной ямы приводит к нелинейности характеристики ПЗС и затрудняет измерения. Поэтому в научных целях по-прежнему применяются ПЗС без антиблуминговых цепей, и блуминг часто может быть замечен, например, на спутниковых фотографиях и снимках межпланетных зондов.



Схемы считывания данных. КМОП



В КМОП датчиках каждый пиксель имеет свой преобразователь заряда в напряжение, и датчик часто содержит схемы для оцифровки, благодаря чему на выход микросхемы поступает цифровой сигнал. Эти дополнительные функциональные узлы отнимают площадь кристалла, доступную для сбора падающего света. Кроме того, однородность выходов у этих датчиков хуже, так как каждый пиксель имеет свой преобразователь.

Схемы считывания данных. КМОП

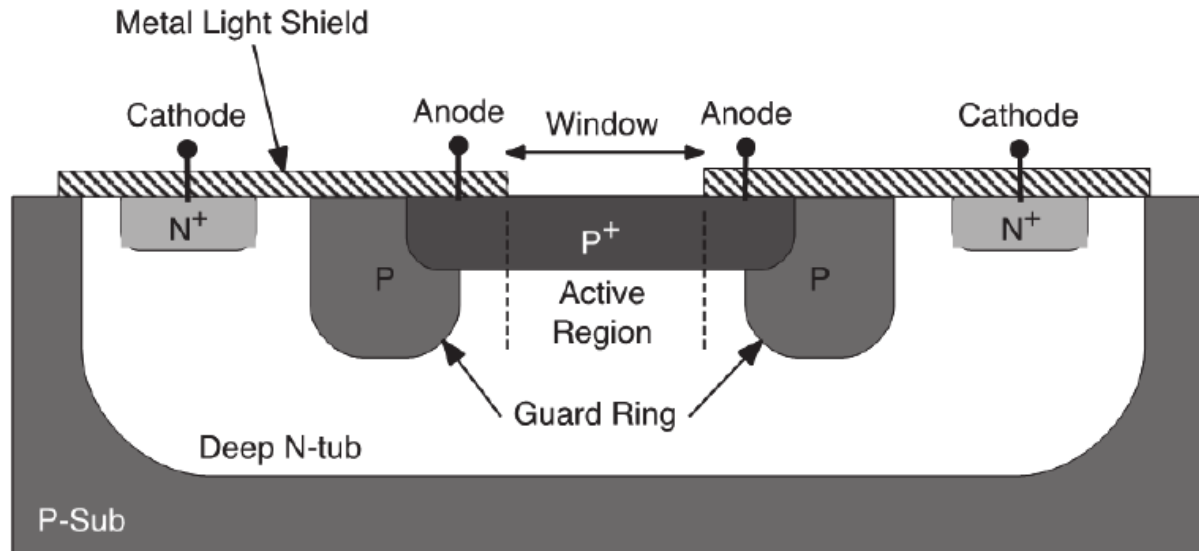
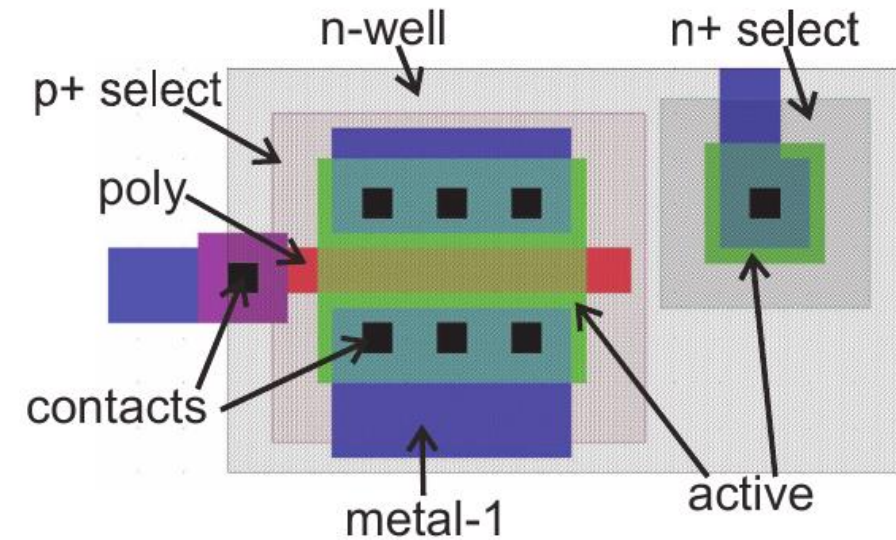
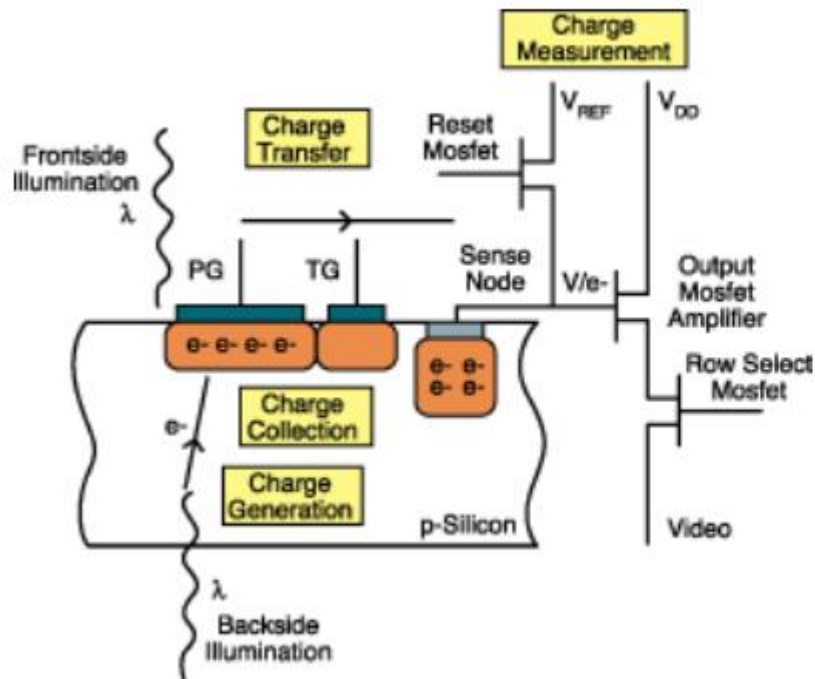


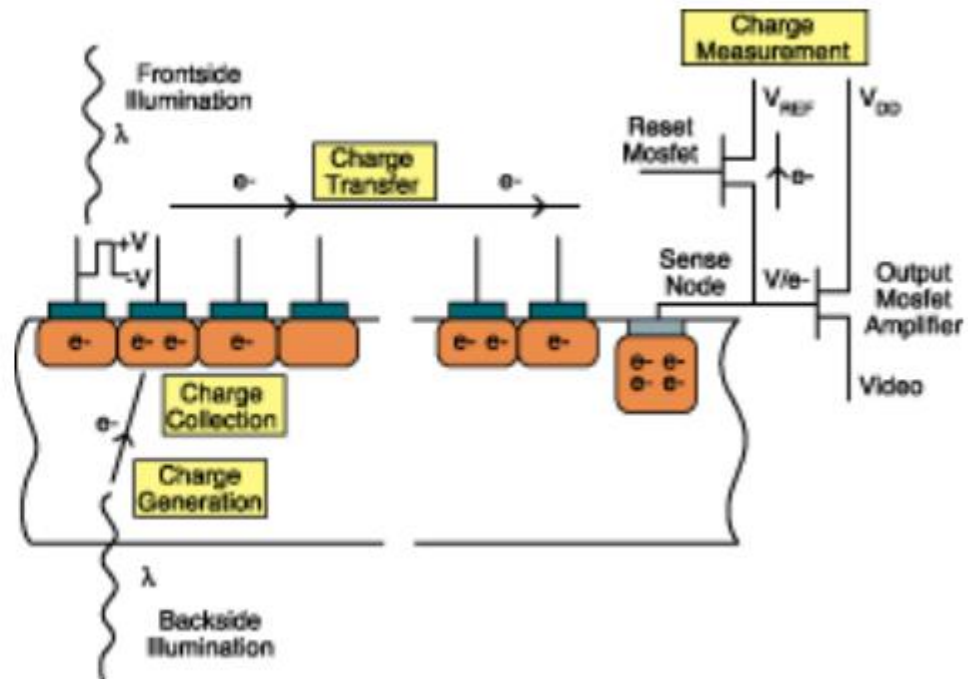
Fig. 7. The cross-section of a SPAD CMOS sensor [51] showing the guard ring surrounding the active region.



Схемы считывания данных. КМОП



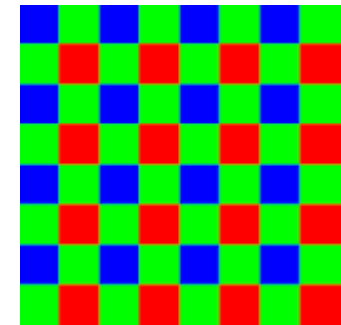
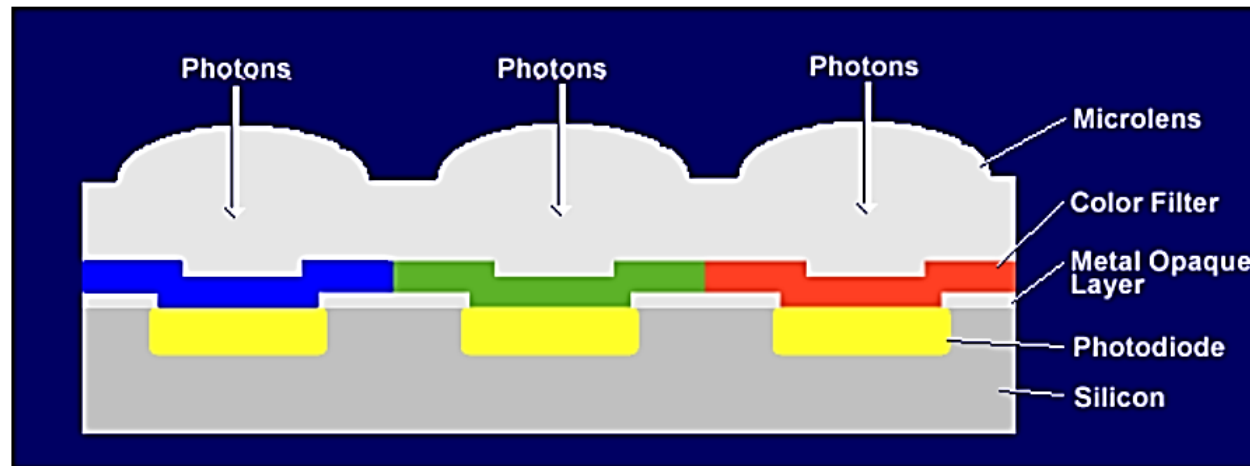
CMOS Imager



CCD Imager

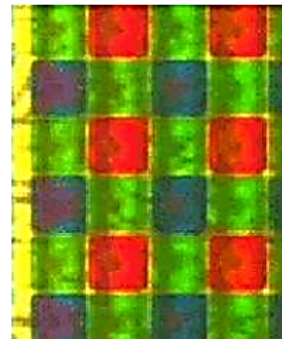
Схемы считывания данных. Цветное изображение. Фильтр Байера

Color Sensing – CMOS and CCD



G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G

Bayer pattern commonly used



- Color filters placed over each pixel and imaging processing is used to determine an 'average color' for each pixel based on local adjacent intensities.
- Low sensitivity and spatial resolution compared to monochrome imagers due to filters

Схемы считывания данных. ПЗС и КМОП

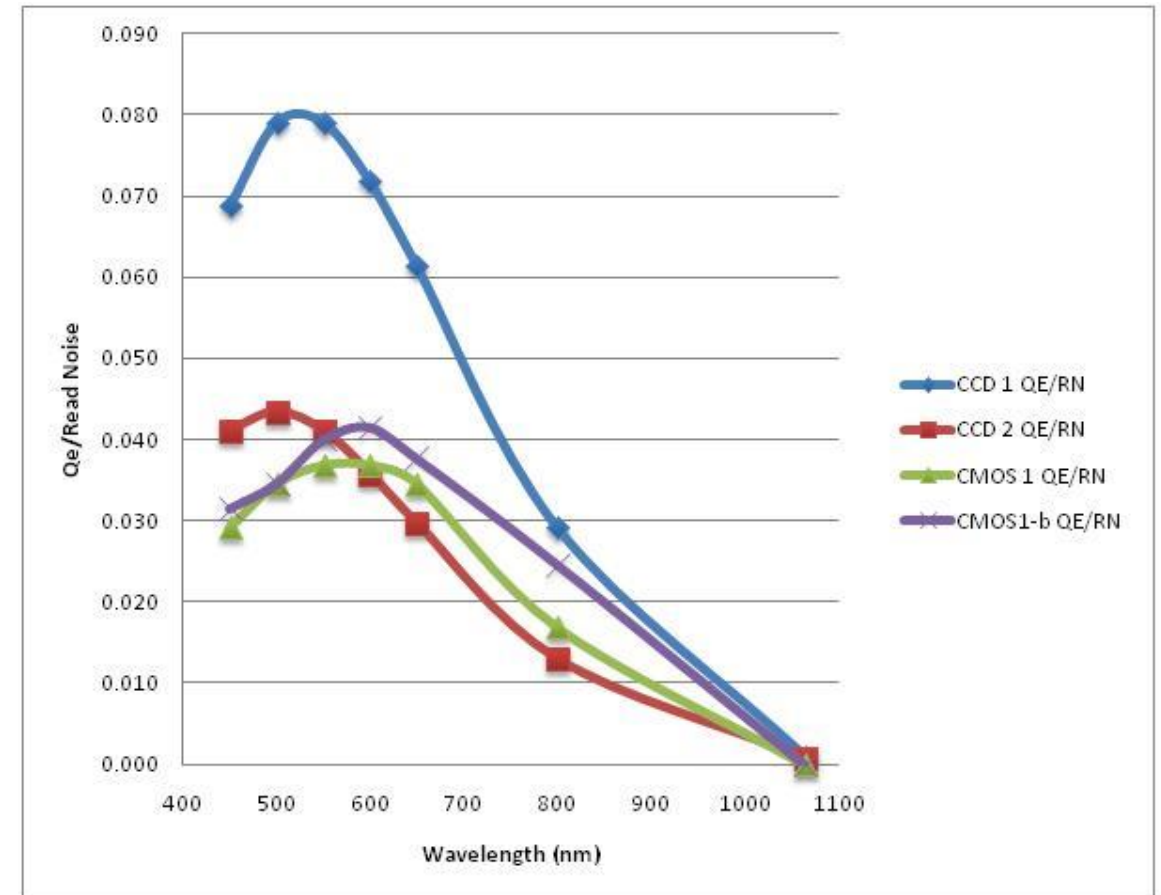
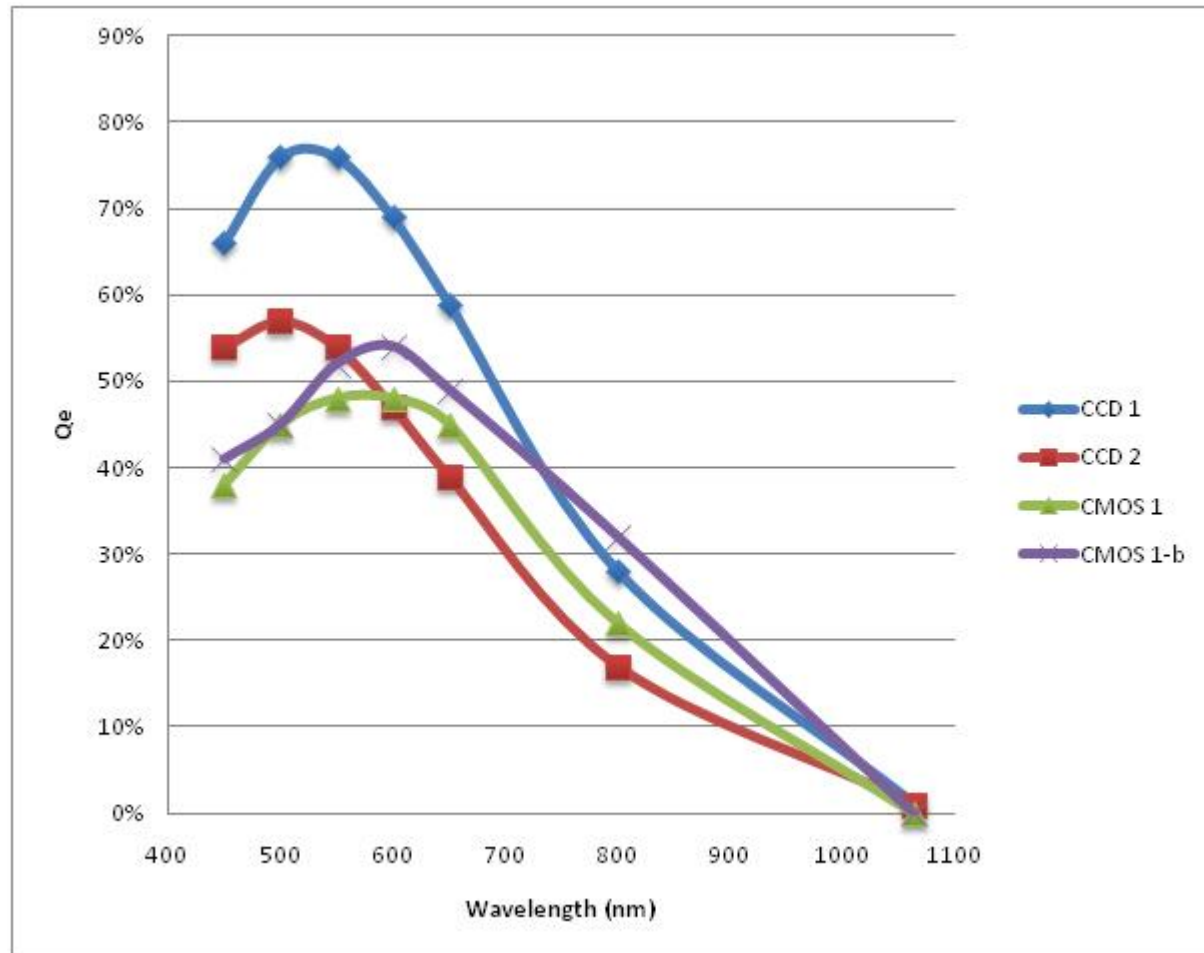
Преимущества и недостатки

Сравнение свойств и параметров

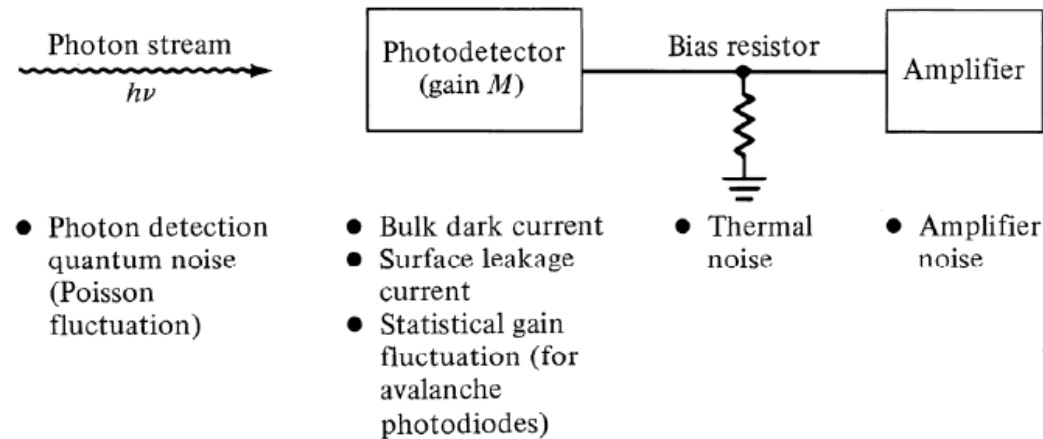
Свойство	ПЗС	КМОП
Выходной сигнал пикселя	Пакет электронов	Напряжение
Выходной сигнал устройства	Напряжение (аналоговый)	Биты (цифровой)
Коэффициент заполнения	Высокий	Умеренный
Несогласованность усилителей	Неприменимо	Умеренная
Системный шум	Низкий	От умеренного до высокого
Сложность системы	Высокая	Низкая
Сложность датчика	Низкая	Высокая
Компоненты камеры	Печатная плата + несколько микросхем + объектив	Микросхема + объектив
Относительная стоимость разработки	Зависит от приложения	Зависит от приложения
Относительная стоимость системы	Зависит от приложения	Зависит от приложения
Параметр	ПЗС	КМОП
Чувствительность	Умеренная	Немного лучше
Динамический диапазон	Высокий	Умеренный
Однородность	Высокая	От низкой до умеренной
Скорость	От умеренной до высокой	Наибольшая
Получение неполного изображения (Windowing)	Ограниченное	Неограниченное
Антиблужинг	От хорошего до отсутствующего	Хороший
Питание и управление	Сложное, высокие напряжения	Простое, низкое напряжение

Схемы считывания данных. ПЗС и КМОП

Преимущества и недостатки



Шумы в фотодиодных фотоприемниках



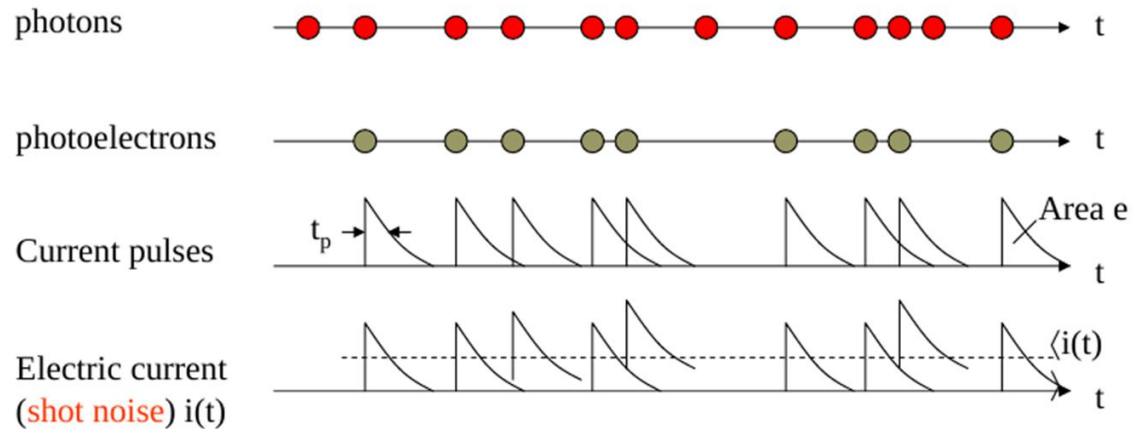
- **Фотонный шум.** Наиболее фундаментальный источник шума связан со случайным приходом отдельных фотонов на приемник, который обычно описывается статистикой Пуассона, как обсуждалось в разд. 12.2.

- **Фотоэлектронный шум.** В детекторе фотонов с квантовым выходом $\eta < 1$ каждый фотон генерирует электронно-дырочную пару с вероятностью η и не генерирует с вероятностью $1 - \eta$. Поскольку этот процесс случайный, он является источником шума.

- **Шум усиления.** Процесс усиления, обеспечивающий внутреннее усиление в некоторых фотодетекторах, таких как фотопроводники и ЛФД, является стохастическим. Каждый детектируемый фотон генерирует случайное число носителей G со средним значением $\bar{G}$. Флуктуации усиления зависят от природы его механизма.

- **Шум приемной схемы.** Различные компоненты электрической схемы оптического приемника, такие как резисторы и транзисторы, вносят вклад в шум приемной схемы.

Шумы в фотодиодных фотоприемниках



- **Фотонный шум.** Наиболее фундаментальный источник шума связан со случайным приходом отдельных фотонов на приемник, который обычно описывается статистикой Пуассона, как обсуждалось в разд. 12.2.
- **Фотоэлектронный шум.** В детекторе фотонов с квантовым выходом $\eta < 1$ каждый фотон генерирует электронно-дырочную пару с вероятностью η и не генерирует с вероятностью $1 - \eta$. Поскольку этот процесс случайный, он является источником шума.
- **Шум усиления.** Процесс усиления, обеспечивающий внутреннее усиление в некоторых фотодетекторах, таких как фотопроводники и ЛФД, является стохастическим. Каждый детектируемый фотон генерирует случайное число носителей G со средним значением $\bar{G}$. Флуктуации усиления зависят от природы его механизма.
- **Шум приемной схемы.** Различные компоненты электрической схемы оптического приемника, такие как резисторы и транзисторы, вносят вклад в шум приемной схемы.

Шумы в фотодиодных фотоприемниках

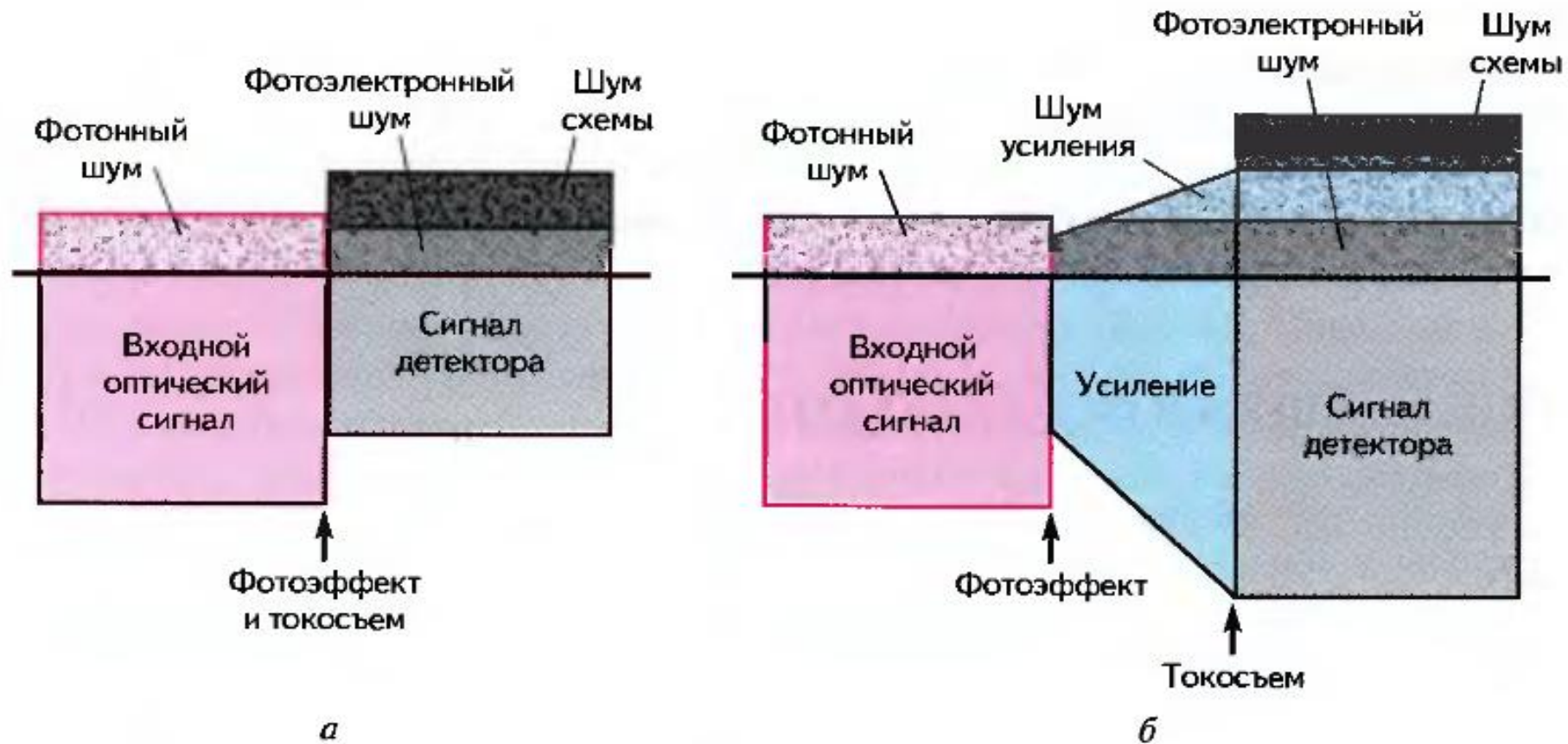


Рис. 18.28. Входной сигнал и сигнал детектора вместе с различными источниками шума для фотодетектора без усиления, такого как $p-i-n$ -фотодиод (а), и фотодетектора с усилением, такого как лавинный фотодиод (б)

Шумы в фотодиодных фотоприемниках

- **Отношение сигнал—шум (ОСШ)** случайной величины определяется как отношение квадрата среднего значения к дисперсии. Таким образом, ОСШ для тока равно $\bar{i}^2/\sigma_i^2$, а для числа фотонов $\bar{n}^2/\sigma_n^2$.
- **Минимальный обнаружимый сигнал** определяется как средний сигнал, при котором ОСШ равно единице.
- **Коэффициент избыточного шума F** случайной величины определяется как отношение среднего квадрата к квадрату среднего. Так, коэффициент избыточного шума для усиления G фотодетектора равен $F = \langle G^2 \rangle / \langle G \rangle^2$.
- **Частота появления ошибочных битов** определяется как вероятность ошибки на каждый бит у цифрового оптического приемника.
- **Обнаружительная способность приемника** определяется как сигнал, соответствующий заданной величине отношения сигнал—шум, $\text{ОСШ} = \text{ОСШ}_0$.

Шумы в фотодиодных фотоприемниках

Средний поток фотонов равен $P/h\nu$, где P - фиксированная мощность. Эта величина флуктуирует случайным образом в соответствии с вероятностным законом, зависящим от источника света.

Для тепловых источников света и лазеров число фотонов подчиняется распределению Пуассона. Флуктуации, связанные со средним числом фотонов 100, составляют порядка 10 фотонов.

$$\sigma_n^2 = \bar{n} \quad \boxed{\text{ОСШ} = \bar{n},}$$

Фотоэлектронный шум

Фотон, падающий на фотодетектор с квантовым выходом η , генерирует фотособытие (т. е. создаст электронно-дырочную пару или высвобождает электрон) с вероятностью η и не генерирует с вероятностью $1 - \eta$. Предполагается, что фотособытия выбираются случайным образом из потока фотонов. Средний падающий поток фотонов Φ (число фотонов в секунду) порождает средний поток фотоэлектронов $\eta\Phi$ (число фотоэлектронов в секунду). Число фотоэлектронов m , зарегистрированных за время T , является случайной величиной со средним значением

$$\bar{m} = \eta\bar{n}, \quad (18.32)$$

где $\bar{n} = \Phi T$ — среднее число падающих фотонов за один и тот же интервал времени T . Если число фотонов имеет распределение Пуассона, то таким же будет распределение числа фотоэлектронов. Это можно подтвердить рассуждением, параллельным проведенному в подразд. 12.2.4. Следовательно, дисперсия числа фотоэлектронов равна $\bar{m}$, так что

$$\sigma_m^2 = \bar{m} = \eta\bar{n}. \quad (18.33)$$

Ясно, что фотоэлектронный шум не аддитивен по отношению к фотонному шуму.

Таким образом, изначальным фундаментальным источником шума, с которым необходимо бороться при использовании света для передачи сигнала, является случайность числа фотонов, благодаря которой отношение сигнал—шум для числа фотоэлектронов составляет

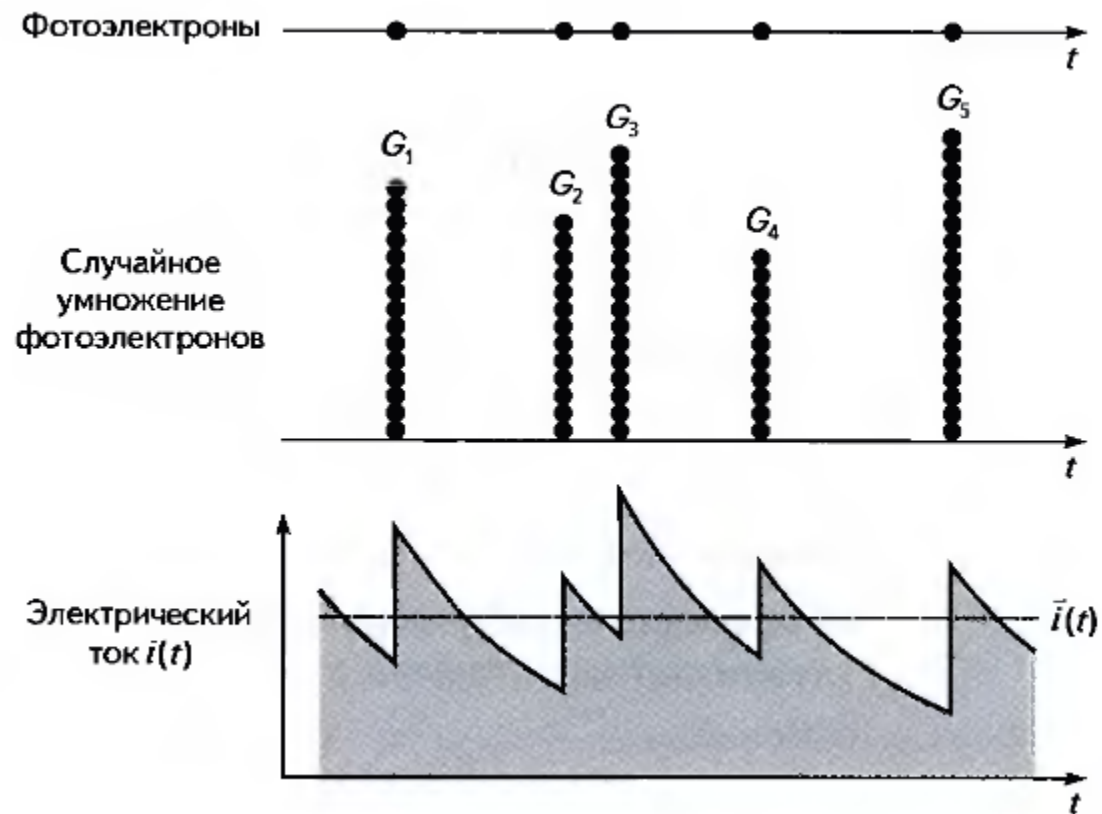
$$\boxed{\text{ОСШ} = \bar{m} = \eta\bar{n}.} \quad (18.34)$$

Шум усиления

Шум усиления, вносимый обычным ЛФД, берет начало от двух источников:

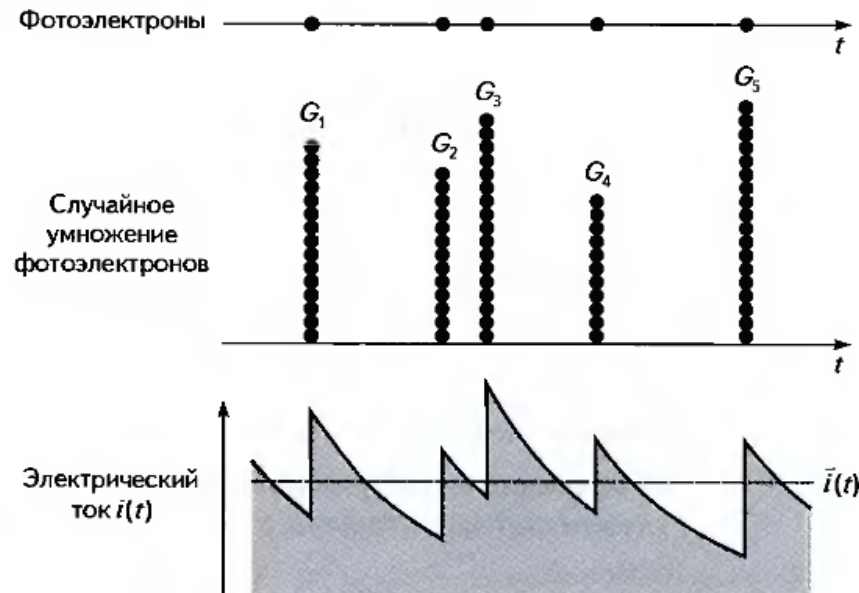
- 1) случайность расположения точек, в которых происходят акты ионизации;
- 2) процесс обратной связи, связанный с тем фактом, что оба типа носителей могут производить ударную ионизацию.

Рис. 18.30. В фотодетекторе с усилением каждое фотособытие генерирует случайное число G_i носителей, что порождает импульс электрического тока площадью eG_i . Полный электрический ток в цепи детектора $i(t)$ — суперпозиция этих импульсов



Шум усиления

Рис. 18.30. В фотодетекторе с усилением каждое фотособытие генерирует случайное число G_i носителей, что порождает импульс электрического тока площадью eG_i . Полный электрический ток в цепи детектора $i(t)$ — суперпозиция этих импульсов



Если случайная переменная G_i имеет среднее значение $\langle G \rangle = \bar{G}$ и средний квадрат $\langle G^2 \rangle$, то анализ, аналогичный проведенному в (18.40)—(18.47), дает

$$\bar{i} = e\bar{G}\eta\Phi; \quad (18.52)$$

Среднее значение фототока
(случайное усиление)

$$\sigma_i^2 = 2e\bar{G}\bar{i}BF, \quad (18.53)$$

Дисперсия фототока
(случайное усиление)

Шумы схемы. Тепловой шум или шум Джонсона

Тепловой шум, называемый также шумом Джонсона или шумом Найквиста, происходит от теплового движения подвижных носителей заряда в резистивных электрических материалах при конечной температуре; это движение порождает случайный электрический ток $i(t)$ даже в отсутствие внешнего источника электрической энергии. Тепловой электрический ток в сопротивлении R есть случайная функция $i(t)$ со средним значением $\langle i(t) \rangle = 0$. Дисперсия тока σ_i^2 совпадает с его среднеквадратичным значением, поскольку среднее исчезает, и растет с увеличением температуры T .

$$\boxed{\sigma_i^2 \approx \frac{4k_B T B}{R}} \quad (18.60)$$

Дисперсия тока теплового шума
(сопротивление R)

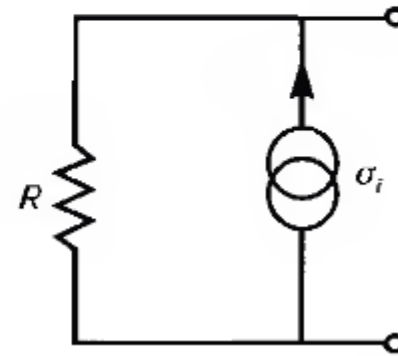
Шумы схемы. Тепловой шум или шум Джонсона

$$\sigma_i^2 \approx \frac{4k_B T B}{R}. \quad (18.60)$$

Дисперсия тока теплового шума
(сопротивление R)

Таким образом, как показано на рис. 18.33, сопротивление R при температуре T в схеме с шириной полосы B ведет себя как бесшумное сопротивление, параллельно которому подсоединен источник шумового тока с нулевым средним значением и среднеквадратичным значением σ_i , определяемым по формуле (18.60).

Рис. 18.33. Сопротивление R при температуре T эквивалентно бесшумному сопротивлению, параллельно которому подсоединен источник шумового тока с дисперсией $\sigma_i^2 = \langle i^2 \rangle \approx 4k_B T B / R$, где B — ширина полосы схемы



Зависимость ОСШ от потока фотонов

Зависимость ОСШ от $\bar{m} = \eta\Phi/2B$ отражает изменения ОСШ от потока фотонов Φ . Рассмотрим вначале случай фотодиода без усиления, когда применимо выражение (18.67).

Рис. 18.36. Отношение сигнал—шум (ОСШ) как функция среднего числа фотоэлектронов за время разрешения приемника, $\bar{m} = \eta\Phi/2B$, для фотодиода при двух значениях параметра шума схемы σ_q

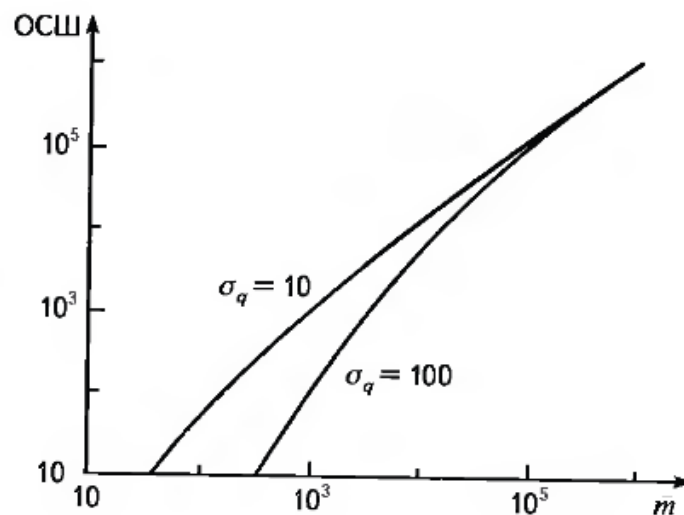
Представляют интерес два предельных случая:

1. *Предел шума схемы.* Если Φ достаточно мало, так что $\bar{m} \ll \sigma_q^2$ ($\Phi \ll 2B\sigma_q^2/\eta$), то фотонным шумом можно пренебречь, а шум схемы преобладает, что дает

$$\text{ОСШ} \approx \frac{\bar{m}^2}{\sigma_q^2}. \quad (18.68)$$

2. *Предел фотонного шума.* Если поток фотонов Φ достаточно велик, так что $\bar{m} \gg \sigma_q^2$ ($\Phi \gg 2B\sigma_q^2/\eta$), то можно пренебречь шумом схемы, откуда

$$\text{ОСШ} \approx \bar{m}. \quad (18.69)$$



Зависимость ОСШ от потока фотонов

Следовательно, для малых $\bar{m}$ ОСШ пропорционально $\bar{m}^2$ и, следовательно, Φ^2 , тогда как для больших $\bar{m}$ ОСШ пропорционально $\bar{m}$ и Φ , как показано на рис. 18.36. Для всех интенсивностей света ОСШ растет с увеличением потока падающих фотонов, т. е. чем больше света, тем лучше работает приемник.

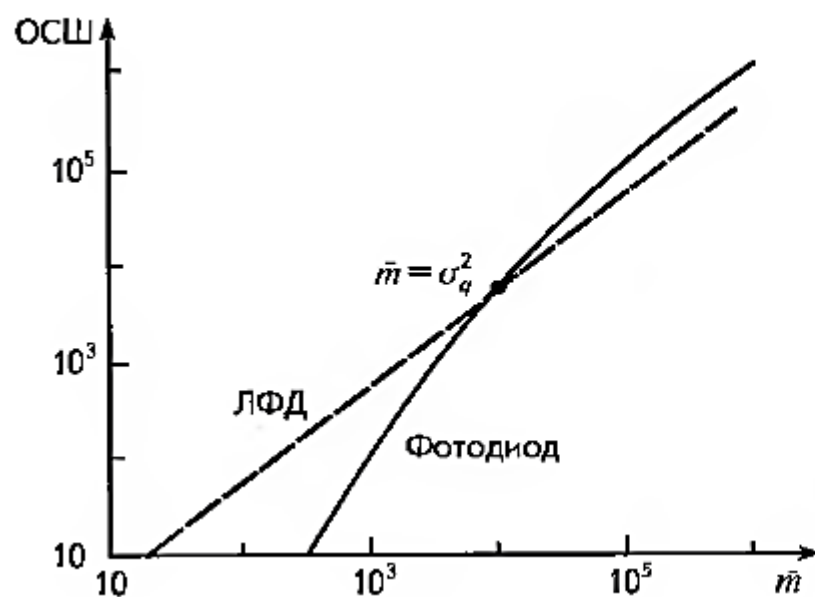


Рис. 18.37. Зависимость ОСШ от $\bar{m} = \eta\Phi/2B$ для приемника на фотодиоде (сплошная линия) и на ЛФД со средним усилением $\bar{G} = 100$ и коэффициентом избыточного шума $F = 2$ (штриховая линия), полученная из (18.66). Параметр шума схемы $\sigma_q = 100$ в обоих случаях. Для малых фотонных потоков (случай ограничения шумами схемы) ЛФД обеспечивает более высокое ОСШ, чем фотодиод. Для больших фотонных потоков (случай ограничения фотонным шумом) приемник на фотодиоде лучше, чем на ЛФД. Переход между двумя областями происходит при $\bar{m} \approx \sigma_q^2/(F - 1) = 10^4$

Задачи на дом

- 1) Рассчитайте длинноволновый предел чувствительности ФЭУ с фотокатодом, имеющим работу выхода равную 1,5 эВ; 1 эВ; 0,8 эВ?
- 2) Рассчитайте длинноволновый предел чувствительности ФЭУ с полупроводниковым фотокатодом, если ширина запрещенной зоны полупроводника равна 0,5; 0,8; 1 эВ, а сродство к электрону имеет отрицательную величину.
- 3) Рассчитайте время пролета электрона между двумя динодами в трубке ФЭУ, если зазор между динодами равен 12 мм, а потенциал между ними 150 В. Для простоты считать, что поле между динодами однородно.
- 4) Определите какое напряжение необходимо приложить к ФЭУ с шестью каскадами умножения, для динодов из GaP и SbO, чтобы достичь коэффициента усиления 10^6
- 5) Коэффициент усиления одного динода δ в ФЭУ с 10-ю каскадами зависит от напряжения V между динодами по закону $V^{0,6}$. К ФЭУ приложено напряжение 1 кВ, какая флуктуация напряжения допустима, если необходимо, чтобы флуктуация коэффициента усиления не превышала 1 %?

Задачи на дом

6) Токовая чувствительность фотодиода равна 0,5 А/Вт на длине волны 850 нм, определите квантовую эффективность детектора

7) Лавинный фотодиод имеет квантовую эффективность 50% в нормальном режиме (без лавинного умножения). Рассчитайте токовую чувствительность фотодиода, если приложенное к нему обратное напряжение обеспечивает коэффициент усиления 8.

На следующем занятии Контрольная работа!