

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПИКСЕЛЬНЫХ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

ВВЕДЕНИЕ

Лавинные полупроводниковые приборы появились почти одновременно с первыми диодами и транзисторами. Сам по себе лавинный процесс - довольно типичное явление для всех полупроводниковых приборов. Именно лавинный пробой является частой причиной выхода из строя транзисторов и диодов и пр. полупроводниковых устройств. С самого начала предпринимались многочисленные попытки не только защититься от лавинных процессов в полупроводнике, но и использовать лавинное умножение в детекторах для регистрации очень слабых сигналов от внешних воздействий. Эта задача оказалась очень сложной, и разработанные приборы были дорогими и недолговечными. Однако, в связи с новыми технологическими достижениями, в последнее время лавинные детекторы начали использоваться в ядерной физике и физике элементарных частиц. Благодаря ряду особых качеств, лавинные детекторы конкурируют с обычными детекторами во многих новых физических экспериментах (D0 во FNAL, CMS в CERN), а также получают применение в медицинских рентгеновских томографах и позитронных эмиссионных томографах. Использование кремниевых приборов с лавинным усилением наиболее эффективно для регистрации слабых потоков света, именно в этой области особенно четко выявляются преимущества лавинных детекторов :

1. За счет внутреннего усиления лавинные детекторы обладают высоким отношением сигнала к шуму 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. В последнее время разрабатываются лавинные фотодиоды со структурой микроячеек (пикселей), каждая из которых представляет счетчик единичных фотонов. Такие микропиксельные лавинные фотодиоды - MAPD (Micropixels Avalanche PhotoDiode), способные регистрировать малые интенсивности света (на уровне нескольких десятков и даже единичных фотонов), при этом обладая высоким коэффициентом внутреннего усиления $M \approx 10^6$ подобно некоторым ФЭУ.

2. Имеют высокую квантовую эффективность регистрации света. Если у лучших образцов ФЭУ Q.E. порядка 25% (обычно - 10-15%), то у APD (Avalanche PhotoDiode) эффективность, как правило, более 50%, и достигает

90%. У MAPD эффективность регистрации фотона может составлять порядка 30%.

3. Вследствие малой глубины зоны обеднения, обладают высоким временным разрешением (лучше 1 наносекунды).

Как APD, так и MAPD сохраняют все полезные свойства обычных кремниевых детекторов: возможность работы в магнитных полях и в вакууме, имеют высокую радиационную стойкость, компактны, не требуют высокого напряжения питания. Однако работа детектора в лавинном режиме предъявляет особые требования к стабильности рабочей точки, так как коэффициент лавинного умножения имеет сильную зависимость от напряжения и от температуры. Например, для APD EG&G C30626E (этот детектор применяется в электромагнитном калориметре детектора CMS в CERN'е при $M=100$ коэффициент усиления уменьшается на 6.7% при увеличении температуры на 1°C . Таким образом, при увеличении температуры на 15°C коэффициент усиления M изменяется от 100 до 1. Для APD Hamamatsu S5345 с $M=100$ температурный коэффициент составляет $-3.3\%/^{\circ}\text{C}$.

Эти требования ограничивают применение лавинных детекторов, но в последнее время целый ряд технологических решений существенно уменьшил данные проблемы.

Целью предлагаемой работы является исследование основных характеристик кремниевых микропиксельных лавинных фотодиодов и методов их измерений, а также обретение навыков работы с лавинными приборами.

СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА.

Лавинное размножение носителей заряда в полупроводнике связано с тем, что когда к p-n переходу приложено напряжение, то в кристалле возникает градиент электрического поля. Напряженность этого электрического поля зависит от приложенного напряжения и проводимости полупроводника. Свободные заряды в полупроводнике, а фактически это всегда электроны, двигаясь в кристалле, претерпевают столкновения с атомами решетки. Если при этом они попадают в область, где существует электрическое поле, то электрон между столкновениями успевает получить некоторую энергию, и если эта энергия превысит 3.6 эВ, то он выбьет при столкновении из атома решетки другой электрон, т.е. образует электрон-дырочную пару. Затем оба электрона, двигаясь дальше, могут создать еще по одной электрон-дырочной паре и т.д. Происходит так называемое лавинное умножение зарядов.

На рис.1 схематически изображен процесс умножения зарядов. Электрон, двигаясь в электрическом поле, попадает в лавинную область и порождает первичную лавину (I). Там же отмечено отдельно, что дырки, которые возникают в этом процессе, двигаются в противоположном направлении, а если поле достаточно велико, то дырки тоже могут начать размножаться, что порождает вторичные электронные лавины(II). Именно такое циклическое самоподдерживание лавины и прожигает полупроводниковый прибор при

лавинном пробое. При движении дырок в реальности движется электрон, перескакивая с орбиты одного атома на орбиту другого, проходя при этом гораздо меньшее расстояние, чем свободно двигающийся электрон. Поэтому для размножения дырок необходима напряженность электрического поля значительно большая, чем для размножения электронов. Это различие процессов умножения электронов и дырок используется в большинстве промышленных лавинных приборов. Специальными технологическими средствами в полупроводнике создается зона, где электрическое поле имеет равномерное распределение. На самом р-n переходе при подаче соответствующего напряжения возможно достижение стабильного умножения электронов притом, что лавинного умножения дырок не происходит. Как правило, максимальное усиление, которое возможно достичь в такой структуре, колеблется от десяти до ста*.



* Однако, как отмечалось выше у современных фотодиодов созданных по принципу MAPD, о котором речь пойдет ниже, усиление достигает 10^6 и более.

МИКРОПИКСЕЛЬНЫЕ ЛАВИННЫЕ ФОТОДИОДЫ РАБОТАЮЩИЕ В «ГЕЙГЕРОВСКОЙ» МОДЕ.

Появление лавинных фотодиодов с отрицательной обратной связью, которая гасит лавинный процесс, позволило создать лавинный фотодиод, работающий в так называемой «гейгеровской» моде (APDg). Такой APDg обладает высоким коэффициентом усиления ($10^5 \div 10^7$). Однако при этом мертвое время прибора становится большим (порядка микросекунд).

Как и газоразрядный счетчик Гейгера-Мюллера, который способен регистрировать только факт прохождения ионизирующей частицы, так и APDg способен регистрировать лишь факт рождения фотоэлектронов под действием внешнего света, но не их количество. Поэтому данный фотоприемник не может быть использован в качестве детектора регистрирующего интенсивность падающего излучения.

С целью решения проблемы с регистрацией интенсивности излучения разработан новый тип фотодетектора — кремниевый микропиксельный лавинный фотодиод (MAPD).

MAPD – это не повсеместно признанная аббревиатура данного типа фотодиодов, однако, как нам кажется, наиболее точно подчеркивающая конструктивную основу и типологическую принадлежность данного вида детектора. Но, несмотря на это, приведем другие названия данного вида фотоприемников:

- SiPM (Silicon PhotoMultiplier)
- MPGM APD (Multipixel Geiger-mode Avalanche PhotoDiode)
- SSPM (Solid State PhotoMultiplier)
- G-APD (Geiger-mode Avalanche PhotoDiode)
- GMPD (Geiger-Mode PhotoDiode)
- DPPD (Digital Pixel PhotoDiode)
- MCPC (MicroCell Photon Counter)
- MAD (Multicell Avalanche Diode)

Данный вид детекторов представляет собой фотоприемник на основе упорядоченного набора (матрицы) пикселей (примерно 10^3 мм^{-2}), выполненных на общей подложке. Каждый пиксель представляет из себя APDg работающий в «гейгеровском» режиме с коэффициентом умножения порядка 10^6 , но весь MAPD представляет собой аналоговый детектор, так как выходной сигнал MAPD есть сумма сигналов со всех пикселей, сработавших при поглощении ими фотонов.

Отметим, что когда интенсивность падающего излучения велика, т. е. вероятность рождения нескольких фотоэлектронов в одном пикселе

значительна при этом, как правило, происходит срабатывание всех ячеек, наступает насыщение выходного сигнала с MAPD. Таким образом, существует ограничение сверху на спектрометрическую регистрацию интенсивности света.

MAPD представляет из себя прибор нового типа для детектирования вспышек света слабой интенсивности (на уровне одиночных фотонов) и длительностью порядка единиц - сотен наносекунд. Аналогично вакуумным ФЭУ, MAPD может стать прибором широкого применения благодаря следующим качествам:

- высокое внутреннее усиление порядка 10^6 , что значительно снижает требования к электронике;
- малый разброс коэффициента усиления (около 10%) и, как следствие, низкий шум-фактор;
- невысокая чувствительность коэффициента усиления к изменению температуры и напряжения питания;
- эффективность регистрации видимого света на уровне вакуумных ФЭУ;
- возможность регистрации наносекундных вспышек света без искажения формы детектируемого импульса;
- возможность работы, как в режиме счета импульсов, так и в спектрометрическом режиме;
- хорошее временное разрешение (десятки пикосекунд);
- невысокое напряжение питания (25—60 В);
- нечувствительность к магнитному полю;
- компактность (размеры кристалла порядка $(2 \times 2 \times 0,3) \text{ мм}^3$).

На рис. 2 схематично показан принцип устройства MAPD, который состоит из независимых пикселей с размерами порядка $30 \times 30 \text{ мкм}$. Посредством алюминиевых шин все пиксели объединены, и к ним приложено одинаковое напряжение смещения (U_{bias}), превышающее пробойное ($U_{\text{breakdown}}$) на 10 – 15% , что обеспечивает работу в «гейгеровском» режиме. При попадании кванта света в активную область пикселя в нем развивается самогасящийся «гейгеровский» разряд. Гашение, т. е. прекращение разряда, происходит из-за падения напряжения на p-n-переходе ниже пробойного благодаря наличию в каждом пикселе токоограничивающего резистора ($R_{\text{огр}} \approx 1 \text{ МОм}$).

Токовые сигналы от сработавших пикселей суммируются на общей нагрузке. Усиление каждого пикселя составляет величину порядка 10^6 , поэтому детектор допускает работу на кабель без предварительного усиления.

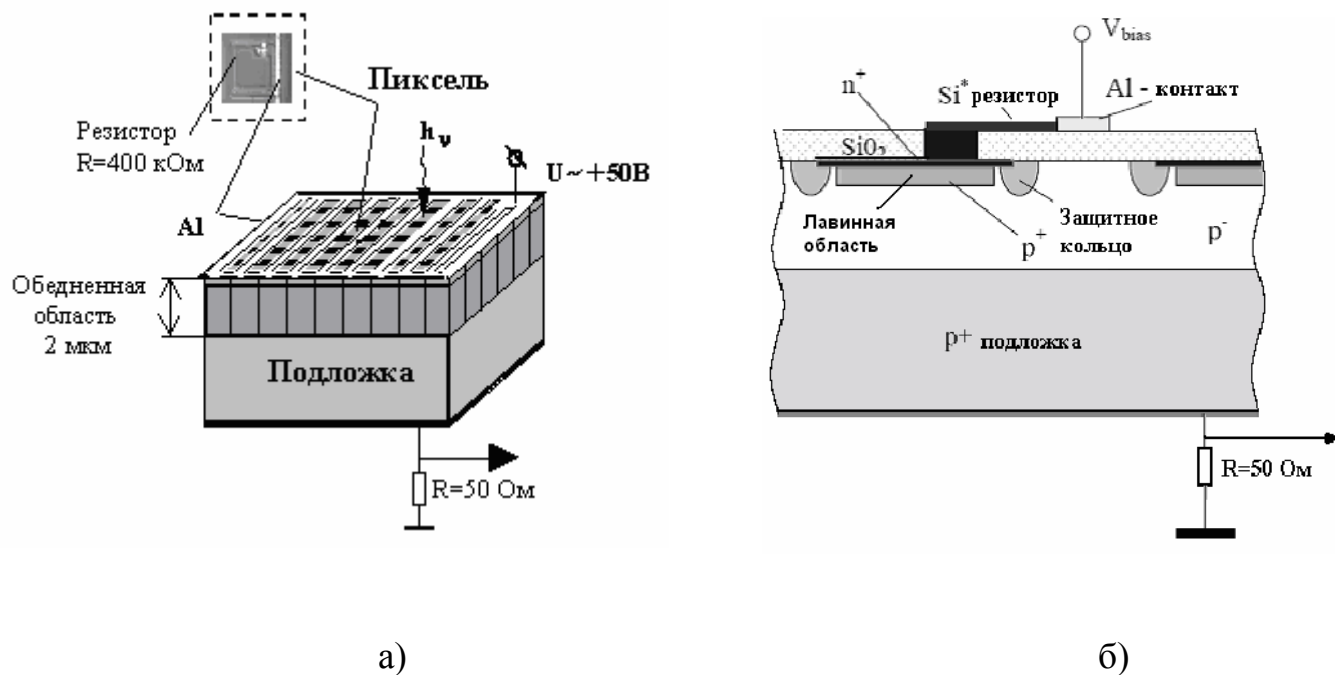


рис. 2. а) схема устройства MAPD, б) схема устройства пикселя MAPD

Поскольку все пиксели MAPD являются независимыми микросчетчиками, а сигнал с каждого пикселя определяется зарядом, накопленным на каждом пикселе, то коэффициент усиления MAPD (M) определяется, в основном, зарядом (Q_{pixel}) накопленном на емкости пикселя C_{pixel} :

$$M = Q_{\text{pixel}} / e, \quad (1)$$

$$\text{где } Q_{\text{pixel}} = C_{\text{pixel}} \cdot \Delta U = C_{\text{pixel}} \cdot (U_{\text{bias}} - U_{\text{breakdown}}), \quad (2)$$

а $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона.

Например, для фотодиода, изготовленного МИФИ совместно с ГУП «НПП «Пульсар»» величина ΔU составляет ≈ 6 вольт, а емкость пикселя $C_{\text{pixel}} \sim 50$ фмФ*. Таким образом, величина заряда пикселя Q_{pixel} около 300 фмКл или $2 \cdot 10^6$ зарядов электрона, т.е. $M = 2 \cdot 10^6$.

Разброс величины усиления определяется технологическим разбросом величины элементарной емкости и напряжением пробоя пикселей и составляет менее 10 %. Поскольку все пиксели одинаковые, отклик детектора на слабые световые вспышки пропорционален их интенсивности.

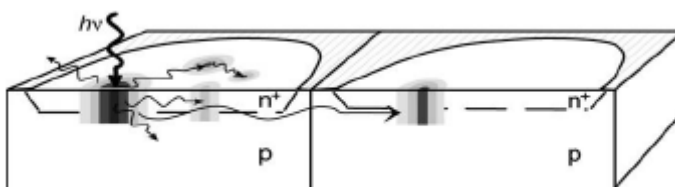


Рис. 3. Схема возникновения оптической связи между пикселями MAPD.

Однако, следует отметить, что в микропиксельной структуре между пикселями возникает оптическая связь (рис. 3): при развитии лавины есть

* типичные емкости для пикселя MAPD десятки, а иногда и сотни фмФ

вероятность рекомбинации электронно-дырочных пар, что приводит к возникновению фотонов, которые могут проникнуть в соседний пиксель и вызвать там фотоионизацию. Коэффициент усиления M , представляющий собой отклик фотодиода на единичный детектируемый фотон, таким образом, увеличивается.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 3 приведена блок-схема экспериментальной установки, с помощью которой производятся измерения.

В качестве источника света используется быстрый светодиод (LED) HLMP8100 (“Hewlett Packard”) с длиной волны $\lambda=640$ нм (максимум интенсивности). Светодиод питается от ждущего генератора импульсов (Led supply) с частотой $\nu = 1000$ Гц и длительностью 15 нс. Амплитуда импульсов регулируется в интервале $0 \div 7$ В, что позволяет изменять интенсивность света излучаемого светодиодом. Ждущий генератор импульсов запускается триггерным генератором импульсов (GEN) KB 005.

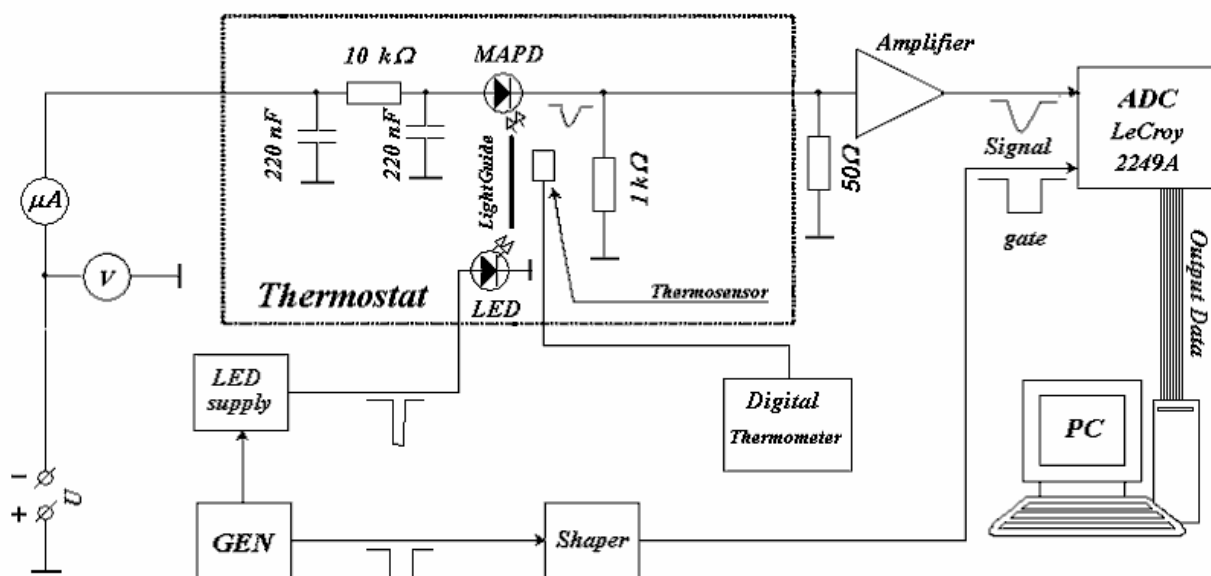


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

Свет, излучаемый светодиодом, транспортируется воздушным световодом (light guide) к фотодиоду (MAPD). В качестве фотодетектора в данной лабораторной работе используется **MAPD S60**. Фотодетектор светоизолирован.

Фотодиод питается от внешнего источника регулируемого постоянного напряжения ($U = 0 \div 120$ В). Для подавления пульсаций от источника питания, а также внешних высокочастотных наводок, которые могут возникать в электрической цепи от внешнего электромагнитного излучения, в цепь питания фотодиода включается С-Р-С (Π-образный) фильтр (здесь емкости $C=220$ нФ, сопротивление $R=10$ кОм).

В результате попадания импульса света на поверхность фотодиода возникает импульс тока, который усиливается посредством малошумящего быстродействующего линейного усилителя Philips Scientific модель 777.

Для измерения амплитуды зарядового импульса в установке используется быстродействующий зарядово-цифровой преобразователь (ЗЦП) ADC LeCroy 2249A. Выходной сигнал с усилителя подается на ЗЦП,

который оцифровывает площадь сигнала (заряд) при наличии стробирующего импульса (gate), то есть интегрирование сигнала происходит лишь во время длительности строба. Строб-импульс создается триггерным генератором и имеет длительность ≈ 30 нс, которая задается формирователем сигнала (Shaper) – дискриминатором LeCroy 4608с. Синхронизация строб-импульса и сигнала позволяет регистрировать импульс, возникающий с фотодиода под действием иницирующего света на фоне темновых (шумовых) импульсов. Тем не менее, происходит регистрация шумовых сигналов во время длительности строб-импульса.

Блоки GEN, Led Supply, Shaper выполнены в стандарте NIM, а блок ADC выполнен в стандарте CAMAC. Данные (output data) с ADC посредством контроллера считываются компьютером (PC).

Для исключения возможных систематических ошибок в измерениях, возникающих при изменении температуры, светодиод и фотодетектор расположены в термостате (thermostat) ТВЛ-К (50).

Дополнительно температура в термостате измеряется цифровым термометром (digital thermometer), термодатчик (thermosensor) которого размещен в непосредственной близости к MAPD. Последний необходим для того, чтобы избежать ошибок измерения связанных с возможными пространственными температурными неоднородностями воздуха находящегося в термостате.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Методика измерений основана на применении вспышек света малой интенсивности.

Падающий поток фотонов на фотодетектор рождает фотоэлектроны посредством фотоэффекта. От вспышки к вспышке число фотонов попавших на фотодетектор не является постоянным, а подчиняется распределению Пуассона (малое количество света). Фотоконверсия (процесс преобразования фотона в фотоэлектрон) является бинарным (есть - нет) процессом. Свертка Пуассоновского процесса с бинарным процессом дает снова распределение Пуассона. Поэтому процесс образования фотоэлектронов также подчиняется распределению Пуассона:

$$P(n; \mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}, \quad (3)$$

со средним μ , определяемым как

$$\mu = m \cdot PDE, \quad (4)$$

где

- μ – среднее число фотоэлектронов, возникших в результате фотоэффекта;
- $P(n, \mu)$ – вероятность того, что n фотоэлектронов будут наблюдаться на выходе фотодетектора, при их среднем равным μ ;
- m – среднее число фотонов попавших на поверхность фотодетектора;
- PDE (Photon Detection Efficiency) – эффективность регистрации фотона*.

Данные с ADC анализируются персональным компьютером и представляются в виде гистограммы номер канала (заряд) - число событий (импульсов) попавших в канал. Цена канала ADC – LeCroy 2249A составляет $Q_{ch}[ADC] = 0.25 \text{ нКл}$. В дальнейшем все зарядовые величины, если это неговорено, указаны в единицах каналов. Однако, в реальности, также, используется усилитель сигнала, поэтому цена канала соответствует меньшему заряду на выходе с детектора и определяется как:

$$Q_{ch} = \frac{Q_{ch}[ADC]}{K}, \quad (5)$$

где K – коэффициент усиления усилителя (в нашей установке $K=50.9$).

Чтобы перейти от величин измеренных в каналах к реальным характеристикам, необходимо величину данную в каналах умножить на Q_{ch} .

* Для ФЭУ и фотодиодов со сплошной фоточувствительной областью PDE тождественна квантовой эффективности. То есть PDE представляет собой полную вероятность преобразования фотона в фотоэлектрон фотодетектором.

Для определения среднего числа фотоэлектронов используем тот факт, что они распределены согласно распределению Пуассона. Вероятность того, что мы не зарегистрируем фотоэлектроны равна:

$$P(0; \mu) = \frac{\mu^0 e^{-\mu}}{0!} = e^{-\mu}, \quad (6)$$

отсюда среднее число фотоэлектронов попавших на фотодетектор:

$$\mu = -\ln P(0; \mu). \quad (7)$$

Пьедестал – это параметр спектрометрического канала, который является измеренным зарядом от темнового тока детектора и токов утечки входной цепи преобразователя за время длительности строба. Таким образом, отклики фотодетектора (события) соответствующие тому, что на фотодетекторе не образовалось ни одного фотоэлектрона образуют на амплитудном спектре, считываемом с ADC, пьедестал (рис. 4). Тогда вероятность отсутствия фотоэлектрона:

$$P(0; \mu) = N_{ped} / N, \quad (8)$$

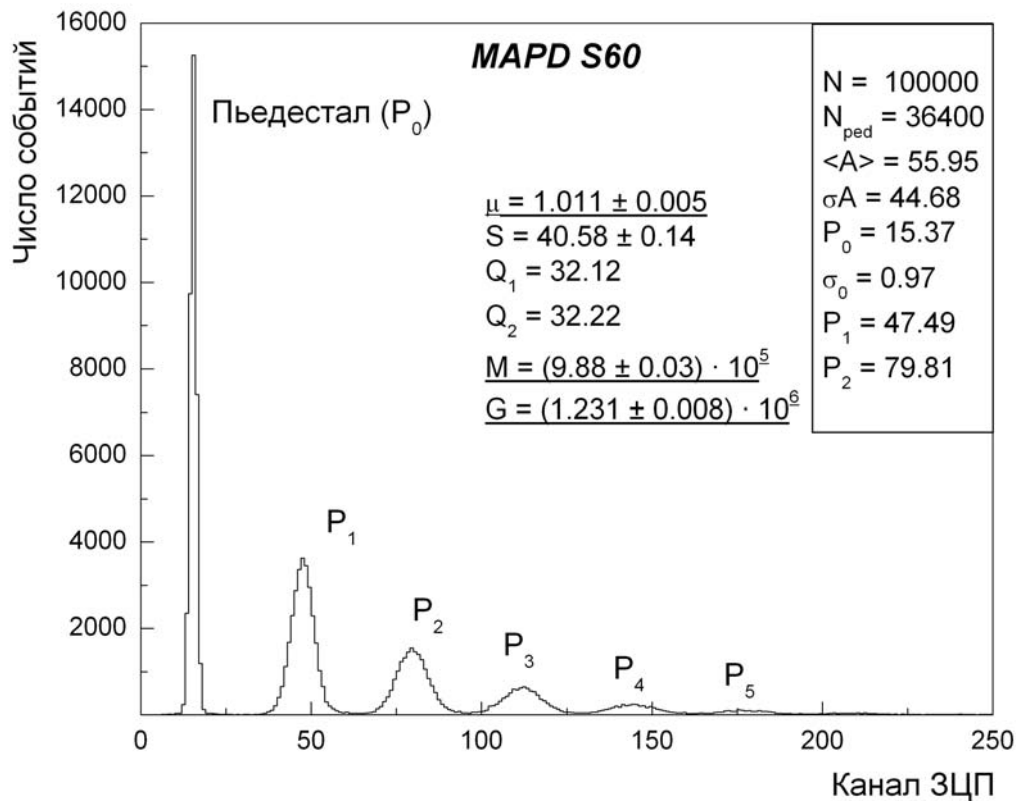


Рис.4. Амплитудный спектр сигналов с **MAPD S60** (при постоянной температуре T и питающем напряжении U_{bias}).

где N_{ped} – число событий в пьедестале, N – общее число событий.

В указанном на рис. 4 случае $N = 100000$, $N_{ped} = 36400$, следовательно:

$$\mu = -\ln\left(\frac{N_{ped}}{N}\right) = -\ln(0.364) \cong 1.011. \quad (9)$$

Ошибка μ как вычисляемой величины по определению:

$$\Delta\mu = \sqrt{\left(\frac{\partial\mu}{\partial N_{ped}} \cdot \Delta N_{ped}\right)^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial N} \cdot \Delta N\right)^2}, \quad (10)$$

так как $\Delta N = 0$, то

$$\Delta\mu = \frac{\Delta N_{ped}}{N_{ped}}, \quad (11)$$

где

$$\Delta N_{ped} = \sqrt{(\Delta N_{ped\,stat})^2 + (\Delta N_{ped\,sys})^2}, \quad (12)$$

$$\Delta N_{ped\,stat} = \sqrt{N_{ped}} \quad (13)$$

здесь $N_{ped\,stat}$, $\Delta N_{ped\,sys}$ – соответственно статистическая и систематическая ошибка в определении числа событий в пьедестале N_{ped} . Если пьедестал хорошо отделяется от остальной части амплитудного спектра, то систематическая ошибка практически равна нулю (в нашем примере), в противном случае она не нулевая и зависит от методики измерения*.

В нашем примере $\Delta\mu$ равно:

$$\Delta\mu = \frac{\Delta N_{ped}}{N_{ped}} = \frac{1}{\sqrt{N_{ped}}} = \frac{1}{\sqrt{36400}} \cong 0.005. \quad (14)$$

В дальнейшем мы не приводим численные расчеты. Рекомендуем студенту самостоятельно проделать необходимые вычисления нижеследующих величин, используя данные, приведенные на рис. 4 и сравнить их.

Средний сигнал S определяется как среднее значение амплитудного распределения $\langle A \rangle$ минус положение пьедестала:

$$S = \langle A \rangle - P_0. \quad (15)$$

* Например, используя нашу методику, систематическая ошибка численно равнялась бы среднему числу событий, которые перекрываются с остальной частью спектра. Ее можно оценить из амплитудного спектра шумовых импульсов (при выключенном светодиоде).

Ошибка, возникающая при определении сигнала, связана с ошибкой в определении положения пьедестала и статистической ошибкой в определении средней амплитуды гистограммы, равна:

$$\Delta S = \sqrt{\frac{(\sigma_0)^2}{N_{ped}} + \frac{(\sigma A)^2}{N}}, \quad (16)$$

где σA и σ_0 - стандартные отклонения от средних значений амплитуды и пьедестала соответственно. Однако, ошибка в определении положения пьедестала существенно меньше ошибки амплитуды (в чем легко убедиться, используя данные на рис. 4), поэтому:

$$\Delta S \cong \frac{\sigma A}{\sqrt{N}}. \quad (17)$$

Коэффициент усиления пикселей флуктуирует около среднего статистического и определяется вероятностным распределением со средним M . Флуктуации усиления обусловлены, в основном, технологическим разбросом, который, естественно, является чисто случайным распределением. Так как пикселей достаточно много ($\approx 10^3$), то, распределение усилений пикселей может быть описано распределением Гаусса.

Таким образом, положение пика P_1 гауссова распределения определяет коэффициент усиления фотодетектора и вычисляется как:

$$Q_1 = P_1 - P_0. \quad (19)$$

откуда

$$M = Q_1 / e. \quad (20)$$

Обращаем внимание на то, что коэффициент усиления можно определить, используя положение k -того фотоэлектронного пика (P_k) как:

$$M_k = \frac{(P_k - P_0)}{k \cdot e} = \frac{Q_k}{e}. \quad (21)$$

Из-за собственных шумов детектора, последующей электроники и прочих факторов происходит эффективное смещение фотоэлектронных пиков. Поэтому $M_k - M_j \neq 0$. Благодаря чему и возникает систематическая ошибка в определении коэффициента усиления. Наиболее заметная разница между 1-м и 2-м пиками, поэтому ее принято брать за систематическую ошибку:

$$\Delta M_{his} = |M_2 - M_1| = \frac{|Q_2 - Q_1|}{e}. \quad (22)$$

Усредненный по всем фотоэлектронным пикам коэффициент усиления M полагается равным M_2 , так как в большинстве случаев близок к нему. Статистическая ошибка в определении фотоэлектронных пиков значительно меньше систематической ошибки^{*}, поэтому:

$$\Delta M \approx \Delta M_{sys}. \quad (23)$$

Среднее усиление фотодетектора G для MAPD отличается от среднего усиления пикселя из-за возникновения оптической связи между пикселями. Это обусловлено тем, что на один детектируемый фотон, в среднем, срабатывает более одного пикселя. Сигнал S на выходе с фотодетектора определяется количеством фотоэлектронов μ рожденных в результате фотоэффекта и усиленных за счет внутреннего усиления детектора G , то есть:

$$S = G \cdot \mu. \quad (24)$$

отсюда находим G :

$$G = \frac{S}{\mu}. \quad (25)$$

Из данных приведенных на рис. видно, что G отличается от M примерно в 1.25 раза (среднее число сработавших пикселей), то есть за счет оптической связи усиление детектора эффективно увеличилось на 25%.

Ошибка в определении G как вычисляемой величины определяется как:

$$\Delta G = \sqrt{\frac{(\Delta S)^2}{\mu^2} + \frac{S^2 \cdot (\Delta \mu)^2}{\mu^4}}. \quad (26)$$

Обращаем ваше внимание на то, что величины M и G принято указывать в абсолютных единицах (в размах). Для этого необходимо перейти от единиц каналов при вычислении величин Q_k к единицам заряда (кулонам) используя формулу (5).

Определение PDE прибора достаточно сложная задача и в рамках данной лабораторной работы не рассматривается. Приведем лишь зависимость PDE для **MAPD S60** от питающего напряжения (рис.5) для красного излучения с длиной волны $\lambda = 640$ нм.

^{*} Следует отметить, что это, вообще говоря, неверно и возможно лишь при достаточно большой статистике событий, как, например, в нашем случае.

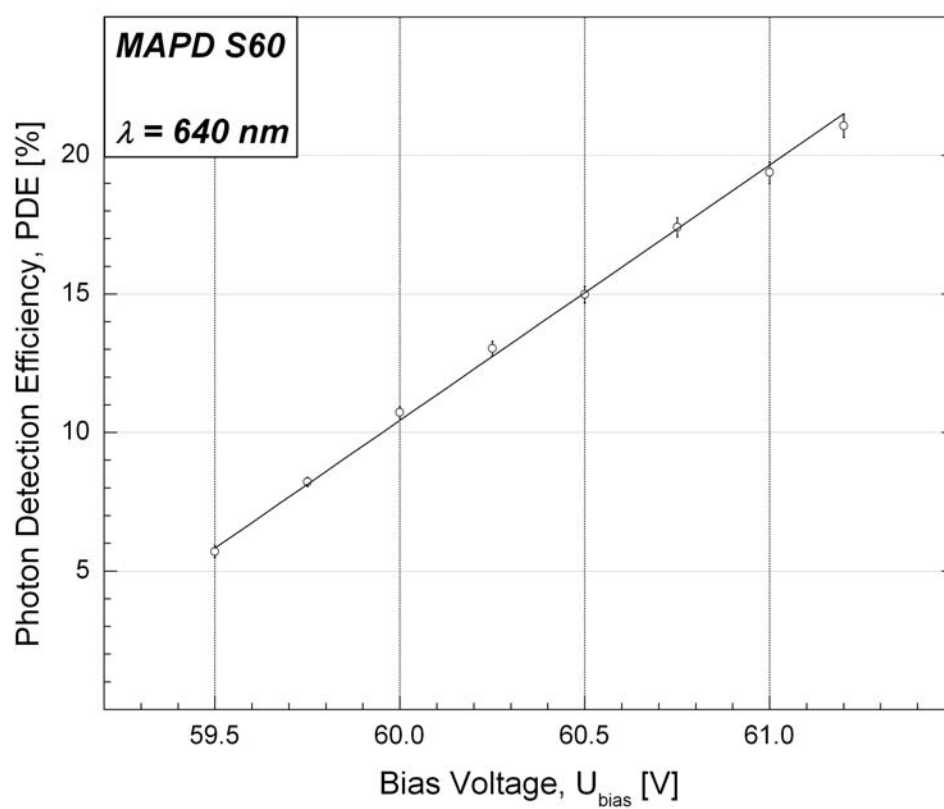


рис.5. Кривая эффективности регистрации фотона (PDE) в зависимости от напряжения питания U_{bias} для прототипа **MAPD S60**.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

Перед началом выполнения работы, с целью экономии времени, все необходимое оборудование будет включено, поскольку необходимо время для выхода на нормальный режим (на некоторых блоках достигается лишь через 30 мин).

1. Для ознакомления со структурой фотодиодов студенту предлагается посмотреть на готовые образцы прибора в микроскоп. Сосчитать и записать число пикселей N_{pix} , так как это служит оценкой верхнего предела динамического диапазона в фотоэлектронах данного устройства.

2. Студенту выдается прототип **MAPD S60** и сообщается максимально допустимый ток I_{max} , протекающий в цепи фотодиода. Необходимо самостоятельно включить MAPD и выставить рабочее напряжение. С этой целью в экспериментальной установке предусмотрена посадочная панель для фотодиода. MAPD располагается в черной светоизолированной коробке. Коробку необходимо открыть, вставить фотоприемник в панель, а затем закрыть. Сама коробка расположена в термостате. Ток, протекающий в цепи MAPD, мониторируется при помощи микроамперметра, а напряжение вольтметром (см. рис. 3). Блок питания имеет регулятор напряжения. Перед включением фотодиода напряжение на блоке питания выставляется равным нулю. Затем начинаем плавно изменять напряжение, поворачивая регулятор с обозначением «точно». Если при малом напряжении (несколько десятых долей вольта) в цепи фотодетектора протекает большой ток (несколько микроампер), то это означает, что фотодиод включен в прямом направлении. В этом случае детектор необходимо вынуть и изменить полярность. Светодиод (LED) при этом выключен (положение вниз тумблера на блоке LED Suplly). Поэтому микроамперметр будет показывать темновой ток фотодиода.

Выставить рабочую точку можно по показаниям микроамперметра: как только в цепи фотодиода начинает протекать постоянный темновой ток в несколько десятков нА, то это означает, что фотодиод начинает работать в режиме большого усиления, поскольку весь ток, протекающий в цепи фотодиода, при этом, обусловлен шумовыми (единичными) срабатываниями пикселей (светодиод выключен).

Каждому студенту в группе будет предложено установить свое рабочее напряжение MAPD. Записать в тетрадь рабочий темновой ток I_d и рабочее напряжение смещения U_{bias} .

3. Включить светодиод. Блок Led Suplly имеет 4 выхода для питания светодиода. В каждом из них установлено различное по интенсивности количество света. Запустить компьютерную программу в анимированном режиме набора статистики – “Animation Start”. Убедится, что количество света мало – выполняется закон распределения Пуассона, то есть выделяются фотоэлектронные пики, подобно спектру приведенному на

рис. 4. Пьедестал, точнее его площадь, при этом должен составлять не менее 10% от общего числа событий (оценивается визуально). Если амплитудное распределение близко к распределению Гаусса и при этом пьедестал отсутствует (что не позволит определить число фотоэлектронов), то это означает, что света слишком много и методика вспышек света малой интенсивности не применима. Для этого необходимо выйти из анимированного просмотра набора статистики, посредством нажатия на клавишу F10. Переключить кабель питания светодиода в следующий выход LED Supply. Повторять данную процедуру до тех пор, пока не увидите необходимый спектр.

4. Выйти в главное меню. Выбрать пункт меню “Start”. Установить значение набора общего числа событий “Number of Events” равным 100 000 (это достаточное число событий для того, чтобы при вычислениях получить малые величины статистических ошибок). Нажать ввод – “Enter”. После набора выбрать пункт меню “View Buffer” для просмотра набранного амплитудного спектра. Убедившись, что спектр набран, необходимо его сохранить. Нажать F10 для выхода в главное меню. Выбрать пункт меню “Save Buffer to Text File”. Программа запросит ввести имя файла. Введите свои инициалы, нажмите точку и в качестве расширения файла напишите OUT.

5. Файл передать лаборанту. Он запустит программу автоматической обработки спектра, выдаст распечатку полученной гистограммы и вычислит следующие параметры, которые необходимо занести в тетрадь:

- N – общее число событий в спектре;
- N_{ped} – число событий в пьедестале;
- $\langle A \rangle$, σA – среднее значение гистограммы и его стандартное отклонение;
- P_0 , σ_0 – положение пьедестала и стандартное отклонение от P_0 ;
- P_1 , P_2 – соответственно положения первого и второго фотоэлектронных пиков.

6. Далее студент должен самостоятельно вычислить и занести в тетрадь следующие величины:

- среднее количество фотоэлектронов μ и ошибку этого среднего $\Delta\mu$;
- оценить среднее число фотонов m (см. формулу 4); падающих при вспышке на поверхность фотодиода используя зависимость PDE от напряжения MAPD приведенную на рис. 5;
- средний сигнал S и ошибку в определении этого среднего;
- величины Q_1 , Q_2 ;
- усиление пикселя M и ΔM ;
- усиление детектора G и ΔG ;

7. После того как все студенты в группе выполняют задания 1 – 6, предлагается оценить, объединяя полученные данные, емкость пикселя детектора, используя соотношение:

$$C_{pix} = \frac{\Delta Q_{pix}}{\Delta U_{bias}}, \quad (27)$$

где в качестве величины $Q_{pix[i]}$ берется $Q_{2[i]}$ и приращение $\Delta Q_{pix[i]} = |Q_{2[i]} - Q_{2[i-1]}|$. Емкость пикселя необходимо выразить в фмФ. Обращаем внимание студентов, на то, что при вычислении величин $Q_{pix[i]}$ и $\Delta Q_{pix[i]}$ величины Q_2 необходимо перевести в Кулоны (см. формулу 5).

Полученные значения $\Delta Q_{pix[i]}$ необходимо усреднить. За ΔQ_{pix} принять $\langle \Delta Q_{pix} \rangle$. Получить разности $|\langle \Delta Q_{pix} \rangle - \Delta Q_{pix[i]}|$ и по максимальной разности вычислить ошибку ΔC_{pix} считая ее систематической.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Chirikov-Zorin et al. Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier. Preprint of JINR, Dubna, 1993; Nuclear Instrument & Methods A339(1994)468.
2. E. Chirikov-Zorin et al. Method for precise analysis of the metal package photomultiplier single photoelectron spectra. Preprint of JINR, Dubna, 2000; NIM A456(2001)310.
3. З.Я. Садыгов и др. О перспективах использования новых кремниевых лавинных фотоприемников с локальной отрицательной связью. Препринт ОИЯИ, ЛВЭ, 2000г.
4. B. Dolgoshein. Silicon photomultipliers in particle physics: possibilities and limitations. MIPhI, Moscow.
5. A. Akindinov et al. Scintillation counter with MRS APD light readout. NIM A539(2005)172–176
6. Ю.К. Акимов. Позиционно-чувствительные сцинтилляционные детекторы ядерных излучений. ПТЭ, 1994 г., №6.
7. И.Р. Гулаков, С.В. Холондырев. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях. Изд. «Университетское», 1989 г.