



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Ю.К. Акимов, А.И. Калинин, А.И. Сидоров

P - 1526

КРЕМНИЕВЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ СЧЕТЧИК
КАК ЛИНЕЙНЫЙ ДЕТЕКТОР
КОРОТКИХ СВЕТОВЫХ СИГНАЛОВ,

Дубна 1964

Ю.К. Акимов, А.И. Калинин, А.И. Сидоров

Р-1528

КРЕМНИЕВЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ СЧЕТЧИК
КАК ЛИНЕЙНЫЙ ДЕТЕКТОР
КОРОТКИХ СВЕТОВЫХ СИГНАЛОВ

Дубна 1984

В литературе имеется много работ, посвященных полупроводниковым фотодиодам с диффузионным механизмом собирания электронно-дырочных пар, освобожденных светом.

Основными недостатками таких приборов являются относительная медленность процесса собирания, протекающего в течение микросекунд, и существенная зависимость квантового выхода от длины волны. Квантовый выход резко падает в области коротких длин волн вследствие рекомбинаций в "мертвом" слое диода, а также заметно уменьшается в инфракрасной области, когда глубина поглощения света становится соизмеримой с диффузионной длиной неравновесных носителей.

Появление полупроводниковых детекторов ядерных частиц привело к новым возможностям для регистрации световых сигналов, поскольку фототок таких детекторов обусловлен в основном носителями, образующимися в слое объемного заряда $p-n$ -перехода, где время собирания носителей составляет несколько десятков или даже единиц наносекунд. В работе ^{1/} описаны свойства диффузионного кремниевоегo детектора, используемого в качестве фотодиода. Однако наличие в детекторе "мертвого" слоя и недостаточная толщина $p-n$ -перехода и в этом случае явились причиной снижения фоточувствительности прибора в области коротких и длинных волн. Кроме того, указанная работа не содержит характеристик фотодиода для световых сигналов, создающих в $p-n$ -переходе большую концентрацию электронно-дырочных пар, что представляет определенный интерес для практического применения.

В настоящей работе приводятся результаты исследований фотоэлектрических свойств кремниевых детекторов со слоем объемного заряда толщиной около 1 мм и площадью 1,5 - 2 см², практически не имеющих "мертвого" слоя ^{2/}. Эти детекторы чувствительны к фотонам с длиной волны $\lambda = 300 - 1150$ нм. При этом для образования на выходе детектора заряда, равного одному электрону, расходуется примерно два фотона.

Чувствительность детектора к световым сигналам ограничивается уровнем собственных шумов /а также шумов усилителя/. В частности, полная шумовая "дорожка" применявшегося нами детектора составляла 15000 электронов в области частот 0,5 - 10 мгпц. Для сравнения укажем, что шумы промышленного фотодиода типа ФД-2, имеющего площадь всего лишь 1 мм², составляли около 300000 электронов.

Линейность преобразования светового сигнала в электрический исследовалась с помощью искусственной искры, возникавшей в результате пробоя между двумя ост-

рями, к которым прикладывалось высокое напряжение $U = 4 - 5$ кВ. При различных расстояниях r от искры измерялась амплитуда импульса U детектора, нагруженного на сопротивление $R_H = 6,5$ ком или непосредственно на кабель РК-150. В последнем случае импульс напряжения в первом приближении совпадал по форме с импульсом тока. Длительность импульса на полувысоте равнялась 0,3 мксек и определялась в основном длительностью искры, поскольку время собирания зарядов в детекторе составляло $\sim 0,03$ мксек. Напряжение смещения на детекторе равнялось 150в. Измерения осуществлялись амплитудным анализатором и осциллографом. Результаты измерений представлены в двойном логарифмическом масштабе на рис. 1. Прямые линии, нанесенные на рис. 1, выражают зависимость $U \sim \frac{1}{r^2}$. Эта зависимость достаточно хорошо выполняется в широкой области амплитуд до 70 в при $R_H = 6,5$ ком и до 7в в случае, когда $R_H = 150$ ом. Нелинейность возникла примерно при одном и том же расстоянии между детектором и искрой, независимо от величины нагрузочного сопротивления. При дальнейшем уменьшении r рост импульса фототока резко замедлялся, и он начинал растягиваться в основании вплоть до нескольких микросекунд.

Интересно отметить, что подобная картина наблюдалась также и в случае уменьшенной площади освещения детектора, что указывало на проявление плазменного эффекта в слое объемного заряда.

Поскольку чувствительность анализатора возрастала с увеличением длительности импульса, то измеренный анализатором верхний предел области линейности амплитуд оказался в 1,5 - 2 раза выше, чем в случае наблюдений на осциллографе.

При неперпендикулярном падении света на детектор амплитуда его импульса уменьшалась по закону, представленному на рис. 2. Изменению угла падения α , например, от 0 до 40° соответствовало уменьшение амплитуды импульса на 40%. Снижение амплитуды импульса с ростом α было обусловлено уменьшением телесного угла, "вырезаемого" в пространстве детектором, и увеличением доли света, отраженного от поверхности детектора.

Амплитуда импульса детектора в довольно широкой области практически не зависит от величины напряжения смещения U_c . На рис. 3 приведена характеристика $U = f(U_c)$ для детектора, нагруженного непосредственно на кабель. Эта характеристика, начиная с $U_c = 120$ в, имеет вид горизонтальной прямой, в то время как изменение амплитуды импульса фотодиода ФД-2 составляет 0,5% на 1 в.

Амплитуда импульса кремниевого детектора практически не подвержена влиянию температурных колебаний, что было проверено в области $17 - 55^\circ\text{C}$. Во всяком случае амплитудная нестабильность в этой области была не более 0,1% на 1°C , между тем как для ФД-2 нестабильность равнялась 0,5% на 1°C .

Стабильность амплитуды импульсов во времени проверялась с помощью дифференциального усилителя, которым регистрировалась разность амплитуд импульсов с двух детекторов, одинаково удаленных от искры. Серия измерений, проведенных в течение двух суток, свидетельствовала об относительном постоянстве амплитуд этих детекторов с точностью, лучшей 1%. Это и не удивительно, так как в опытах с сильно ионизирующими частицами, где использовались подобные детекторы, были получены амплитудные разрешения около десятой процента.

Итак, рассмотренные выше результаты измерений свидетельствуют о том, что кремниевый поверхностно-барьерный детектор с широким слоем объемного заряда является не только хорошим спектрометрическим счетчиком ядерных частиц в широком диапазоне их энергий, но и весьма совершенным быстродействующим фотодиодом, стабильно и линейно преобразующим световые сигналы в электрические с амплитудой вплоть до сотни вольт.

Остановимся на некоторых возможных вариантах практического использования фотоэлектрических свойств кремниевых детекторов.

1. С помощью световых источников удобно проверять и калибровать аппаратуру, в которой ядерные частицы регистрируются полупроводниковыми детекторами. При этом могут быть измерены как амплитудные, так и временные характеристики аппаратуры, если освещать несколько детекторов одновременно.

2. Сочлинив полупроводниковый счетчик со сцинтиллятором^{/2/} и поместив последний в пульсирующий пучок частиц ускорителя, можно применить такое устройство для определения интенсивности лучка. При этом используется большая радиационная стойкость сцинтилляторов по сравнению с кремниевыми p-n-переходами.

3. Кремниевые детекторы могут быть использованы для определения координат искры^{/5/}.

Чтобы определить положение искры в одномерном случае, необходимо и достаточно измерить отношение амплитуд двух детекторов $U_1 = \frac{A}{x^2}$ и $U_2 = \frac{A}{(\ell - x)^2}$, где ℓ — расстояние между детекторами, x — расстояние от искры до одного из детекторов, A — коэффициент, пропорциональный яркости искры. Если измерять не отношение $\frac{U_1}{U_2}$, а сами значения U_1 и U_2 , то можно получить, кроме x , также и информацию об яркости искры.

Численный пример. Пусть $\ell = 300$ мм. Если искра возникла точно в середине, а затем переместилась на 1 мм, то при этом изменение отношения $\frac{U_1}{U_2}$ составит 2,5%. Предположим теперь, что $x = 30$ мм. В данном случае сдвигу $\Delta x = 1$ мм будет соответствовать $\Delta \frac{U_1}{U_2} = 7,5\%$. Измерять такие различия в настоящее время не является трудной задачей.

Для определения координат искры в плоскости требуется две пары детекторов, расположенных по взаимно перпендикулярным направлениям /см.рис. 4/. При этом учитывается как разброс в яркости искры, так и угловые зависимости в чувствительности детекторов. Если положение искры определяется в прямоугольной секции искровой камеры, то удобнее всего располагать детекторы по углам данной секции.

При измерении координат искры в камере могут возникнуть некоторые осложнения, обусловленные отражением света от электродов камеры, в результате чего появятся соответствующие трудности в описании зависимости амплитуды импульса от положения искры. Эти трудности можно в существенной мере обойти, тщательно прокалибрав камеру с помощью искусственной искры. Как показали измерения, доля отраженного от электродов света, попадающего на детектор, составляет ~ 15%. Влияние отражений в принципе может быть заметно уменьшено, если перед детектором поставить светофильтр, не пропускающий длинноволновую часть спектра, поскольку именно эта часть спектра преобладает в отраженном свете. Кстати сказать, ослабление уровня освещенности детектора в условиях работы обычной искровой камеры все равно необходимо, иначе световые сигналы будут слишком велики и возникнут амплитудные искажения импульсов. Показания детекторов должны обрабатываться соответствующим электронным устройством и подаваться далее на вычислительную машину. В случае одновременного возникновения двух или более искр амплитуда импульсов не удовлетворяет заданным отношениям, и такой случай автоматически исключается.

К достоинствам рассмотренного способа определения координат искры относятся:

1. Большая амплитуда импульсов детекторов, благодаря чему нет надобности в усилителях.
2. Способность детекторов работать в больших магнитных полях.
3. Возможность одновременного измерения яркости искры, что важно для камер, в которых яркость искры зависит от ионизационных потерь регистрируемой частицы.
4. Быстродействие детекторов.

Быстродействие является исключительно важным свойством для предварительного отбора событий, который может быть осуществлен быстрой логической схемой за время ~ 1 мксек с целью последующего запуска других искровых камер^{14/}.

Следует также отметить, что электронная аппаратура для вывода информации из камеры существенно упрощается, например, когда камера цилиндрическая и требуется измерять только угол вылета частицы из мишени, не интересуясь при этом

зависимостью от азимутального угла. В данном частном случае на каждую секцию камеры достаточно использовать лишь по два детектора, на которые собирается свет с противоположных торцов цилиндров.

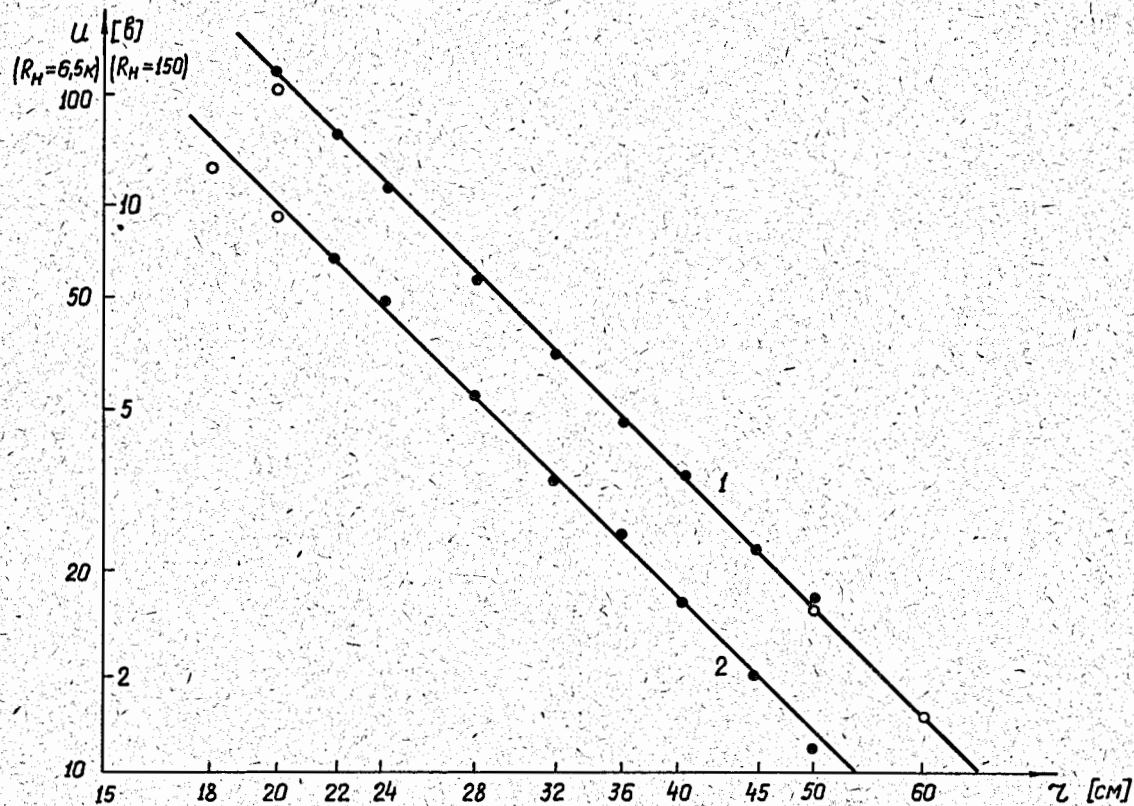
В заключение авторы выражают благодарность В.Ф. Борейко и В.Д. Шейко за техническую помощь в работе. Авторы признательны также А.А. Тяпкину и А.Ф. Писареву за полезные обсуждения вопросов, связанных с искровой камерой.

Л и т е р а т у р а

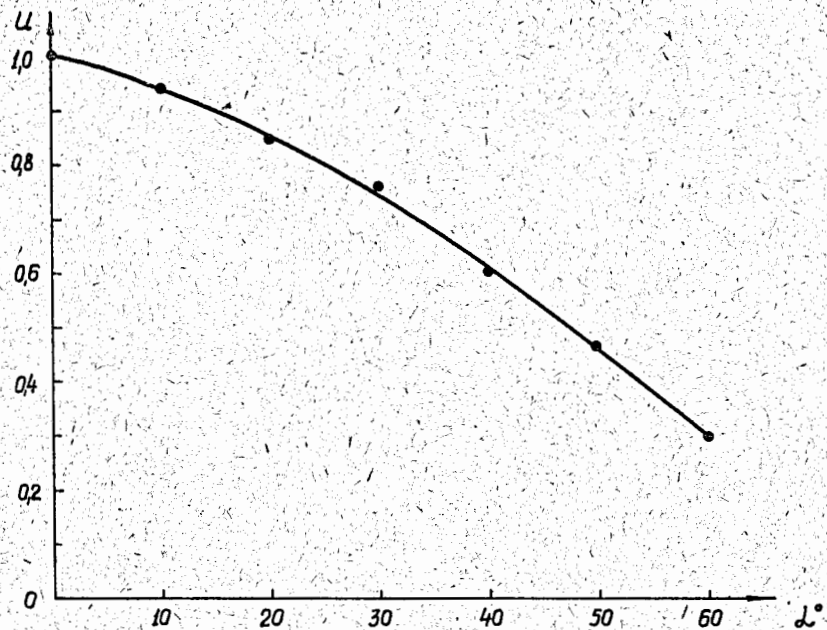
1. R.L. Williams. Journ.Opt.Soc.Am., 52, 1237, 1962.
2. А.И. Сидоров, Вань Цень-ва, Л.П. Сидорова, Л.И. Симонова. Метод получения кремниевых спектрометрических детекторов с широкой областью чувствительного слоя. Регистрационное удостоверение № 35288 с приоритетом 5/IV 1963 г.
3. A.J. Tuzzolino, E.L. Hubbard, M.A. Perkins, C.Y. Fan. Journ. Appl.Phys. 33, 148, 1962.
4. G. Charpak. Nucl.Instr. and Meth., 15, 318, 1962.
5. Ю.К. Акимов, А.И. Калинин, А.И. Сидоров. Определение координат искры с помощью поверхностно-барьерных $p-n$ переходов с широким слоем объемного заряда. Регистрационное удостоверение № 38288 с приоритетом 28/VII 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел

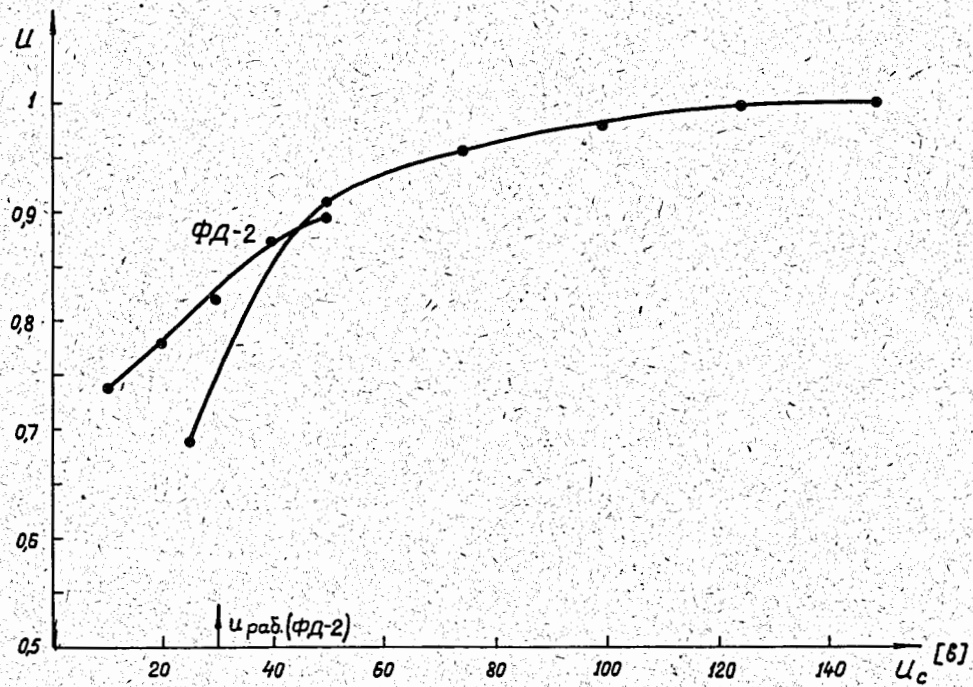
13 января 1964 г.



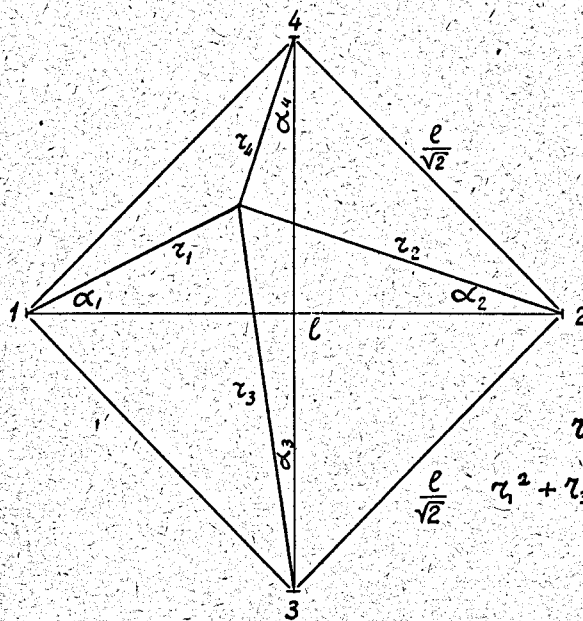
Р и с. 1. Зависимость амплитуды импульса детектора от расстояния до искры: 1 - $R_H = 6,5$ ком, 2 - $R_H = 150$ ом; точки - показания анализатора, кружочки - измерения на осциллографе.



Р и с. 2. Зависимость амплитуды импульса от угла падения света на детектор.



Р и с. 3. Зависимость амплитуды импульса от напряжения смещения на детекторе.



$$\begin{aligned}
 r_1 \sin \alpha_1 &= r_2 \sin \alpha_2 \\
 r_3 \sin \delta_3 &= r_4 \sin \delta_4 \\
 r_1 \cos \alpha_1 + r_2 \cos \alpha_2 &= l \\
 r_3 \cos \delta_3 + r_4 \cos \delta_4 &= l \\
 r_1^2 + r_3^2 - 2 r_1 r_3 \sin(\alpha_1 + \delta_3) &= \frac{l^2}{2}
 \end{aligned}$$

Р и с. 4. К определению координат искры с помощью четырех детекторов.