

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

00-194

P1-2000-194

З.Я.Садыгов, М.А.Воеводин, Т.Ю.Бокова,
Н.В.Пиляр, Ш.З.Сайфулин, А.В.Стойков,
М.К.Сулейманов, И.М.Железных*, В.И.Береснев*,
О.В.Каравичев*, В.Н.Марин*

О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ
КРЕМНИЕВЫХ ЛАВИННЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ
С ЛОКАЛЬНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ
СВЯЗЬЮ

*Институт ядерных исследований РАН, Москва

2000

1. Введение

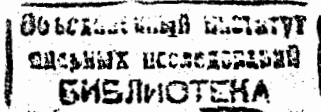
Научный и коммерческий интерес к разработке новых типов лавинных фотодиодов (ЛФД) вызван тем, что по сравнению с традиционными фотоумножителями (ФЭУ) ЛФД является более компактным прибором с низким уровнем питающего напряжения и имеет высокий квантовый выход (~80 %). На базе высокочувствительных кремниевых ЛФД, область чувствительности которых согласована со спектром излучения твердотельных сцинтилляторов, могут быть созданы новые многоканальные детекторы для применения в аппаратуре физики высоких энергий и медицинской томографии.

Однако в настоящее время еще не созданы адекватные твердотельные аналоги ФЭУ. Очень сложно обеспечить высокую стабильность и пространственную однородность характеристик традиционных ЛФД при больших усилениях сигнала. Это обусловлено наличием положительной обратной связи между лавинными процессами, вызванными электронами и дырками в полупроводниках. При больших коэффициентах усиления (порядка нескольких сотен) значительно возрастает вероятность образования локальных неуправляемых пробоев, приводящих к выходу прибора из строя.

В последние годы в ОИЯИ (г.Дубна), ИЯИ РАН (г.Москва) и Центре физических исследований им. П.Н. Лебедева (г.Москва) разработаны физические основы и изготовлены промышленные образцы новых лавинных фотодиодов с локальной отрицательной обратной связью (ЛФД ЛООС). Основной особенностью разработанных лавинных фотодиодов по сравнению с известными аналогами является то, что в них осуществляется локальная отрицательная обратная связь (ЛООС) между инициирующим лавину током и коэффициентом усиления. ЛООС достигается путем создания специальной формы электрического поля в полупроводнике, обеспечивающей необходимую пространственную локализацию и подавление лавинного процесса. Это позволяет сочетать высокий коэффициент усиления (до 10^7) сигнала с низким пространственным разбросом параметров разработанных лавинных фотодиодов [1].

2. Конструкция и принцип работы ЛФД ЛООС

Поперечное сечение разработанного лавинного фотодиода с диаметром чувствительной площади $d=1,2$ мм представлено на рис.1. В рабочем режиме к титановому затвору и охранному кольцу прикладываются отрицательные, относительно подложки, потенциалы, обеспечивающие развитие лавинного умножения носителей заряда в $p-n$ -переходе, где производится усиление фототока. После усиления носители заряда переносятся вдоль границы раздела $Si-SiO_2$ к охранному (стоковому) кольцу. Особенностью работы данного фотоприемника является то, что характер лавинного процесса в нем определяется величиной поверхностной проводимости границы раздела $Si-SiO_2$. Толщина и концентрация примесей в полупроводниковом слое p -типа проводимости выбираются так, чтобы при рабочем потенциале на фотоприемнике обедненная область достигла границы раздела $Si-SiO_2$.



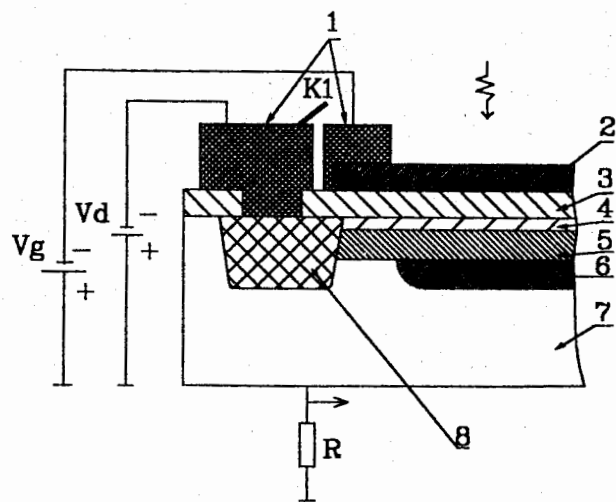
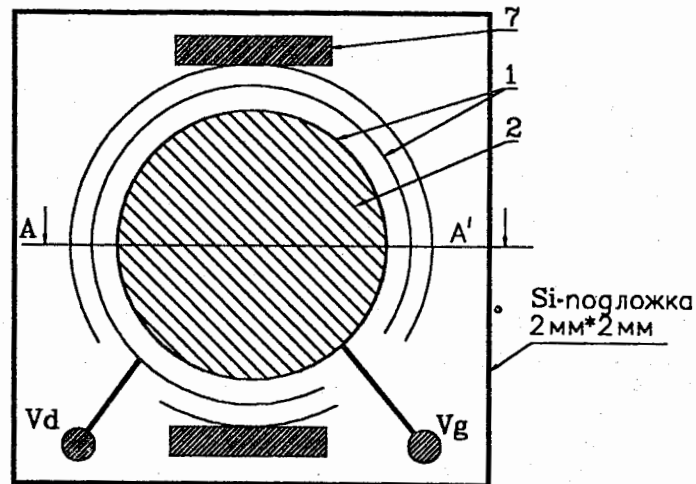


Рис.1. Эскиз конструкции ЛФД ЛООС:

1 - алюминиевые контакты; 2 - полупрозрачный титановый электрод (затвор); 3 - двуокись кремния; 4 - слой *p*-типа проводимости, обеспечивающий поверхностный перенос умноженных носителей заряда; 5 - кремниевый слой *p*-типа; 6 - кремниевый слой *n*-типа с повышенной по отношению к подложке концентрацией примесей; 7 - кремниевая подложка *n*-типа; 8 - стоковое кольцо

В этом случае на границе *Si-SiO₂* образуется сверхтонкий слой *p*-типа проводимости толщиной ~10 нм, сопротивление которого определяется величиной потенциала затвора. Величина поверхностного сопротивления этого сверхтонкого слоя определяет эффективность локальной стабилизации (или подавление темпа) лавинного процесса.

Процесс локальной стабилизации лавинного процесса происходит следующим образом. За время развития лавинного процесса, инициированного

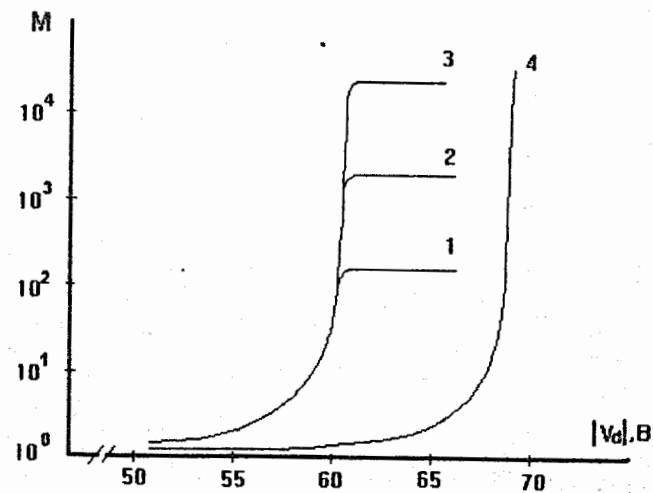


Рис.2. Зависимость коэффициента усиления фототока *M* от потенциала *V_d* стокового электрода. 1 - $V_g = -68,5$ В; 2 - $V_g = -69,0$ В; 3 - $V_g = -69,5$ В; 4 - $V_g = V_d$ (ключ *K₁* - замкнут)

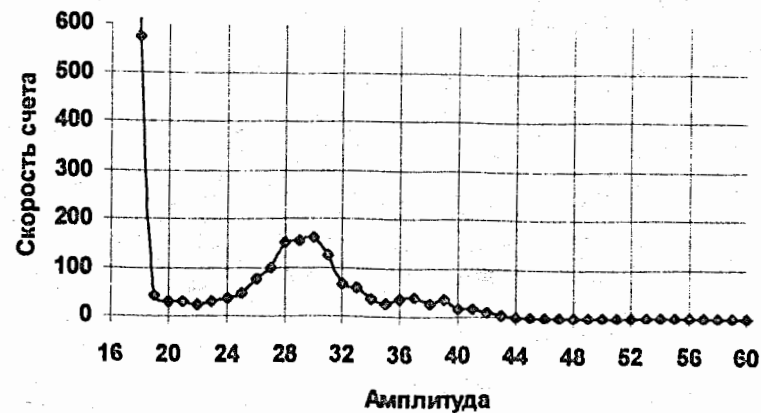


Рис.3. Амплитудное распределение сигнала в лавинном фотодиоде МК5 при среднем количестве фотонов в импульсе $N_{ph}=2$ ($T = -25^\circ\text{C}$)

единичным электроном (или фотоэлектроном). основная часть вновь образованных дырок накапливается в небольшой области границы раздела Si-SiO_2 с характерным размером, сравнимым с толщиной обеднения (~ 3 мкм) p - n -перехода. Это приводит к локальному уменьшению электрического поля в соответствующей области p - n -перехода, в результате чего ограничивается темп лавинного процесса в данном микроканале умножения. Таким образом достигается режим самостабилизации лавинного процесса по всей рабочей площади прибора. При этом фотоотклик формируется как ток смещения емкости диэлектрика.

На рис.2 представлен коэффициент усиления M импульсного фототока экспериментального образца лавинного фотоприемника в зависимости от напряжения V_d , приложенного к стоковому электроду при различных потенциалах V_g на титановом затворе. Диаметр рабочей площади образца составляет $\sim 1,2$ мм. Как показывают результаты испытания, при фиксированном потенциале на титановом затворе зависимость M от V_d всегда имеет область насыщения. Это связано с эффектом отсечки канала проводимости на границе Si-SiO_2 , приводящему к ограничению стокового тока в приборе. Однако импульсная люкс-амперная характеристика фотоприемника при этом остается линейной, благодаря низкому импедансу емкости подзатворного диэлектрика.

Существование насыщения в зависимости M от V_d указывает на реальную возможность создания на основе вышеуказанной структуры многоэлементных лавинных фотоприемников с высокой пространственной однородностью коэффициента усиления [2].

На рис.3 представлен амплитудный спектр при среднем количестве фотонов в импульсе $N_{ph}=2$ (при температуре $T = -25^\circ\text{C}$). Видно, что лавинный

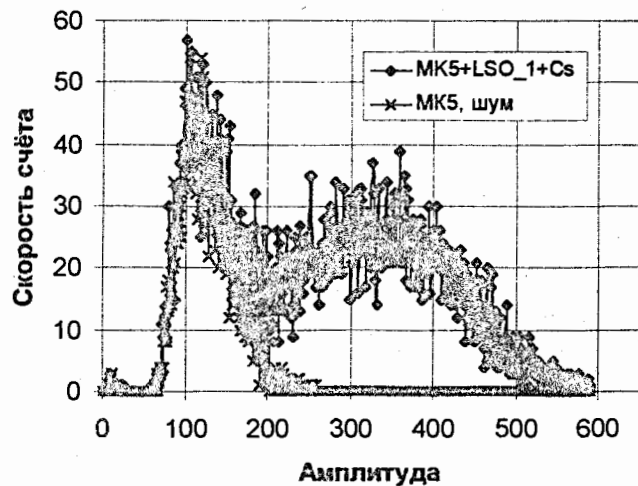


Рис.4. Амплитудный спектр сигнала одноэлементного сцинтилляционного детектора при регистрации гамма-излучения от изотопа Cs^{137}

фотодиод имеет одноэлектронный пик с разрешением $\sim 40\%$ при длине волны излучения ~ 550 нм. Спектр снимался по схеме совпадения с шириной стробирования ~ 50 нс. Количество фотонов в импульсе определялось с помощью ФЭУ-130 с известной спектральной чувствительностью фотокатода.

Как показывают испытания, разработанные ЛФД ЛООС с диаметром рабочей площади $d=1,2$ мм имеют высокую чувствительность. На рис.4 представлен амплитудный спектр, полученный при комнатной температуре с помощью одноэлементного лавинного фотодиода. Видно, что амплитудное разрешение детектора (фотодиод+сцинтиллятор) составляет величину $\sim 40\%$. Здесь в качестве сцинтиллятора использовался кристалл LSO (ортосиликат лития) размером $1 \times 1 \times 10$ мм. Сбор света производился с торца LSO площадью 1 мм^2 . В этом случае энергетическое разрешение образца сцинтилляционного детектора определялось «геометрическим» фактором (фотоэлектрон, созданный гамма-квантом, вылетает из объема LSO из-за малых размеров кристалла).

3. Конструкция модуля многоканального сцинтилляционного детектора заряженных частиц и гамма-излучения

На основе полученных результатов предложен 4-канальный компактный модуль лавинных фотодиодов с большой эффективной площадью (рис.5). Каждый элемент ЛФД ЛООС с фоточувствительной площадью $2,8 \times 2,8 = 7,84 \text{ мм}^2$ имеет оптический контакт с торцом LSO (или YAP) размером $4 \times 4 \times 10$ мм. При этом эффективность сбора света, выходящего с торца каждого кристалла LSO, может достигать $\sim 50\%$. Поскольку кристаллы LSO имеют плотную упаковку, то полезная (чувствительная) площадь сцинтилляционного детектора при регистрации заряженных частиц и гамма-квантов может составить $\sim 95\%$.

Таким образом, разработанный 4-элементный компактный модуль ЛФД ЛООС позволит создать (собрать) координатно-чувствительный сцинтилляционный детектор, практически без «мертвой» зоны, имеющий общую площадь до 1 м^2 .

4. Основные результаты и выводы

1. Разработаны, изготовлены и испытаны новые высокочувствительные лавинные фотодиоды, способные регистрировать слабые световые сигналы (вплоть до отдельных фотоэлектронов). В сочетании с различными сцинтилляторами разработанные фотодиоды дают возможность измерять энергию и пространственные координаты заряженных частиц и гамма-излучения.
2. На основе полученных результатов разработан 4-канальный компактный модуль ЛФД ЛООС, который позволит создать координатно-чувствительный сцинтилляционный детектор с большой эффективной площадью. Использование ЛФД ЛООС в электрон-позитрон и рентгеновских томографах, вместо ФЭУ, позволит упростить обработку информации, уменьшить себестоимость аппаратуры и улучшить координатное разрешение томографов.

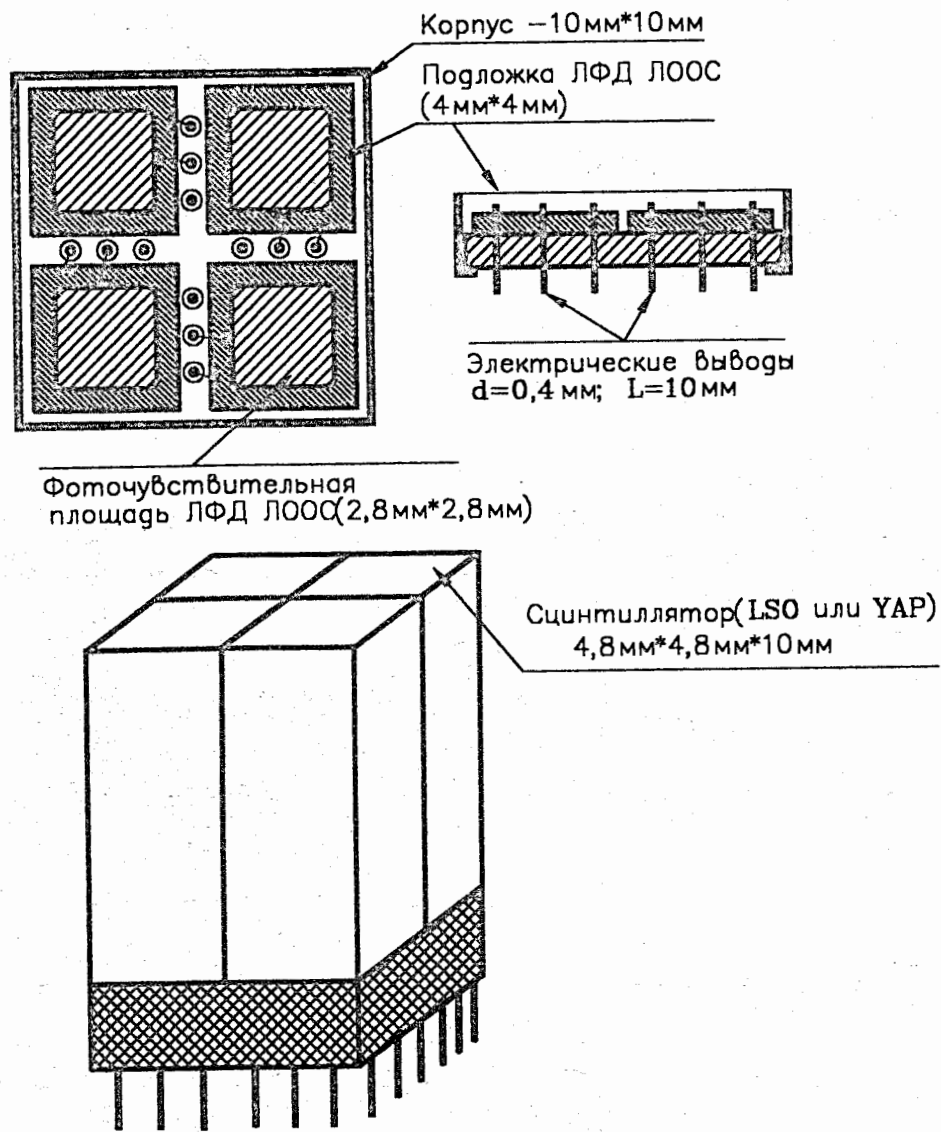


Рис.5. Эскиз компактного 4-элементного модуля сцинтилляционного детектора гамма-излучения с чувствительной площадью 100 мм^2

Таким образом, изготовлены и испытаны промышленные образцы новых лавинных фотодиодов, способные регистрировать сверхслабые световые потоки. По ряду параметров, таких как пороговая чувствительность, быстродействие, ширина спектральной чувствительности, коэффициент усиления и себестоимость, разработанные ЛФД ЛООС превосходят аналоги лавинных фотодиодов известных зарубежных фирм.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и технологий Российской Федерации в рамках программы «Научное приборостроение», контракт № 28/5 от 24.12.98 и № 100/ 548 от 23.02.99.

Авторы выражают благодарность В.А. Мончинскому, О.И. Бровка, В.И. Дацкову и А.А. Повторейко за проявленный интерес и поддержку.

Литература

- [1] Садыгов З.Я. // Физические процессы в лавинных фотоприемниках на основе структуры кремний-широкозонный слой. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Москва, МИФИ, 1997.
- [2] Садыгов З.Я., Сулейманов М.К., Бокова Т.Ю. // Письма в ЖТФ, 2000, Т.26, В.7, С.75-79.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 августа 2000 года.