

06;07;11;12

Сверхчувствительный лавинный фотоприемник с поверхностным переносом носителей заряда

© З.Я. Садыгов, М.К. Сулейманов, Т.Ю. Бокова

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Поступило в Редакцию 14 октября 1999 г.

Обсуждаются конструкция и принцип работы нового лавинного фотоприемника, содержащего кремниевую подложку, полупрозрачный для света титановый затвор, отделенный от полупроводника диэлектрическим слоем, и стоковый электрод, обеспечивающий поверхностный перенос умноженных носителей заряда вдоль границы раздела полупроводник–диэлектрик. Показана возможность создания многоэлементных лавинных фотоприемников, в том числе ПЗС-матрицы с внутренним усилением фотосигнала более чем в 10^4 раз.

Одним из перспективных направлений создания многоканальных и относительно дешевых лавинных фотоприемников является использование кремниевых МДП (металл–диэлектрик–полупроводник) [1,2] и МРП (металл–резистивный слой–полупроводник) структур [3,4] с локальной стабилизацией лавинного процесса.

В работах [5,6] предложен новый кремниевый лавинный фотоприемник, в котором используется более эффективный и технологический способ локальной стабилизации лавинного процесса. В данной статье впервые приводятся принцип работы и основные результаты испытания экспериментального образца лавинного фотоприемника.

Поперечное сечение предложенного лавинного фотоприемника представлено на рис. 1,а. В рабочем режиме к титановому затвору и охранному кольцу прикладываются отрицательные относительно подложки потенциалы, обеспечивающие развитие лавинного умножения носителей заряда в плоском p – n -переходе, где производится усиление фототока. После усиления носители заряда переносятся вдоль границы раздела Si–SiO₂ к охранному (стоковому) кольцу. Особенность работы данного фотоприемника в том, что характер лавинного процесса в нем определяется величиной поверхностной проводимости границы раздела Si–SiO₂. Толщина и концентрация примесей в полупроводниковом слое

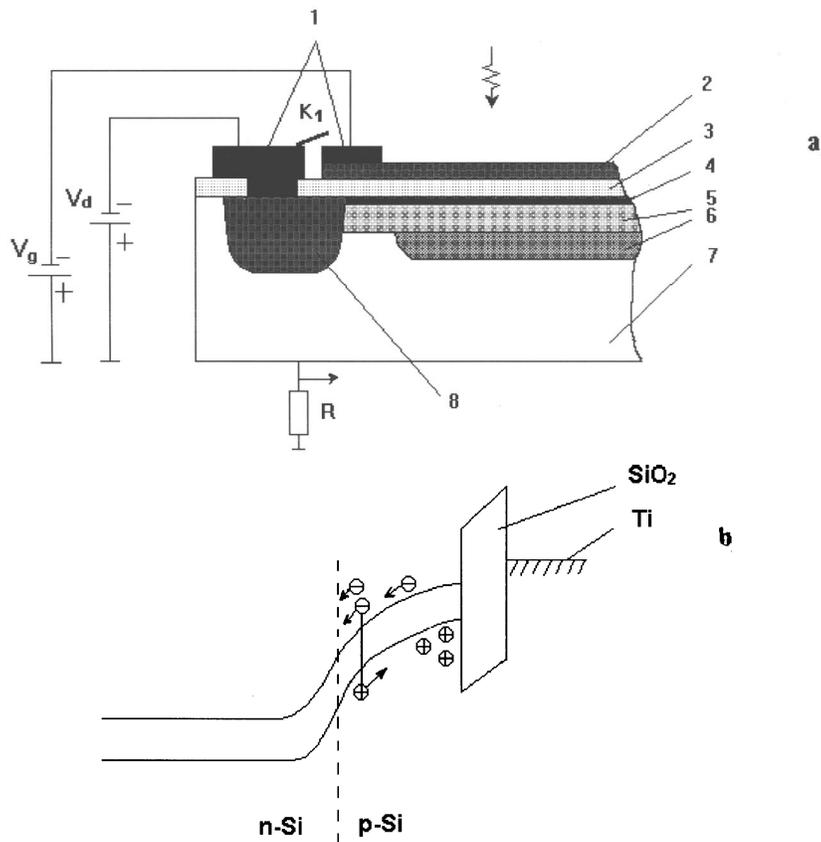


Рис. 1. Поперечное сечение (*a*) и энергетическая зонная диаграмма (*b*) лавинного фотоприемника: 1 — алюминиевые контакты; 2 — полупрозрачный титановый электрод (затвор); 3 — двуокись кремния; 4 — слой *p*-типа проводимости, обеспечивающий поверхностный перенос умноженных носителей заряда; 5 — кремниевый слой *p*-типа; 6 — кремниевый слой *n*-типа с повышенной по отношению к подложке концентрацией примесей; 7 — кремниевая подложка *n*-типа; 8 — стоковое кольцо.

p-типа проводимости выбирают так, чтобы при рабочем потенциале на фотоприемнике обедненная область достигла границы раздела Si-SiO₂ (рис. 1, *b*). В этом случае на границе Si-SiO₂ образуется сверхтонкий

слой p -типа проводимости толщиной ~ 10 nm, сопротивление которого определяется величиной потенциала затвора. Именно величина поверхностного сопротивления этого сверхтонкого слоя определяет эффективность локальной стабилизации лавинного процесса.

За время развития лавинного процесса, инициированного единичным электроном, основная часть вновь образованных дырок накапливается в небольшой области границы раздела Si-SiO₂ с характерным размером, сравнимым с толщиной обеднения плоского p - n -перехода (~ 3 μ m). Это приводит к локальному уменьшению электрического поля в соответствующей области p - n -перехода, в результате чего достигается режим самостабилизации темпа лавинного процесса. При этом фотоотклик формируется как ток смещения емкости диэлектрика.

На рис. 2, *a* представлен коэффициент усиления импульсного фототока M 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 составлял ~ 1 mm. Как показывают результаты испытания, при фиксированном потенциале на титановом затворе зависимость M от V_d всегда имеет область насыщения. Это связано с эффектом отсечки проводимости на границе Si-SiO₂, приводящему к ограничению стокового тока в приборе. Однако импульсная люкс-амперная характеристика фотоприемника при этом остается линейной благодаря низкому импедансу емкости подзатворного диэлектрика.

Наличие области насыщения в зависимости M от V_d указывает на уникальную возможность создания многоэлементных лавинных фотоприемников с высокой пространственной однородностью коэффициента усиления на основе вышеуказанной структуры.

Амплитудное распределение выходных импульсов лавинного фотоприемника при $V_d = V_g = -69$ V (ключ K_1 на рис. 1 замкнут) представлено на рис. 2, *b*. Измерения проводились в режиме стробирования сигнала при ширине окна ~ 100 ns. В качестве источника света использовался светодиод с длиной волны излучения ~ 480 nm. Длительность световых импульсов не превышала 70 ns. Для определения количества фотонов в импульсе светодиода использовался российский фотоэлектронный умножитель ФЭУ-130.

Кривая I на рис. 2, *b* иллюстрирует распределение выходных импульсов, инициированных темновыми электронами в лавинном фотоприемнике. Средний интервал между темновыми импульсами составлял

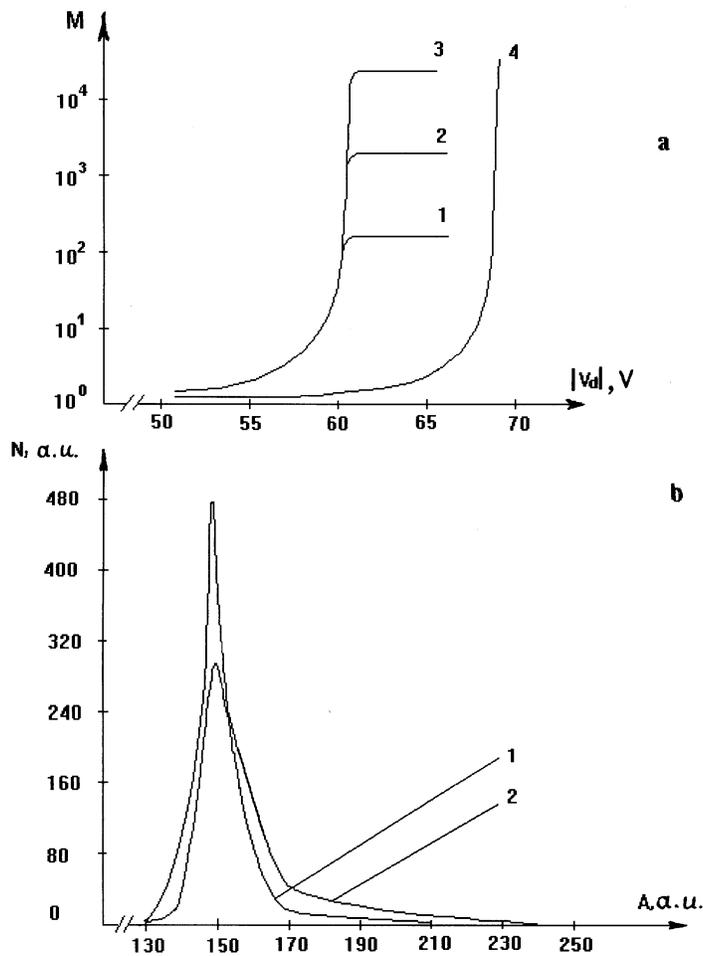


Рис. 2. Результаты испытания лавинного фотоприемника: *a* — зависимость коэффициента усиления фототока M от потенциала V_d стокового электрода: 1 — $V_d = -68.5$ V; 2 — $V_g = -69.0$ V; 3 — $V_g = -69.5$ V; 4 — $V_g = V_d$ (ключ K_1 — замкнут); *b* — амплитудное распределение выходных импульсов: 1 — без освещения, 2 — при среднем числе фотонов в импульсе, равном единице.

~ 200 ns. Кривая 2 измерена в условиях освещения лавинного фотоприемника световыми импульсами, содержащими в среднем 1 фотон. Видно, что если нижний порог регистрации принять равным амплитуде импульсов в 155-м канале, то вероятность регистрации однофотонных световых импульсов достигает $\sim 25\%$. В аналогичных условиях вероятность регистрации, полученная с помощью ФЭУ-130, не превышала величины $\sim 15\%$.

Существует другой режим работы предложенного лавинного фотоприемника. Как видно из рис. 1, конструкция и принцип работы лавинного фотоприемника представляют собой прототип нового ПЗС (прибор с зарядовой связью) с внутренним усилением фотосигнала. Используя трехфазные импульсные напряжения, например $V_g = -69.5$, -55 и -45 V ($V_d = -63$ V = const) для питания титанового затвора, нами экспериментально осуществлены регистрация, хранение и передача фотосигнала, инициированного единичным фотоэлектроном. Это стало возможным благодаря усилению фотосигнала больше, чем в 10^4 раз в момент подачи импульсного напряжения амплитудой $V_g = -69.5$ V на титановый затвор прибора.

Таким образом, разработан и испытан новый полупроводниковый лавинный фотоприемник, способный регистрировать единичные световые кванты при комнатной температуре. Показана возможность создания многоэлементных сверхчувствительных фотоприемников, в том числе ПЗС-матрицы, с высокой пространственной однородностью характеристик.

Список литературы

- [1] Гольбрайх Н.Н., Плотников А.Ф., Шубин В.Э. // Квантовая электроника. 1975. Т. 2. С. 2624–2627.
- [2] Вуль А.Я., Дидейкин А.Е., Косарев А.И. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. С. 15.
- [3] Гасанов А.Г., Садыгов З.Я. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 8. С. 706–709.
- [4] Sadygov Z.Y. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. V. 43. N 3. P. 1009–1013.
- [5] Садыгов З.Я. Лавинный фотоприемник. Патент России N 2086047, приоритет от 30.05.96.
- [6] Садыгов З.Я. Физические процессы в лавинных фотоприемниках на основе структуры кремний–широкозонный слой. Дис. на соис. . . . докт. физ-мат. наук. М.: МИФИ, 1997. С. 137.