

**Использование быстродействующих фотоуправляемых  
полупроводниковых переключателей в интегральных микросхемах**

**В.К.Киселев<sup>1</sup>, Г.Н.Семьин, А.Н.Труфанов**

*НИИ Измерительных систем им. Ю.Е.Седакова  
Нижний Новгород 603950, ГСП-486, Россия*

**С.В.Оболенский<sup>2</sup>**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского  
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия*

Рассмотрены преимущества использования и возможности создания интегральных схем, в которых фотопереключатель и схема обработки электрического сигнала расположены на одном кристалле. Приводятся результаты исследования характеристик фотоуправляемого полупроводникового переключателя со схемой обработки на основе ПТШ на подложке из GaAs.

Целесообразность и актуальность разработки фотопереключателей, управляемых оптическим излучением, передаваемым по оптическому волокну, обуславливаются целым рядом их преимуществ перед электрически управляемыми переключателями, например:

- невосприимчивостью к воздействию электромагнитных помех любой интенсивности;
- отсутствием собственного электромагнитного излучения в диапазоне радио- и промышленных частот;
- гальванической развязкой от электрических сетей и от электрических зарядов;
- отсутствием токов утечки;
- отсутствием потребности в заземлении и т.д.

Фотоуправляемый полупроводниковый переключатель (ФУПП) отличается от обычных фотосопротивлений и фотодиодов тем, что оба его контакта являются барьерными, а не омическими. Работа ФУПП инициируется световым импульсом благодаря поверхностной фотоионизации.

В последнее время наблюдается интерес к ИС, содержащим фотопереключатель и схему обработки электрического сигнала. Например, в [1] исследованы фотоэлектрические свойства поликристаллического кремния и разработаны микроэлектронные фотопреобразователи ближнего ИК-диапазона с ключевым и линейными выходами. Так называемый "интегральный фотопреобразователь" представлял собой ИС, содержащую фоточувствительную пленку поликристаллического кремния и схему усиления и обработки фотосигнала с логическим или линейным выходом. При работе в режиме оптронного ключа совместно с фотодиодом АЛ107 с

<sup>1</sup> Тел.: +7-8312-666130;

<sup>2</sup> Тел.: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru

длиной волны излучения 0,92 мкм, форма выходного сигнала сохранялась неизменной до частоты 220 кГц.

Большой интерес представляет монолитная интеграция электронных и фотонных устройств на одном кристалле. Интегральная оптоэлектроника способна значительно ускорить процесс усложнения и совершенствования как существующих, так и перспективных фотонных систем. В ней фотонные компоненты (например, фотодиоды) и функциональные электронные схемы реализуются на одном кристалле. Именно благодаря такому объединению этих, в корне различных, функций в ИС получается выигрыш по сравнению с использованием отдельных устройств в одной сборке. Доказано, что высокочувствительные приемники могут быть изготовлены только путем монолитной интеграции [2].

Наиболее интенсивно исследования в области монолитной оптоэлектронной интеграции проводятся в Японии. Например, в [3] описан прибор, в котором фотодетектор со структурой “металл–полупроводник–металл”, состоящий из двух встречно включенных диодов Шоттки, интегрируется с электронной схемой, выполненной по технологии полевых транзисторов с затворами Шоттки. Приемник обеспечивал передачу информации со скоростью до 1,5 Гбит/с.

В [4] описана микросхема, удовлетворяющая техническим требованиям для работы в сетях стандарта Gigabit Ethernet. В ней монолитно объединены фотоприемник “металл–полупроводник–металл” и трансимпедансный усилитель на основе полевых транзисторов Шоттки. В этой микросхеме удалось реализовать полосу пропускания 1200 МГц.

Поскольку работа ФУПП инициируется с помощью светового импульса, подвального по оптическому волокну, эти переключатели можно использовать в условиях действия дестабилизирующих факторов (например, электромагнитных возмущений) и пожаро-взрывоопасной обстановке. В этой статье рассмотрена работа ФУПП и последующей схемы обработки сигнала на одном кристалле в условиях дестабилизирующего воздействия гамма-излучения.

В качестве схемы обработки был использован усилитель на основе полевого транзистора с затвором Шоттки (ПТШ), который, благодаря малому времени переключения, составляющему единицы пикосекунд, широко применяется в СВЧ устройствах.

ИС фотопереключателя (рис.1) в этом случае включала в себя:

- ФУПП (фотодетектор на основе структуры “металл–полупроводник–металл”);
- коммутируемый элемент (нормально закрытый полевой транзистор с затвором Шоттки);
- балансные сопротивления.

Нагрузка представляла собой резистор 10 кОм, подключенный последовательно с разделительной емкостью 0,068 мкФ.

ФУПП реализован в виде встречно–штыревой структуры, общей шириной 20мм и зазором между штырями 20мкм. Вольтамперные характеристики ФУПП при отсутствии освещения и при освещении световым потоком мощностью 40 мВт и длиной волны 0,85 мкм представлены на рис.2.

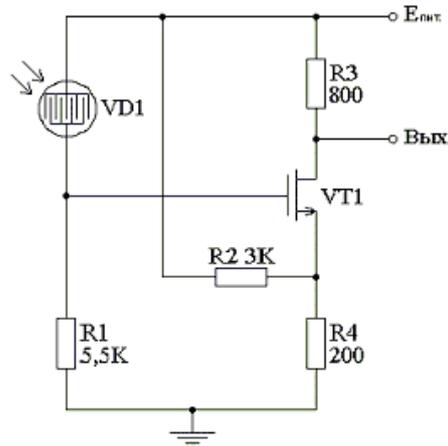


Рис.1  
Принципиальная схема фотопереклюателя

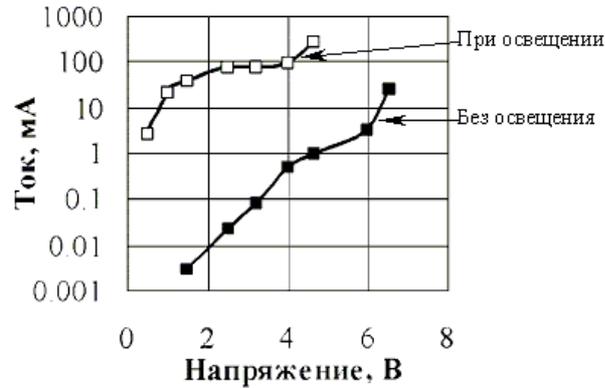


Рис.2  
Вольтамперные характеристики ФУПП для случая отсутствия освещения и при освещении световым потоком мощностью 40 мВт и длиной волны 0,85 мкм

ПТШ имеет длину затвора 0,7 мкм, общую ширину затвора 1000 мкм, расстояние от истока до стока по срезу  $p^+$ -слоя – 3 мкм, толщину активного слоя под затвором – 0,12...0,15 мкм, уровень легирования активного слоя  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , подложки –  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Благодаря сильному легированию канала ПТШ может быть использован в

качестве коммутируемого элемента без дополнительного затеняющего экрана. Экспериментально установлено, что относительное изменение тока стока и коэффициента усиления по мощности не превышают 3% при освещении светодиодом мощностью 40 мВт.

Для обеспечения устойчивого лавинного режима структура ФУПП была предварительно облучена протонами с энергией 20 кэВ и дозой 0,3 мкКл. Разброс напряжений пробоя структур, до облучения составлявший около 20%, уменьшился до 5–10%. Облучение потоком протонов приводит к выравниванию концентраций носителей заряда и дефектов на поверхности, более равномерному распределению токов в пробивном промежутке и ликвидации поверхностных каналов пробоя.

Описанная выше ИС была испытана на стойкость к воздействию дестабилизирующего влияния гамма-излучения. Испытания проводились в 2 этапа. На первом этапе на ИС подавалось импульсное питание и импульсный оптический сигнал с частотой следования импульсов примерно в 10 раз выше частоты питания (рис.3). Вершина импульса модулирована оптическим сигналом, формируемым ФУПП и подаваемым на затвор ПТШ. Такой режим позволил выявить два характерных временных масштаба влияния рентгеновского облучения на ИС. Импульс рентгеновского облучения открывает транзистор и вызывает существенное изменение напряжения на сопротивлении нагрузки. Импульс фототока, вызванный рентгеновским облучением ФУПП, имел длительность менее 100 нс, в то время как длительность релаксационных процессов в транзисторе составляла 3–8 мкс, что объясняется перезарядкой глубоких ловушечных центров в запрещенной зоне GaAs. Тем не менее, оптический сигнал удовлетворительно детектировался ФУПП и усиливался ПТШ (рис.3), а релаксационные процессы влияли лишь на постоянную составляющую сигнала.

На втором этапе исследований импульсное питание на транзистор и оптический сигнал на ФУПП не подавались. Было приложено только постоянное напряжение на транзистор. Регистрировались фототоки транзистора и ФУПП (рис.4). Амплитуда мощной СВЧ наводки, возникающей при запуске импульсного рентгеновского генератора, быстро спадала и не влияла на форму полезного сигнала. Таким образом, ИС устойчива к дестабилизирующему воздействию мощных СВЧ полей.

Аналогично первому этапу в данном случае регистрировались фототоки ФУПП и ПТШ. Релаксационный ток транзистора (рис.4) может быть аппроксимирован суммой двух экспоненциальных зависимостей

$$I(t) = I_0 + A_1 \exp(B_1 t) + A_2 \exp(B_2 t),$$

где  $I_0$  – стационарное значение тока,  $A_1$  и  $A_2$  – константы, пропорциональные концентрации отрицательных и положительных зарядов в подзатворной области транзистора, возникающих из-за радиационного воздействия,  $B_1$  и  $B_2$  – скорости релаксации отрицательных и положительных зарядов. Расчеты, проведенные по модели, представленной в [5], показали, что концентрация центров, заряжающихся при радиационном воздействии отрицательно, составляет  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а положительно –  $1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Скорость релаксации отрицательно заряженных центров в 4 раза боль-

ше скорости релаксации положительных, что говорит о большей глубине залегания их уровней в запрещенной зоне GaAs.

Из рассмотренных результатов следует, что время восстановления работоспособности для ИС ФУПП-ПТШ составляет около 100 нс. Длительная релаксация тока транзистора вызвана, по-видимому, перезарядкой глубоких уровней ловушечных центров в запрещенной зоне GaAs, и может быть компенсирована схемотехническим путем.



Рис.3

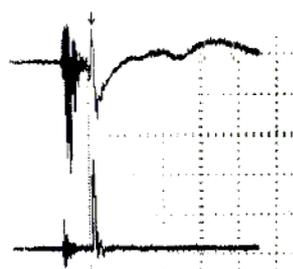


Рис.4

Сигнал с регистратора ионизирующего излучения (верхний луч) и напряжение на нагрузке ПТШ (нижний луч) при импульсном питании и воздействии импульсно-управляющего оптического сигнала при одновременном облучении рентгеновскими квантами (верхний луч – 200 мВ/кл, нижний луч – 200 мВ/кл, развертка – 500 нс/кл)

Напряжение на нагрузке ПТШ (верхний луч) и напряжение на ФУПП нижний луч) при подаче постоянного напряжения на ПТШ при одновременном облучении рентгеновскими квантами (верхний луч – 500 В/кл, нижний луч – 200 мВ/кл, развертка – 250 нс/кл). Стрелкой указан момент воздействия излучения. Высокочастотная наводка до момента излучения обусловлена электромагнитным полем рентгеновской установки

#### *Выводы*

Таким образом, возможно создание ИС, в которых фотоуправляемый полупроводниковый переключатель монолитно объединяется со схемой обработки на полевых транзисторах Шоттки на основе отечественной элементной базы.

Благодаря сильному легированию канала, ПТШ могут быть использованы в ИС без дополнительного затеняющего экрана.

Экспериментальная ИС ФУПП-ПТШ показала свою стойкость к воздействию дестабилизирующего влияния гамма-излучения. Время восстановления работоспособности для ИС ФУПП-ПТШ составляет около 100 нс. Длительная релаксация тока транзистора может быть компенсирована схемотехническим путем.

*Литература*

- [1] Агаев Ф.Г. Кремниевые микроэлектронные фотоприемники ближнего ИК-диапазона // Известия вузов. Электроника. 2001. №5. С.68–71.
- [2] Форрест С.Р. Оптоэлектронные интегральные схемы // ТИИЭР. 1987. Т.75, №11. С.55–66.
- [3] Wada O., Hamaguchi H., Makiuchi, Kumai T., Ito M., Nakai K., Horimatsu T., Sakurai T. Monolithic four-channel photodiode/amplifier receiver array integrated on GaAs substrate // J. Lightwave Technol. 1986. V.LT-4. P.1964.
- [4] Jayakumar A., Bustos M., Cheskis D., Pietrucha S., Bonelli M., Al-Kuran S., Schemberg N. 3-V MSM-TIA for Gigabit Ethernet // IEEE J. Solid State Circuits. 2000. V.35, №9. P.1271–1274.
- [5] Оболенский С.В., Павлов Г.П. Влияние нейтронного и космического излучения на характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки // ФТП. 1995. Т.29, №3. С.413–420.

**Use of high-speed photo-controlled semiconductor switches in integrated circuits<sup>\*)</sup>**

**V.K.Kiselev<sup>1)</sup>, G.N.Sem'in, A.N.Trufanov**

*Measuring Systems Research Institute named after Yu.Ye. Sedakov  
Nizhni Novgorod, 603950, GSP - 486, Russia*

**S.V.Obolensky<sup>2)</sup>**

*Nizhni Novgorod State University, Gagarin Avenue 23, Nizhni Novgorod 603950, Russia*

Advantages of use and opportunity of creation of integrated circuits in which the photo switch and the circuit of processing of an electric signal are located on one crystal are considered. Results of research of characteristics of the photo-controlled semiconductor switch with the circuit of processing on Schottky-barrier FET basis on a substrate from GaAs are resulted.

---

<sup>\*)</sup> Proc. NATO Project SfP-973799 Semiconductors 2nd Workshop. Nizhni Novgorod, 2002

<sup>1)</sup> Phone: +7-8312-666130

<sup>2)</sup> Phone: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru