

УДК 521.383.523

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ В РЕЖИМЕ ОДНОКВАНТОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ

И.Р. ГУЛАКОВ<sup>1</sup>, В.Л. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, А.О. ЗЕНЕВИЧ<sup>2</sup>, Е.В. НОВИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
пр. Ф. Скорины, 4, Минск, 220070, Беларусь

<sup>2</sup>Высший государственный колледж связи  
Староборисовский тракт, 8, к. 2, Минск, 220114, Беларусь

Поступила в редакцию 29 апреля 2003

Представлены результаты исследований температурных зависимостей отношения сигнал/шум, скорости счета темновых и сигнальных импульсов для кремниевых фотоприемников, работающих в режиме одноквантовой регистрации. Показано, в какой степени снижение температуры увеличивает отношение сигнал/шум и квантовую эффективность регистрации и уменьшает последовательное сопротивление микроплазменного пробоя и скорость счета темновых импульсов.

*Ключевые слова:* лавинный фотоприемник, микроплазменный пробой, одноквантовая регистрация.

### Введение

В настоящее время для одноквантовой регистрации оптического излучения в ближней инфракрасной области спектра все чаще используются такие кремниевые фотоприемники, как лавинные фотодиоды (ЛФД) и фотоприемники со структурой металл–резистивный слой–полупроводник (МРП). Они приходят на смену традиционно используемым для этих целей фотозлектронным умножителям, так как имеют более высокую квантовую эффективность регистрации, низкое напряжение питания, менее хрупки и имеют большую чувствительность при регистрации оптического излучения в ближней инфракрасной области спектра [1].

Однако зависимости характеристик кремниевых лавинных фотоприемников, работающих в режиме одноквантовой регистрации от температуры, исследованы недостаточно полно, что и определило цель данной работы. В качестве объектов исследования были выбраны серийно выпускаемые кремниевые лавинные фотодиоды ФД-115Л, лавинные фотодиоды со структурой  $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$  и МРП-структуры.

### Методика исследования

Исследования проводились на установке, состав которой отражает представленная на рис. 1 структурная схема, для интервала температур от 293 до 263 К. Такой интервал определяет типичный рабочий диапазон для измерительных приборов на основе фотоприемников рассматриваемого класса. Для поддержания требуемого температурного режима использовался термоэлектронный холодильник на основе эффекта Пельтье. Лавинные фотоприемники включались по схеме пассивного гашения [2], т. е. последовательно с сопротивлением нагрузки  $R_n$

(рис. 1). Напряжение питания  $U_n$  фотоприемника, задаваемое источником И1, выбиралось близким к напряжению пробоя  $U_{пр}$  фотоприемника. В процессе измерений напряжение питания фотоприемника и ток через фотоструктуру контролировались соответственно цифровым вольтметром В1 и амперметром А. Импульсы фотоприемника, выделенные на сопротивлении нагрузки  $R_n$ , поступают на вход усилителя У с коэффициентом усиления 20, а затем на вход амплитудного дискриминатора Д. Порог амплитудной дискриминации темновых и сигнальных импульсов устанавливался непосредственно над уровнем собственных шумов усилителя.

В процессе проводимых измерений величина порога оставалась постоянной и контролировалась при помощи цифрового вольтметра В2. Выделенные дискриминатором импульсы регистрировались частотомером Ч, фиксирующим их скорость счета с усреднением по времени.

Фотоприемник помещался в термоэлектрический холодильник. Оптическое излучение с длиной волны 0,68 мкм подводилось к фотоприемнику через оптическое волокно ОВ. В качестве источника излучения использовался светодиод СД марки АЛ307А.

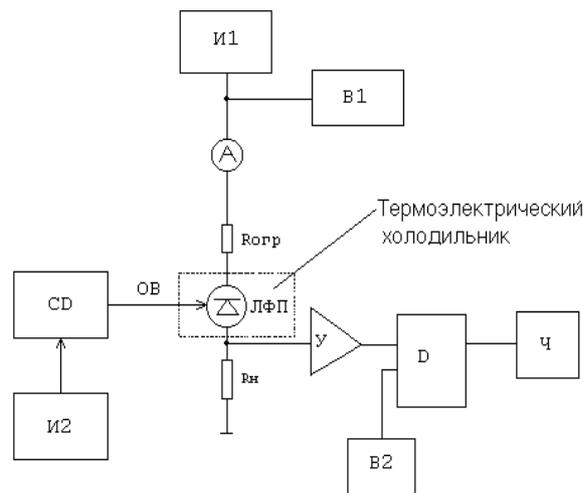


Рис. 1. Структурная схема установки:  $R_n$  — сопротивление нагрузки; У — усилитель импульсов; Д — дискриминатор; В1, 2 — вольтметры; Ч — частотомер;  $R_{огр}$  — ограничивающий резистор; И1, 2 — источники питания фотоприемника и светодиода; А — амперметр; ЛФП — лавинный фотоприемник; СД — светодиод; ОВ — оптическое волокно

При напряжениях питания, близких и превышающих  $U_{пр}$ , через фотоприемник протекает ток в виде импульсов. Эти импульсы тока обусловлены возникновением локальных каналов пробоя фотоструктуры — микроплазм [3]. Микроплазменный характер пробоя является следствием неоднородности электрического поля в реальной полупроводниковой структуре. Микроплазменные импульсы могут инициироваться фото- и термогенерированными носителями заряда. Определения напряжения  $U_{пр}$  проводилось по вольтамперной характеристике фотоприемника в области пробоя в соответствии с методикой, предложенной в работе [3]. Основные результаты проведенных исследований представлены на рис. 2–4.

### Результаты и их обсуждение

Анализ зависимости напряжения пробоя от температуры показал, что с уменьшением температуры  $U_{пр}$  уменьшается по линейному закону. При этом отношение  $\Delta U_{пр}/\Delta T$  (изменения напряжения пробоя  $\Delta U_{пр}$  к изменению температуры  $\Delta T$ ) отличается для различных типов фотоприемников. Наибольшую зависимость от температуры имели ЛФД со структурой  $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ , для которых  $\Delta U_{пр}/\Delta T=0,6\text{--}0,7$  В/К.

Для ФД-115Л и МРП-структур отношения  $\Delta U_{пр}/\Delta T$  имели достаточно близкие значения, составляли соответственно 0,05–0,06 В/К и 0,06–0,07 В/К. Согласно [4], зависимость напряжения пробоя  $p\text{-}n$ -перехода от температуры определяется концентрацией ионизированных приме-

сей в слаболегированной области. Наименьшую концентрацию среди исследуемых фотоприемников имеет структура  $n^+p\pi p^+$ , поэтому для нее и наблюдается более сильная зависимость напряжения питания от температуры. Анализ данных показывает, что для структур типа  $n^+p\pi p^+$  по сравнению с ФД-115Л и МРП-структурами необходимо предъявлять на порядок более высокие требования по температурной стабилизации режима работы.

Одной из основных характеристик микроплазменного пробоя является его последовательное сопротивление  $R_s$  [3]. Поэтому в работе выполнены исследования зависимости  $R_s$  от температуры. Определение последовательного сопротивления микроплазменного пробоя проводилось по линейному участку вольтамперной характеристики фотоприемника в области пробоя [3]. Наблюдается увеличение последовательного сопротивления микроплазменного пробоя с уменьшением температуры. Это связано с тем, что  $R_s$  зависит от удельного сопротивления полупроводника, которое и имеет тенденцию к увеличению в данной ситуации.

Наименьшее значение  $R_s$  имеют ФД-115Л, для которых оно составляет приблизительно  $1,5 \cdot 10^5$  Ом и от температуры практически не зависит в рассмотренном температурном диапазоне. Фотоприемники со структурами  $n^+p\pi p^+$  и МРП отличаются более высокими значениями последовательного сопротивления:

для МРП при  $T=293$  К  $R_s=4,0 \cdot 10^5$  Ом, при  $T=263$  К  $R_s=1,5 \cdot 10^6$  Ом;

для  $n^+p\pi p^+$  при  $T=293$  К  $R_s=3,0 \cdot 10^5$  Ом, при  $T=263$  К  $R_s=1,8 \cdot 10^6$  Ом.

Такое различие в величине последовательных сопротивлений связано, по всей видимости, с различной структурой фотоприемников. Проводились исследования зависимости скорости счета темновых и сигнальных импульсов от температуры при различном превышении  $\Delta U = U_{\text{п}} - U_{\text{пр}}$  напряжением питания напряжения пробоя. Было получено, что с понижением температуры уменьшается скорость счета темновых импульсов в фотоприемниках (рис. 2). Это обусловлено уменьшением числа термогенерированных носителей заряда. Среднее значение  $\Delta N_m / \Delta U_{\text{п}}$  ( $\Delta N_m$  — изменение скорости счета темновых импульсов,  $\Delta U_{\text{п}}$  — изменение напряжения питания фотоприемника) составляло:

для ФД-115Л:  $6,5 \cdot 10^5 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $T=293$  К,  $4,6 \cdot 10^5 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $T=263$  К;

для  $n^+p\pi p^+$ :  $1,5 \cdot 10^4 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $T=293$  К,  $3,7 \cdot 10^3 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $T=263$  К;

для МРП-структуры:  $2,0 \cdot 10^4 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $T=293$  К,  $1,3 \cdot 10^3 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  при  $T=263$  К.

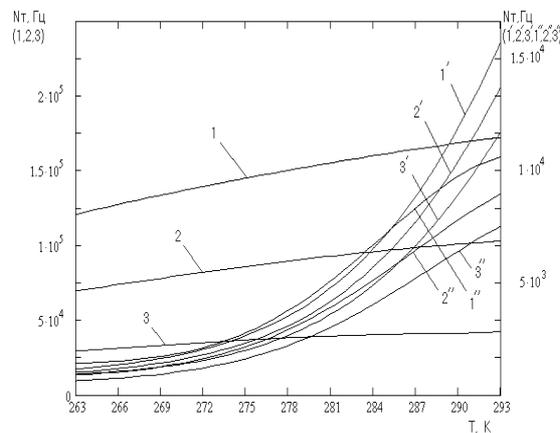


Рис. 2. Зависимости скорости счета темновых импульсов от температуры: 1, 1', 1'' —  $\Delta U=0,2$  В; 2, 2', 2'' —  $\Delta U=0,1$  В; 3, 3', 3'' —  $\Delta U=0,0$  В для ФД-115Л, для МРП и для  $n^+p\pi p^+$  структур

Таким образом, снижение температуры уменьшает зависимость скорости счета темновых импульсов от  $\Delta U$  для всех типов фотоприемников, но наиболее заметно это проявляется для МРП и  $n^+p\pi p^+$ -структур.

При охлаждении фотоприемников увеличивается их квантовая эффективность регистрации, о чем свидетельствуют представленные на рис. 3 результаты измерения скорости счета сигнальных импульсов от температуры. Измерения проводились при слабой постоянной засветке, обеспечивающей регистрацию микроплазменных импульсов на выходе лавинных фото-

приемников, инициированных отдельными фотонами. Как видно из рис. 3, понижение температуры и повышение  $\Delta U$  приводят к росту квантовой эффективности регистрации. Это связано с увеличением объема микроплазменного пробоя за счет роста толщины обедненного слоя при уменьшении температуры [3]. Среднее значение роста квантовой эффективности регистрации в данном температурном диапазоне для ФД-115Л составляло 2,9, для  $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$  — 1,5, для МРП-структуры — 1,6 (данные приведены при  $\Delta U=0,10$ ).

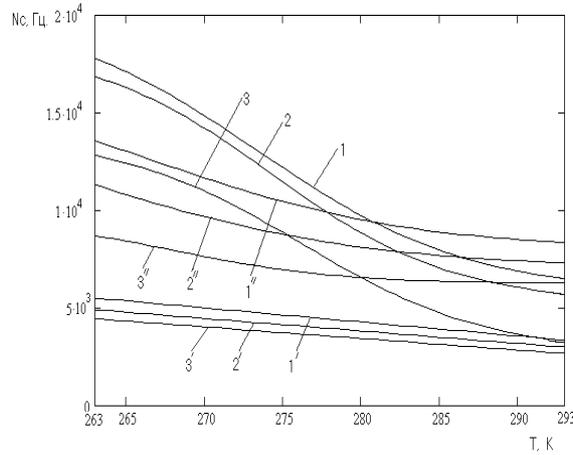


Рис. 3. Зависимости скорости счета сигнальных импульсов от температуры: 1, 1', 1'' —  $\Delta U=0,2$  В; 2, 2', 2'' —  $\Delta U=0,1$  В; 3, 3', 3'' —  $\Delta U=0,0$  В для ФД-115Л, для МРП и для  $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$  структур

С понижением температуры увеличивается зависимость квантовой эффективности от напряжения питания. Среднее значение  $\Delta N_c/\Delta U_n$  ( $\Delta N_c$  — изменение скорости счета сигнальных импульсов) составляло:

для ФД-115Л:  $1,6 \cdot 10^4 \text{ В}^{-1}\text{с}^{-1}$  при  $T=293 \text{ К}$ ,  $2,5 \cdot 10^4 \text{ В}^{-1}\text{с}^{-1}$  при  $T=263 \text{ К}$ ,

для  $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ :  $1,0 \cdot 10^4 \text{ В}^{-1}\text{с}^{-1}$  при  $T=293 \text{ К}$ ,  $2,5 \cdot 10^4 \text{ В}^{-1}\text{с}^{-1}$  при  $T=263 \text{ К}$ ,

для МРП-структуры:  $3,4 \cdot 10^3 \text{ В}^{-1}\text{с}^{-1}$  при  $T=293 \text{ К}$ ,  $5,0 \cdot 10^3 \text{ В}^{-1}\text{с}^{-1}$  при  $T=263 \text{ К}$ .

В отличие от  $\Delta N_m/\Delta U_n$  отношение  $\Delta N_c/\Delta U_n$  увеличивается с понижением температуры.

Из полученных оценок отношений  $\Delta N_m/\Delta U_n$  и  $\Delta N_c/\Delta U_n$  для различных температур можно сделать вывод о том, что эти характеристики зависят от концентрации свободных носителей заряда в  $p\text{-}n$ -переходе. Уменьшение числа свободных носителей приводит к уменьшению этих отношений. При понижении температуры становится меньше свободных носителей заряда в  $p\text{-}n$ -переходе, о чем свидетельствует снижение скорости счета темновых импульсов и при этом уменьшается  $\Delta N_m/\Delta U_n$ . Уменьшение температуры приводит к росту квантовой эффективности регистрации фотоприемников, что влечет увеличение числа фотогенерированных носителей заряда и приводит к увеличению  $\Delta N_c/\Delta U_n$ .

Более полную информацию о поведении лавинных фотоприемников в режиме одноквантовой регистрации при изменении температуры можно получить после анализа зависимостей отношения сигнал/шум  $\rho$  от температуры, показанных на рис. 4.

Соотношение  $\rho$  зависит от скорости счета темновых  $N_T$  и сигнальных импульсов  $N_c$  и для фотоприемников, работающих в режиме одноквантовой регистрации, определяется как

$$\rho = N_c \left( \sqrt{t/N_c + 2N_T} \right),$$

где  $t$  — время измерения.

Измерения отношения сигнал/шум проводились для  $t=1$  с.

Уменьшение температуры приводит к увеличению отношения  $\rho$  для всех типов фотоприемников. Для ФД-115Л максимум отношения сигнал/шум наблюдается при напряжении питания, достаточно близком к напряжению пробоя. Поэтому значение  $\rho$  уменьшается, когда напряжение питания превышает напряжение пробоя. Для фотоприемников других типов (МРП и  $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ ) максимум отношения сигнал/шум соответствует более высоким значениям

$\Delta U=0,2-0,3$  В. Для ФД-115Л с уменьшением температуры изменение  $\Delta U_{\text{п}}$  заметнее влияет на  $\rho$ . Так для них среднее значение  $\Delta\rho/\Delta U_{\text{п}}$  составляет 5,5 при 293 К и 64,5 при 263 К. Для  $n^+-p-\pi-p^+$   $\Delta\rho/\Delta U_{\text{п}}=26,0$  при 293 К и 95,5 при 263 К, для МРП-структуры  $\Delta\rho/\Delta U_{\text{п}}=7,5$  при 293 К и 30,0 при 263 К. Поэтому для ФД-115Л при охлаждении необходимо повышать требования к стабильности напряжения источника питания фотоприемника. Вместе с тем при низких температурах это необходимо и для других типов структур.

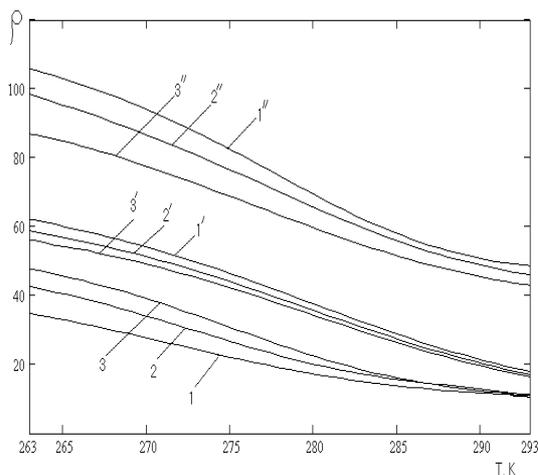


Рис. 4. Зависимости отношения сигнал/шум от температуры: 1, 1', 1'' —  $\Delta U=0,2$  В; 2, 2', 2'' —  $\Delta U=0,1$  В; 3, 3', 3'' —  $\Delta U=0,0$  В для ФД-115Л, для МРП и для  $n^+-p-\pi-p^+$  структур

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках темы № Т02М-085 "Исследование фотоэлектрических процессов, влияющих на быстродействие кремниевых лавинных фотодиодов в режиме одноквантовой регистрации".

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией Института электроники НАН Беларуси В.Б. Залескому за предоставленные для исследования экземпляры фотоприемников и обсуждение результатов.

## TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTO DETECTORS IN A SINGLE-PHOTON-COUNTING MODE

I.R. GULAKOV, V.L. KOZLOV, A.O. ZENEVICH, E.V. NOVIKOV

### Abstract

The results of investigations of temperature dependencies ratio of signal/noise, dark-counting and photon-counting for silicon photodiodes in a single-photon-counting mode, were introduced. It was demonstrated how the ratio of signal/noise, quantum efficiency, consistent resistance of microplasma breakdown dark-counting depends on a variation of temperatures.

### Литература

1. Гулаков И.Р., Холондырев С.В. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях. Мн., 1989.
2. Brown R.G.W., Ridley K.D., Rarity J.G. // Appl. Opt. 1986. Vol. 25, № 22. P. 4122–4126.
3. Грехов И.В., Серезжин Ю.Н. Лавинный пробой  $p-n$ -перехода в полупроводниках. Л., 1980.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984.