

УДК 521.383.523

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОДНОКВАНТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЛАВИННЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ**

И.Р. ГУЛАКОВ, В.Л. КОЗЛОВ А.О. ЗЕНЕВИЧ

*Белорусский государственный университет
пр. Ф. Скорины, 4, Минск, 220070, Беларусь;**Высший государственный колледж связи
Староборисовский тракт, 8, к. 2, Минск, 220114, Беларусь**Поступила в редакцию 4 мая 2004*

В работе проведены исследования зависимости амплитудных распределений одноквантовых импульсов кремниевых лавинных фотоприемников от температуры, интенсивности и спектрального состава регистрируемого оптического излучения. Получено, что понижение температуры приводит к увеличению вероятности образования импульсов с большей амплитудой и вероятности регистрации импульса на выходе фотоприемника, определены коэффициенты зависимости средней амплитуды одноквантовых импульсов от температуры.

Ключевые слова: лавинный фотоприемник, одноквантовая регистрация, микроплазменный пробой, амплитудное распределение импульсов, вероятность регистрации импульса.

Введение

Метод одноквантовой регистрации находит широкое применение в оптике, оптической связи, квантовой криптографии и других областях науки и техники [1]. Для реализации одноквантовой регистрации наиболее часто используются фотоэлектронные умножители, лавинные фотодиоды (ЛФД) и фотоприемники со структурами металл–диэлектрик–полупроводник, металл–резистивный слой–полупроводник (МРП). Однако фотоэлектронные умножители обладают рядом недостатков, присущих вакуумным фотоприемникам, и имеют малую чувствительность в ближней ИК-области спектра. Фотоприемники со структурой металл–диэлектрик–полупроводник требуют переменного напряжения питания, что порой затрудняет их использование. Этим недостатком лишены лавинные фотодиоды и фотоприемники с МРП структурой.

Необходимо отметить, что влияние температуры на одноквантовые характеристики ЛФД и МРП структур изучено недостаточно. Поэтому были проведены исследования характеристики ЛФД и МРП структур в температурном диапазоне от 260 до 293 К. Именно при таких температурах наиболее часто эксплуатируются фотоприемники. Получение таких температур и термостабилизация работы фотоприемника является достаточно простой технической задачей, для решения которой могут быть использованы термоэлектрические холодильники на эффекте Пельтье.

Методика исследования

В качестве объектов исследования были выбраны кремниевые фотодетекторы, такие как лавинные фотодиоды серийного производства ФД-115Л, лавинные фотодиоды $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ типа и фотоприемники с МРП структурой.

Для реализации одноквантовой регистрации использовалась схема пассивного гашения электронной лавины [1]. Напряжения питания ЛФД и МРП структур выбирались такие, чтобы падение напряжения на фотоприемнике было близким или превышало напряжение пробоя $U_{пр}$ фотоприемника. В таком состоянии с низким значением проходящего через него тока диод остается до тех пор, пока в обедненный слой не войдет носитель заряда и не инициирует лавинный процесс. В этом случае происходит микроплазменный пробой $p\text{-}n\text{-}$ перехода (МП), и через ЛФД потечет ток. В результате падения напряжения на сопротивлении нагрузки напряжение смещения ЛФД становится меньше $U_{пр}$, после чего микроплазма, которая представляет собой локальный канал лавинного умножения носителей заряда, гасится. Поскольку напряжения $U_{пр}$ для каждого типа исследуемых фотоприемников достаточно сильно отличались, то для их сравнения использовалась величина превышения напряжением питания $U_{пит}$ напряжения пробоя $p\text{-}n\text{-}$ перехода, т.е. $\Delta U = U_{пит} - U_{пр}$. Величина $U_{пр}$ определялась по обратной ветви вольт-амперной характеристики фотоприемника по методике, описанной в работе [2].

В эксперименте по исследованию амплитудного распределения одноквантовых импульсов (АРИ) скорости счета импульсов изменяли для ФД-115Л и $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ от 10^2 с^{-1} до $5 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$, а для МРП — от 10^2 с^{-1} до $5 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$. Эти скорости счета соответствовали линейному участку зависимости между интенсивностью засветки фотоприемника и скоростью счета сигнальных импульсов. Поэтому в данных диапазонах скоростей счета влиянием "мертвого времени" фотоприемников и системы регистрации на одноквантовые характеристики можно пренебречь.

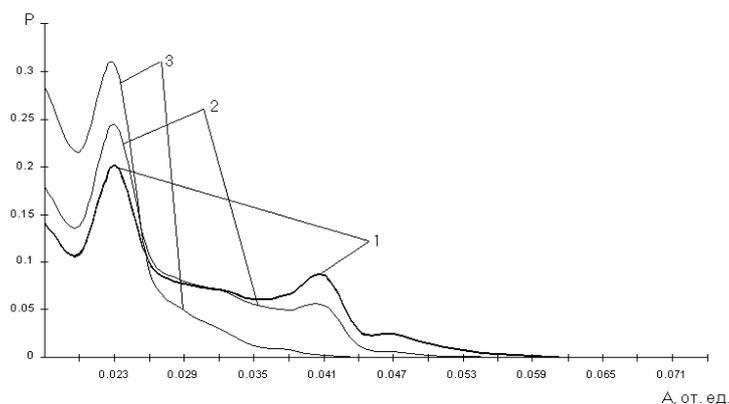
Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования зависимости амплитудных распределений темновых импульсов фотоприемников от температуры в режиме счета фотонов представлены на рис. 1. При понижении температуры для всех типов исследуемых фотоприемников наблюдалось увеличение вероятности образования импульсов с большими амплитудами и уменьшение вероятности образования импульсов с небольшими амплитудами. Это можно объяснить тем, что при понижении температуры увеличиваются коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок [3], что приводит к росту коэффициента умножения носителей заряда. Форма АРИ зависит как от температуры, так и от структуры фотоприемника.

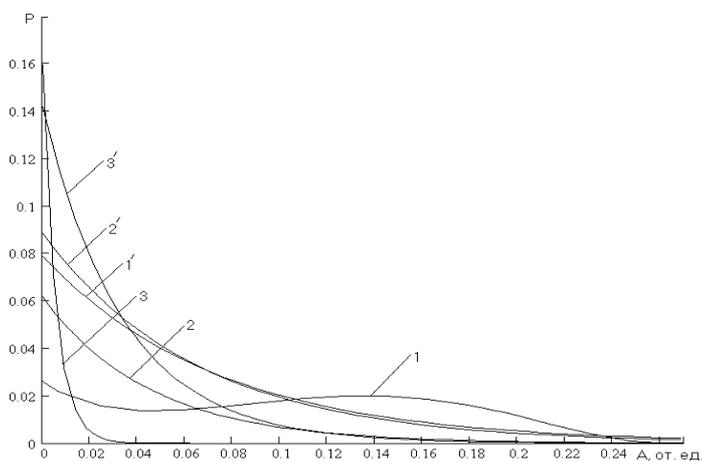
Из рис. 1,а видно, что для ЛФД ФД-115Л наблюдались несколько пиков на амплитудном распределении, которые, по всей видимости, обусловлены достаточно большим отличием напряжения пробоя для разных каналов МП $U^{мп}_i$. При понижении температуры происходит увеличение вероятности возникновения МП в одном из каналов и уменьшение в другом (рис. 1,а). Такое изменение можно объяснить тем, что каждый из микроплазменных каналов имеет свое напряжение пробоя $U^{мп}_i$ и его зависимость от температуры. Поэтому при понижении температуры наблюдается увеличение ΔU_i превышения напряжением питания ЛФД $U^{мп}_i$ для одной микроплазмы и уменьшение для другой. Согласно [2], с увеличением ΔU_i растет вероятность образования МП, что и приводит к изменению АРИ при понижении температуры. Как видно из рис. 1, АРИ сильно отличаются для различных типов лавинных фотоприемников.

При одинаковом перенапряжении $\Delta U = 0 \text{ В}$ импульсы с большей амплитудой наблюдались в фотоприемниках с МРП структурой, т.е. при таких условиях эти фотоприемники обладают большим коэффициентом лавинного умножения. Рост температуры приводит к уменьшению среднего значения амплитуды импульсов, и эта зависимость имеет линейный вид. Значение отношения изменения средней амплитуды импульсов к изменению температуры $\Delta \langle A \rangle / \Delta T$ для всех типов фотоприемников следующие: для ФД-115Л $\Delta \langle A \rangle / \Delta T = -2,9 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}$; для $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ $\Delta \langle A \rangle / \Delta T = -31,2 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}$; для МРП $\Delta \langle A \rangle / \Delta T = -5,1 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}$. Как видно из приведенных численных данных для отношения $\Delta \langle A \rangle / \Delta T$, наибольшую зависимость средней амплитуды импульсов от температуры имеют ЛФД с $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ структурой. Это связано с тем, что

такие ЛФД имеют наиболее сильную зависимость напряжения пробоя от температуры [4]. Так как амплитуда выходных импульсов зависит от величины перенапряжения ΔU , то при постоянном значении $U_{пит}$ наибольшую зависимость от температуры будут иметь те фотоприемники, у которых наиболее сильная зависимость $U_{пр}$ от температуры.



a



б

Рис. 1. Амплитудные распределения импульсов лавинных фотодиодов при различных температурах и перенапряжении $\Delta U=0$ В: *a*) 1 — $T=261,6$ К; 2 — $T=272,6$ К; 3 — $T=292,1$ К для ФД-115Л; *б*) 1 — $T=261,1$ К; 2 — $T=283,1$ К; 3 — $T=291,2$ К для n^+-p-p^+ ; 1' — $T=261,1$ К; 2' — $T=273,1$ К; 3' — $T=294,0$ К для МРП

Проведенные исследования формы амплитудного распределения импульсов от интенсивности регистрируемого оптического излучения фотоприемника показали, что для всех типов фотоприемников она остается неизменной как для сигнальных, так и для темновых импульсов. Однако для фотоприемников со структурой МРП даже небольшое увеличение интенсивности регистрирующего оптического излучения приводило к росту вероятности образования импульсов с низкой амплитудой и уменьшению высокоамплитудной части АРИ.

Наблюдаемый эффект для МРП структур обусловлен взаимным влиянием микроплазменных импульсов, т.е. неполным восстановлением потенциала структуры до момента возникновения следующего микроплазменного пробоя. Наиболее сильная зависимость АРИ от интенсивности регистрируемого оптического излучения проявляется у диодов с большим дифференциальным сопротивлением микроплазмы R_S . Дифференциальное сопротивление R_S исследуемых лавинных фотоприемников изменялось при изменении температуры в диапазоне 260–293 К и принимало значения:

$0,146 \cdot 10^6 - 0,129 \cdot 10^6$ Ом для ФД-115Л;

$1,533 \cdot 10^6 - 0,322 \cdot 10^6$ Ом для $n^+ - p - \pi - p^+$;

$21,36 \cdot 10^6 - 16,51 \cdot 10^6$ Ом для МРП.

Для лавинных фотодиодов ФД-115Л и $n^+ - p - \pi - p^+$ вид амплитудных распределений остается неизменным как для темновых импульсов, так и для сигнальных импульсов (при разных интенсивностях регистрируемого оптического излучения) во всем исследуемом температурном диапазоне.

Для фотоприемников со структурой $n^+ - p - \pi - p^+$, ФД-115Л и МРП амплитудные распределения одноквантовых импульсов не зависят от длины волны регистрируемого оптического излучения во всем исследуемом температурном диапазоне. Измерения проводились для длин волн 490–870 нм оптического излучения.

Зависимость вероятности регистрации одноквантового импульса от температуры представлена на рис. 2. Вероятность регистрации определялась как вероятность того, что амплитуда импульса превысит определенный уровень напряжения и будет зарегистрирована электронной системой регистрации.

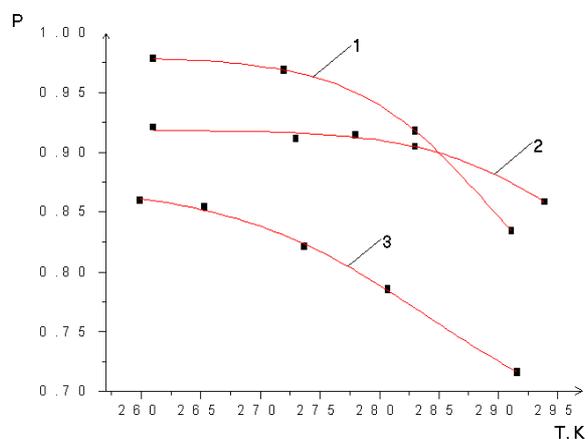


Рис. 2. Зависимость вероятности регистрации одноквантового импульса от температуры:
1 — $n^+ - p - \pi - p^+$; 2 — МРП; 3 — ФД-115Л

Из рис. 2 видно, что вероятность регистрации одноквантового импульса на выходе фотоприемника при охлаждении повышается, но наблюдается уменьшение скорости роста вероятности регистрации импульса при более низких температурах по сравнению с комнатной. Увеличение вероятности регистрации импульсов связано с тем, что при охлаждении вероятность импульсов с большей амплитудой увеличивается, а вероятность импульсов с меньшей амплитудой уменьшается.

Заключение

Исследования зависимости амплитудных распределений импульсов от температуры кремниевых лавинных одноквантовых фотоприемников показали, что при охлаждении происходит увеличение вероятности образования импульсов с большей амплитудой и уменьшение вероятности образования импульсов с меньшей амплитудой. Это приводит к росту вероятности регистрации одноквантовых импульсов при понижении температуры. Так же было показано, что АРИ для ФД-115Л и $n^+ - p - \pi - p^+$ не зависят от интенсивности засветки, в отличие от МРП структур, для которых наблюдается изменение амплитуды одноквантовых импульсов при изменении интенсивности регистрируемого оптического излучения: уменьшение вероятности образования импульсов с большей амплитудой и увеличение вероятности образования импульсов с меньшей амплитудой. АРИ исследованных фотоприемников не зависит от спектрального состава регистрирующего оптического излучения (для длин волн 490–870 нм) во всем рассматриваемом температурном диапазоне.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON SINGLE-PHOTON CHARACTERISTICS OF AVALANCHE PHOTODETECTORS

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

Abstract

In the work researches of dependence of height distribution of single-photon pulses of silicon avalanche photodetectors on the temperature, intensity and spectral structure of registered optical radiation were made. It is proved that decrease of the temperature leads to an increase of probability of formation of pulses with greater amplitude and probability of registration of a pulse at an output of a photodetector, factors of dependence of average amplitude of single-photon pulses on the temperature were determined.

Литература

1. Гулаков И.Р., Холондырев С.В. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях. Мн., 1989.
2. Грехов И.В., Серезжин Ю.Н. Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках. Л., 1980.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984.
4. Гулаков И.Р., Козлов В.Л., Зеневич А.О., Новиков Е.В. // Доклады БГУИР. 2003. Т. 1, № 2.