

**ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА**

УДК 621.383.92

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ, В КОТОРОМ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛА ИСПОЛЬЗУЕТСЯ СЧЕТЧИК ФОТОНОВ**

А.О. ЗЕНЕВИЧ, А.М. ТИМОФЕЕВ

*Высший государственный колледж связи  
Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220114, Беларусь**Поступила в редакцию 9 июня 2011*

Выполнены исследования пропускной способности оптического канала связи, в качестве приемного модуля в котором использовался счетчик фотонов на базе лавинного фотодиода. Установлены зависимости максимальной скорости передачи информации оптического канала от напряжения питания фотодиода и мощности оптического сигнала.

*Ключевые слова:* скорость передачи информации, пропускная способность, счетчик фотонов.

**Введение**

Для защиты информации, транслируемой по оптическим каналам связи, используются квантовые криптографические методы [1]. Передача информации по таким каналам осуществляется предельно слабыми оптическими сигналами, содержащими до десятка фотонов, приходящихся на один бит информации. Одним из наиболее чувствительных методов регистрации оптического излучения является метод счета отдельных фотонов [2]. Для реализации метода счета фотонов все более широкое применение находят полупроводниковые фотоприемники, такие, как лавинные фотодиоды (ЛФД) [3]. Поэтому в качестве приемного модуля для таких каналов применяются счетчики фотонов на лавинных фотодиодах. До настоящего времени не были выполнены экспериментальные исследования влияния режимов эксплуатации ЛФД, работающих в режиме счета фотонов, например, влияния напряжения питания и мощности оптического сигнала на пропускную способность оптического канала связи. В связи с этим целью данной работы является установление зависимости пропускной способности оптического канала связи, содержащего в качестве приемного модуля счетчик фотонов на ЛФД, от напряжения его питания и мощности регистрируемого оптического сигнала.

**Методика эксперимента**

В качестве объектов исследования использовались кремниевые лавинные фотодиоды со структурами  $p^+n-v-n^+$  и  $n^+p-\pi-p^+$ , где  $v$  и  $\pi$  – слаболегированные области  $n$ - и  $p$ -типа соответственно. Были выбраны фотоприемники этого типа, так как они позволяют реализовать режим счета фотонов при комнатных температурах [4]. Принципиальное различие этих ЛФД состоит в типе фотогенерированных неосновных носителей заряда, достигающих области умножения  $p-n$ -перехода. Для фотоприемников со структурой  $p^+n-v-n^+$  – это электроны, а для  $n^+p-\pi-p^+$  – дырки. Учитывая, что подвижность, коэффициенты умножения и время жизни на ловушечных уровнях электронов и дырок различаются, представляет интерес определить, как влияют эти факторы на пропускную способность оптического канала связи.

Схема установки для определения пропускной способности оптического канала связи представлена на рис. 1. Для реализации режима счета фотонов ЛФД включался по схеме пассивного гашения лавины [3]. В таком включении ЛФД ведет себя подобно счетчику квантов излучения Гейгера–Мюллера.

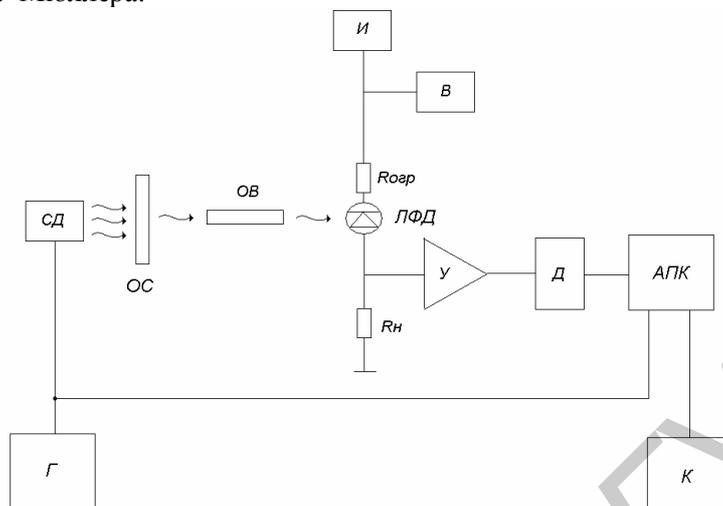


Рис. 1. Структурная схема установки: У – усилитель; Д – амплитудный дискриминатор; АПК – аппаратно-программный измерительный комплекс; В – вольтметр; СД – светодиод; ОС – ослабляющий нейтральный светофильтр; И – источник постоянного напряжения; Г – генератор прямоугольных импульсов; ОВ – оптическое волокно; К – компьютер;  $R_n$  – нагрузочный резистор,  $R_{огр}$  – ограничивающий резистор

На лавинный фотодиод от источника постоянного напряжения И через резистор  $R_{огр}$  подается напряжение питания  $U_n$ , близкое или превышающее напряжение пробоя  $U_{пр}$   $p$ - $n$ -перехода, которое контролируется вольтметром В. При такой величине напряжения питания через фотодиод протекают импульсы тока, обусловленные образованием локальных каналов пробоя  $p$ - $n$ -перехода – микроплазм. Образование микроплазмы может быть вызвано носителем заряда, образованным под действием фотона оптического излучения, или вследствие термогенерации.

При возникновении пробоя ток, протекающий через ЛФД, резко возрастает. Это приводит к увеличению падения напряжения на резисторе  $R_n$  и к уменьшению напряжения на фотодиоде, в результате чего пробой в микроплазменном канале прекращается (гасится). При этом формируется импульс напряжения на нагрузочном резисторе  $R_n$ .

Импульс тока, вызванный термогенерированным носителем заряда, называется темновым, а импульс, инициируемый фотоном, – сигнальным. Когда на ЛФД подается слабое оптическое излучение, на его выходе регистрируется смесь темновых и сигнальных импульсов.

Импульсы, выделенные на сопротивлении нагрузки  $R_n$ , поступают на вход усилителя У, а затем на вход амплитудного дискриминатора Д, порог амплитудной селекции которого установлен непосредственно над уровнем собственных шумов усилителя. В процессе проводимых измерений величина порога оставалась постоянной. Импульсы, сформированные по длительности и амплитуде, с выхода дискриминатора поступают на вход аппаратно-программного измерительного комплекса АПК. Работа аппаратно-программного комплекса синхронизируется с работой генератора прямоугольных импульсов напряжения Г.

На выходе генератора Г формируется меандр с максимальным значением напряжения 5 В и минимальным – 0 В и периодом 200 мкс. Это переменное напряжение подается на управляющий вход аппаратно-программного комплекса и используется для питания светодиода СД. В течение полупериода, когда напряжение питания на светодиоде равно 0 В, аппаратно-программный комплекс подсчитывает число темновых импульсов. Во время полупериода, когда напряжение составляет 5 В, комплекс подсчитывает смесь темновых и сигнальных импульсов. Сосчитанное за полупериоды количество импульсов передается в компьютер К, где формируются отдельно массивы из числа темновых импульсов и смеси темновых и сигнальных импульсов. По данным, занесенным в массивы, рассчитываются статистические распределения

темновых и смеси темновых и сигнальных импульсов. На основании этих распределений вычисляется пропускная способность оптического канала связи [5]:

$$\begin{aligned}
 C_{\max} = & \left\{ -0,5 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) + \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \log_2 \left( 0,5 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) + \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \right) - \right. \\
 & \left. \left( 1 - 0,5 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) + \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \right) \log_2 \left( 1 - 0,5 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) + \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \right) + \right. \\
 & 0,5 \left[ \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) \right) \log_2 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) \right) + \left( 1 - \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) \right) \log_2 \left( 1 - \sum_{N=0}^{N_n} P_t(N) \right) \right] + \\
 & \left. 0,5 \left[ \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \log_2 \left( \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) + \left( 1 - \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \log_2 \left( 1 - \sum_{N=0}^{N_n} P_{st}(N) \right) \right] \right\} \frac{1}{\tau_b},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $P_{st}(N)$  – статистическое распределение темновых и сигнальных импульсов,  $P_t(N)$  – статистическое распределение темновых импульсов,  $\tau_b$  – длительность полупериода,  $N_n$  – пороговый уровень регистрации,  $N$  – число импульсов зарегистрированных за время  $\tau_b$ .

Пороговый уровень регистрации – наименьшее число зарегистрированных на выходе счетчика фотонов импульсов  $N_n$ , при котором делается вывод, что передан символ «1». Отметим, что при регистрации на выходе счетчика фотонов большего числа импульсов, чем  $N_n$ , также считается, что передан символ «1». Если число импульсов на выходе счетчика фотонов меньше  $N_n$ , то принимается решение, что передан символ «0».

В экспериментальной установке использовался светодиод АЛ307А с длиной волны оптического излучения 0,68 мкм. Излучение светодиода ослаблялось нейтральным светофильтром и попадало на ЛФД через оптическое волокно ОВ.

Все исследования проводились при температуре 293 К.

### Результаты эксперимента

Поскольку для различных типов ЛФД напряжение пробоя  $U_{np}$  было различным, то при сравнении зависимостей их характеристик от напряжения питания использовалось перенапряжение  $\Delta U = U_n - U_{np}$ . Напряжение пробоя составляло  $U_{np} = 249,7$  В для  $p^+n-v-n^+$ , а для  $n^+p-p^+$   $U_{np} = 190,7$  В.

На рис. 2 (кривые 5, 6) представлены зависимости скорости передачи информации от напряжения питания ЛФД для порогового уровня  $N_n = 2$ . Измерения выполнены при постоянной мощности оптического сигнала  $W$ . Для всех типов исследуемых ЛФД эта зависимость имела максимум. Для ЛФД со структурой  $p^+n-v-n^+$  максимуму зависимости соответствовало перенапряжение  $\Delta U = 0,5$  В, а для ЛФД со структурой  $n^+p-p^+$   $\Delta U = 0,6$  В. Максимальное значение  $C_{\max}$  достигает при значениях  $\Delta U$ , для которых  $n_T < n_c$  и наблюдается наибольшая разность между скоростями счета темновых  $n_T$  и сигнальных  $n_c$  импульсов. Рост зависимостей  $C_{\max}(\Delta U)$  в диапазоне  $-0,2 \div 0,5$  В для ЛФД со структурой  $p^+n-v-n^+$  и в диапазоне  $-0,1 \div 0,6$  В для ЛФД со структурой  $n^+p-p^+$  связан с увеличением квантовой эффективности регистрации счетчика фотонов при повышении перенапряжения. Об этом свидетельствует поведение зависимостей  $n_c(\Delta U)$  (кривые 2 и 4 на рис. 2). Значительного влияния роста скорости счета темновых импульсов в этих диапазонах  $\Delta U$  на скорость передачи информации не оказывается.

При значениях  $\Delta U > 0,5$  В для ЛФД со структурой  $p^+n-v-n^+$  и при  $\Delta U > 0,6$  В для ЛФД со структурой  $n^+p-p^+$  увеличение скорости счета темновых импульсов приводит к уменьшению скорости передачи информации. Это связано с тем, что при таких значениях перенапряжения скорость счета темновых импульсов  $n_T$  приближается к скорости счета сигнальных импульсов  $n_c$  и при дальнейшем увеличении  $\Delta U$  превышает ее, а квантовая эффективность регистрации с ростом перенапряжения изменяется незначительно, поскольку наблюдается насыщение зависимостей  $n_c(\Delta U)$  исследуемых типов ЛФД (см. рис. 2).

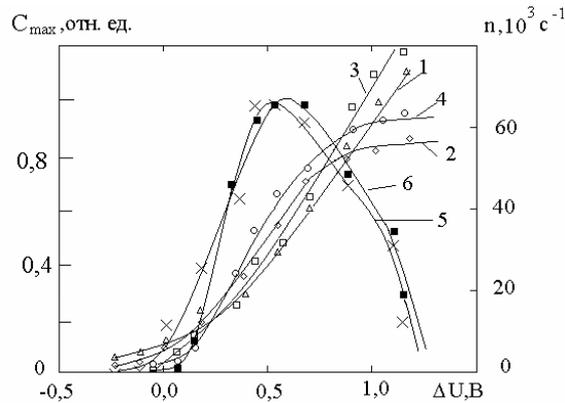


Рис. 2. Зависимости скорости счета импульсов и скорости передачи информации от перенапряжения ЛФД: 1 –  $n_T$  для  $p^+n-v-n^+$ ; 2 –  $n_c$  для  $p^+n-v-n^+$ ; 3 –  $n_T$  для  $n^+p-\pi-p^+$ ; 4 –  $n_c$  для  $n^+p-\pi-p^+$ ; 5 – скорость передачи информации для  $p^+n-v-n^+$ ; 6 – скорость передачи информации для  $n^+p-\pi-p^+$

Зависимости скорости передачи информации от мощности оптического сигнала  $W$  представлены на рис. 3. Измерения выполнены при постоянных значениях  $N_n$  и  $\Delta U$ . Каждая зависимость имеет максимум, наличие которого можно объяснить проявлением эффекта мертвого времени  $\tau_d$  ЛФД, в результате чего часть фотонов излучения не регистрируется. При малых мощностях оптического сигнала этим эффектом можно пренебречь. Однако с увеличением  $W$  количество незарегистрированных фотонов растет, что и приводит к уменьшению скорости передачи информации. Поэтому с увеличением  $W$  вначале наблюдается рост величины  $C_{max}$ , а затем ее спад. Для ЛФД со структурой  $p^+n-v-n^+$  спад зависимости  $C_{max}$  от мощности оптического сигнала наблюдался при меньших значениях  $W$ , чем для фотодиодов со структурой  $n^+p-\pi-p^+$ . Это связано с тем, что величина  $\tau_d$  для ЛФД со структурой  $p^+n-v-n^+$  больше, по сравнению с такой величиной для ЛФД со структурой  $n^+p-\pi-p^+$ . Так оценка длительности мертвого времени показала, что оно составляло  $\tau_d = 1,2$  мкс для ЛФД со структурой  $p^+n-v-n^+$  и  $\tau_d = 1,0$  мкс для ЛФД со структурой  $n^+p-\pi-p^+$ .

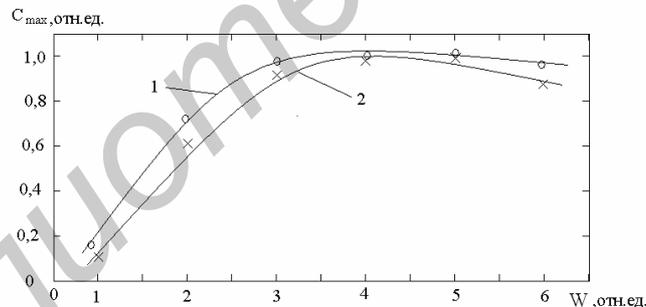


Рис. 3. Зависимости скорости передачи информации от мощности оптического сигнала: 1 – для ЛФД со структурой  $n^+p-\pi-p^+$ ; 2 – для ЛФД со структурой  $p^+n-v-n^+$

На основании результатов измерения была получена пропускная способность оптического канала связи  $C_{max} \approx 100$  кбит/с при мощности оптического сигнала  $W = 3,0 \cdot 10^{-12}$  Вт, подаваемого на ЛФД со структурой  $n^+p-\pi-p^+$ , и  $C_{max} \approx 90$  кбит/с при  $W = 3,3 \cdot 10^{-12}$  Вт для ЛФД со структурой  $p^+n-v-n^+$ . Такое различие скоростей обусловлено различными значениями мертвых времен и квантовых эффективностей регистрации исследуемых типов ЛФД.

### Заключение

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для получения наибольшей пропускной способности оптического канала связи, содержащего в качестве приемного модуля счетчик фотонов на лавинном фотодиоде, необходимо подбирать оптимальное напряжения питания ЛФД и мощность оптического сигнала, транслируемого по каналу.

Авторы приносят благодарность доктору физико-математических наук, профессору Гулакову И.Р. за помощь в обсуждении полученных результатов.

# ANALYSIS OF OPTICAL CHANNEL CAPACITY WITH EMPLOYED PHOTON COUNTER FOR SIGNAL DETECTION

A.O. ZENEVICH, A.M. TIMOFEEV

## Abstract

Analysis of optical channel capacity has been carried out in this research. As a receiving module photon counter on the basis of avalanche photodiode has been used. It was determined that maximum information rate of an optical channel depends on photodiode supply voltage and power of optical signal.

## Литература

1. *Килин С.Я.* // Успехи физических наук. 1999. Т.169, №5. С. 507–526.
2. *Ветохин С.С., Гулаков И.Р., Перцев А.Н. и др.* Одноэлектронные фотоприемники. М., 1986.
3. *Гулаков И.Р., Холондырев С.В.* Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях. Мн., 1989.
4. *Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Тимофеев А.М.* // Тезисы докладов XXI Международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения 25–28 мая 2010 г. Москва, Россия. С. 139-140.
5. *Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Комаров С.К.* // Докл. БГУИР. 2009. №8 (46). С. 22–27.