

УДК 621.383.92

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ АСИНХРОННОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ С ПРИЕМНИКОМ НА ОСНОВЕ СЧЕТЧИКА ФОТОНОВ

Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Тимофеев А.М., Косари А.Г.

Высший государственный колледж связи, г. Минск, Республика Беларусь

Построена математическая модель асинхронного оптического канала связи, в котором в качестве приемного модуля использовался счетчик фотонов; получено выражение для расчета пропускной способности этого канала. В результате выполненных экспериментальных исследований определены зависимости пропускной способности асинхронного оптического канала связи, содержащего в качестве приемного модуля счетчик фотонов на основе кремниевого лавинного фотоприемника, от интенсивности оптического излучения и напряжения питания фотоприемника. (E-mail: zao@vks.belpak.by)

Ключевые слова: пропускная способность, счетчик фотонов, лавинный фотоприемник.

Введение

Для конфиденциальной передачи информации в настоящее время используются квантово-криптографические системы связи, в которых данные передаются при помощи оптических сигналов, содержащих в среднем до десяти фотонов на каждый бит. Для приема таких сигналов необходимо использовать высокочувствительные модули, например, счетчики фотонов. Отметим, что общим недостатком существующих квантово-криптографических систем является низкая пропускная способность [1], которая в основном ограничивается характеристиками приемных модулей. Ранее нами были выполнены экспериментальные исследования, в результате которых установлено влияние напряжения питания и интенсивности оптического излучения на пропускную способность канала связи, в котором для согласованной работы источника и приемника информации дополнительно передавались синхроимпульсы по отдельной линии связи [2]. Организация отдельной линии для передачи синхроимпульсов, как в [2, 3], на практике иногда нецелесообразна либо невозможна, например, когда источник и приемник удалены друг от друга в космическом пространстве или горной местности. В этих случаях передача информации может осуществляться асинхронным способом, когда синхроимпульсы не передаются. До нас-

тоящего времени исследования влияния указанных выше параметров счетчика фотонов на пропускную способность асинхронного оптического канала связи отсутствуют. В связи с этим целью данной работы являлось установить влияние напряжения питания и интенсивности оптического излучения на пропускную способность асинхронного оптического канала связи.

Математическая модель асинхронного канала

Вначале получим выражение для расчета пропускной способности асинхронного оптического канала связи с приемником на основе счетчика фотонов. Для этого необходимо построить математическую модель рассматриваемого канала связи. Дальнейшие рассуждения будут основаны на том, что передача информации осуществляется двоичными символами («0» и «1»). Обозначим вероятности появления символов «0» и «1» на входе асинхронного канала как $P_s(0)$ и $P_s(1)$, а вероятности появления символов «0» и «1» на выходе асинхронного канала как $P'_s(0)$ и $P'_s(1)$ соответственно. Вероятность того, что при передаче символа «0» или «1» на выходе счетчика фотонов не будет зарегистрировано ни символа «0», ни символа «1», обозначим как $P'_s(-)$. Отметим, что алфавит кодовых слов на входе не совпадает с алфавитом кодовых слов

на выходе; вероятность приема символа «0», «1» либо отсутствия символа не зависит ни от того, какой символ был на входе канала, ни от ранее принятых символов; при передаче символа («0» или «1») на выходе канала ни символа «0», ни символа «1» может быть не зарегистрировано. Учитывая указанные особенности, рассматриваемый канал является дискретным двоичным несимметричным односторонним без памяти и со стиранием [4]. Всеми потерями информации, за исключением потерь в счетчике фотонов, пренебрегаем.

Пропускная способность определяется максимальной скоростью передачи информации. Скорость передачи информации C – это количество информации I , приходящееся на среднее время передачи одного бита (одного символа) τ_b [4]:

$$C = I / \tau_b = [H(B) - H(B/A)] / \tau_b, \quad (1)$$

где $H(B)$ – энтропия на выходе канала связи, $H(B/A)$ – условная энтропия, определяющая «ненадежность» канала или потери информации при воздействии помех.

Энтропия на выходе канала связи запишется в виде [4]:

$$H(B) = -P'_s(0) \log_2 P'_s(0) - P'_s(1) \log_2 P'_s(1) - P'_s(-) \log_2 P'_s(-). \quad (2)$$

Входящие в формулу (2) вероятности $P'_s(0)$, $P'_s(1)$ и $P'_s(-)$ равны соответственно:

$$\begin{aligned} P'_s(0) &= P_s(0)P(0/0) + P_s(1)P(0/1), \\ P'_s(1) &= P_s(0)P(1/0) + P_s(1)P(1/1), \\ P'_s(-) &= P_s(0)P(-/0) + P_s(1)P(-/1), \end{aligned} \quad (3)$$

где $P(0/0)$ и $P(0/1)$ – вероятности регистрации на выходе канала связи символа «0» при наличии на входе символов «0» и «1», $P(1/0)$ и $P(1/1)$ – вероятности регистрации на выходе канала связи символа «1» при наличии на входе символов «0» и «1», $P(-/0)$ и $P(-/1)$ – вероятности того, что при регистрации на выходе канала связи не будет зафиксировано ни символа «0», ни символа «1», в то время как на передающей стороне был сформирован символ «0» и символ «1» соответственно.

Полученные выражения (3) подставим в формулу (2), тогда энтропия на выходе канала связи:

$$\begin{aligned} H(B) &= -[P_s(0)P(0/0) + P_s(1)P(0/1)] \log_2 [P_s(0) \times \\ &\times P(0/0) + P_s(1)P(0/1)] - [P_s(0)P(1/0) + P_s(1) \times \\ &\times P(1/1)] \log_2 [P_s(0)P(1/0) + P_s(1)P(1/1)] - \\ &- [P_s(0)P(-/0) + P_s(1)P(-/1)] \log_2 [P_s(0)P(-/0) + \\ &+ P_s(1)P(-/1)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Условная энтропия $H(B/A)$ [4]:

$$\begin{aligned} H(B/A) &= -P_s(0)[P(0/0) \log_2 P(0/0) + P(1/0) \log_2 P(1/0) + \\ &+ P(-/0) \log_2 P(-/0)] - P_s(1)[P(0/1) \log_2 P(0/1) + \\ &+ P(1/1) \log_2 P(1/1) + P(-/1) \log_2 P(-/1)] \end{aligned} \quad (5)$$

Скорость передачи информации определяется подстановкой формул (4) и (5) в выражение (1) и достигает своего максимального значения (пропускной способности) C_{max} при $P_s(0) = P_s(1) = 0,5$ [4]. Поэтому формулу пропускной способности можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} C_{max} &= \{-[0,5[P(0/0) + P(0/1)]] \log_2 [0,5(P(0/0) + \\ &+ P(0/1))] - [0,5[P(1/0) + P(1/1)]] \log_2 [0,5[P(1/0) + \\ &+ P(1/1)]] - [0,5[P(-/0) + P(-/1)]] \log_2 [0,5[P(-/0) + \\ &+ P(-/1)]] + 0,5[P(0/0) \log_2 P(0/0) + P(1/0) \times \\ &\times \log_2 P(1/0) + P(-/0) \log_2 P(-/0)] + 0,5[P(0/1) \times \\ &\times \log_2 P(0/1) + P(1/1) \log_2 P(1/1) + P(-/1) \times \\ &\times \log_2 P(-/1)]\} / \tau_b. \end{aligned} \quad (6)$$

Численные значения вероятностей $P(0/0)$, $P(-/0)$, $P(1/0)$, $P(0/1)$, $P(-/1)$, $P(1/1)$ можно определить на основании статистических распределений числа импульсов на выходе счетчика фотонов $P_{st0}(N)$ и $P_{st1}(N)$, обозначив числа N_1 и N_2 нижним и верхним пороговыми уровнями регистрации, соответственно, по аналогии как описано в работах [2, 5–7]. Поэтому вероятности $P(0/0)$, $P(-/0)$, $P(1/0)$, $P(0/1)$, $P(-/1)$, $P(1/1)$ равны соответственно:

$$\begin{aligned} P(0/0) &= \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{st0}(N), \quad P(-/0) = \sum_{N=0}^{N_1-1} P_{st0}(N), \\ P(1/0) &= 1 - \sum_{N=0}^{N_2} P_{st0}(N), \end{aligned} \quad (7)$$

$$P(0/1) = \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{sr1}(N), \quad P(-/1) = \sum_{N=0}^{N_1-1} P_{sr1}(N),$$

$$P(1/1) = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} P_{sr1}(N).$$

Рассчитать пропускную способность можно путем подстановки в (6) соответствующих выражений (7) с учетом измеренных статистических распределений $P_{sr0}(N)$ и $P_{sr1}(N)$ при заданных пороговых уровнях регистрации N_1 и N_2 и длительности τ_b .

Описание установки и методика эксперимента

Поскольку реализация счетчиков фотонов на базе кремниевых лавинных фотоприемников (ЛФП) не требует применения схем охлаждения (в отличие от сверхпроводниковых фотоприемников, германиевых лавинных фотодиодов, лавинных фотодиодов на основе различных соединений галлия, квантовых точек и др.), то именно такие фотоприемники были выбраны в качестве объектов исследований: со структурами p^+n-v-n^+ и n^+p-p-p^+ , а также серийно выпускаемые ФД-115Л. В связи с тем, что эти ЛФП отличаются как по структуре, так и по площади фоточувствительной поверхности, представляет интерес определить, как эти параметры влияют на пропускную способность рассматриваемого канала связи, что являлось предметом исследований.

Для различных структур ЛФП напряжения лавинного пробоя $p-n$ перехода $U_{пр}$ могут отличаться, поэтому при сравнении зависимостей их характеристик от напряжения питания $U_{пит}$ использовалась величина перенапряжения $\Delta U = U_{пит} - U_{пр}$. Напряжение пробоя определялось на основании вольтамперных характеристик ЛФП по методике, описанной в [8].

Структурная схема установки для определения пропускной способности асинхронного оптического канала связи представлена на рисунке 1. Для реализации режима счета фотонов ЛФП включался по схеме пассивного гашения лавинного пробоя [9]. На ЛФП от источника постоянного напряжения питания И через ограничивающий резистор $R_{огр}$ подается напряжение обратного смещения $U_{пит}$, близкое или превышающее напряжение лавинного пробоя $p-n$ перехода $U_{пр}$, которое контролируется вольтметром В. При такой величине напряже-

ния обратного смещения через ЛФП протекают импульсы тока, обусловленные возникновением пробоя по локальным каналам $p-n$ перехода – микроплазм, появление которых может быть вызвано носителем заряда, образованным под действием фотона оптического излучения или вследствие термогенерации.

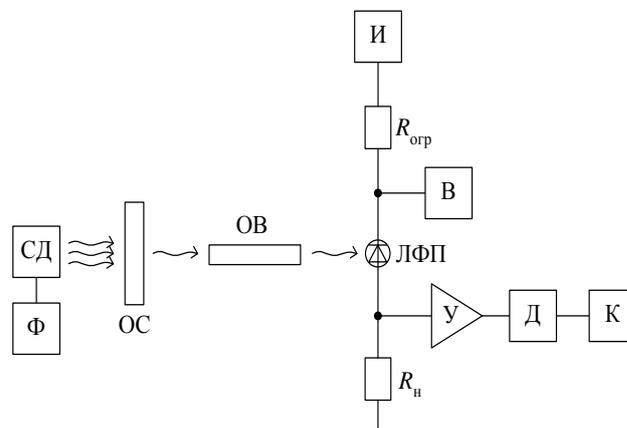


Рисунок 1 – Структурная схема установки:

Ф – формирователь данных; СД – светодиод; ОС – ослабляющий нейтральный светофильтр; ОВ – оптическое волокно; И – источник постоянного напряжения; В – вольтметр; $R_{огр}$ – ограничивающий резистор; ЛФП – лавинный фотоприемник; R_n – нагрузочный резистор; У – усилитель; Д – амплитудный дискриминатор; К – компьютер

При возникновении пробоя протекающий через ЛФП ток возрастает, что приводит к увеличению падения напряжения на нагрузочном резисторе R_n и к уменьшению напряжения на ЛФП. В результате этого пробой в микроплазменном канале прекращается (гасится), а на нагрузочном резисторе R_n формируется импульс напряжения.

Импульс напряжения, вызванный термогенерированным носителем заряда, называют темновым, а импульс, инициированный регистрируемым фотоном оптического излучения, – сигнальным. В случае, когда на ЛФП подается маломощный оптический сигнал, на его выходе регистрируется смесь темновых и сигнальных импульсов.

Импульсы, выделенные на сопротивлении нагрузки R_n , поступают на вход усилителя У, который обеспечивает их усиление. Затем с выхода усилителя У импульсы подаются на вход амплитудного дискриминатора Д, порог амплитудной селекции которого установлен непосредственно над уровнем собственных шумов усилителя. В процессе проводимых измерений

порог амплитудной селекции оставался неизменным. Импульсы, сформированные по длительности и амплитуде, с выхода дискриминатора поступают на вход компьютера К.

Формирователь данных Ф управляет работой светодиода СД при помощи управляющих импульсов. При передаче управляющего импульса в течение длительности времени Δt_c передается двоичный символ, а в течение защитного интервала времени $t_3 = \tau_b - \Delta t_c$ данные в линию не подаются. Защитный интервал предотвращает перекрывание близлежащих временных интервалов Δt_c . На протяжении длительности Δt_c на выходе светодиода СД при передаче символов «0» и «1» формируется оптический сигнал интенсивностью J_0 и J_1 соответственно, который ослабляется светофильтром ОС и подается на ЛФП через оптическое волокно ОВ.

На приемной стороне счетчиком фотонов подсчитывается число зарегистрированных импульсов N , поступивших в течение интервала времени Δt_c . Затем это число сравнивается компьютером К с двумя пороговыми уровнями N_1 и N_2 : если $N_1 \leq N \leq N_2$ – передан символ «0», если $N > N_2$ – передан символ «1», в противном случае – принимается решение, что символ не передавался. Также компьютер К на основании подсчитанного числа импульсов отдельно формирует массивы данных числа импульсов, по которым рассчитываются статистические распределения смеси числа сигнальных и темновых импульсов $P_{st0}(N)$ и $P_{st1}(N)$ при передаче символов «0» и «1» соответственно за интервал времени Δt_c .

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для получения максимально возможной пропускной способности оптического канала связи необходимо подбирать такое перенапряжение, при котором величина динамического диапазона регистрируемых интенсивностей оптического излучения J счетчика фотонов максимальна [10]. Зависимость величины динамического диапазона Δn_s ($\Delta n_s = n_{stmax} - n_t$, где n_{stmax} – максимальная скорость счета смеси темновых и сигнальных импульсов, при которой зависимость $n_s(J)$ линейная; n_t – скорость счета темновых импульсов) от перенапряжения показана на рисунке 2. Все графики нормированы на максимальное значение Δn_s , полученное для соответствующего типа ЛФП в исследуемом диапазоне перенапряжений.

Как видно из приведенных результатов, каждая из зависимостей $\Delta n_s(\Delta U)$ имеет максимум. Наибольшее значение Δn_s в исследуемом диапазоне перенапряжений получено для ЛФП со структурой p^+n-v-n^+ и составило $\approx 1,4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Наличие максимума зависимости $\Delta n_s(\Delta U)$ обусловлено характером изменения скоростей счета темновых n_t и сигнальных импульсов n_s с увеличением перенапряжения. Объяснение этому дано в работах [2, 7]: с увеличением перенапряжения вначале происходит рост как n_t , так и n_s . Однако при дальнейшем увеличении перенапряжения скорость счета темновых импульсов продолжает расти, а зависимость $n_s(\Delta U)$ достигает насыщения и практически не изменяется. Поэтому вначале зависимость $\Delta n_s(\Delta U)$ демонстрирует рост, достигая своего максимального значения, а потом – падение.

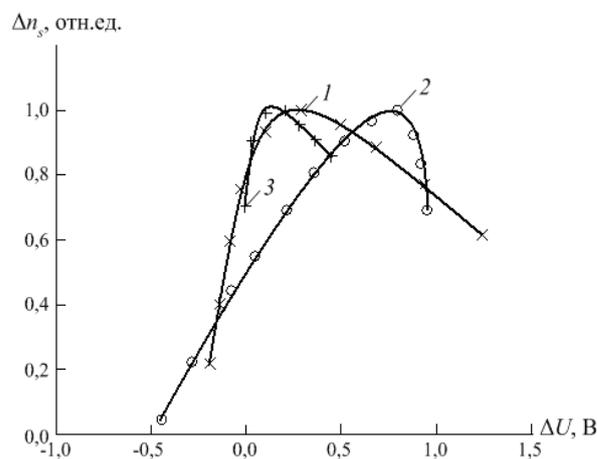


Рисунок 2 – Зависимость динамического диапазона от перенапряжения: 1 – ФД-115Л; 2 – ЛФП со структурой p^+n-v-n^+ ; 3 – ЛФП со структурой $n^+p-\pi-p^+$

При проведении исследований зависимости $C_{max}(\Delta t_c)$ интенсивность оптического излучения J_0 выбиралась такой, при которой скорость счета сигнальных импульсов удовлетворяла условию $n_s \geq D_t^{1/2}$, где D_t – дисперсия скорости счета темновых импульсов, а интенсивность J_1 – из соответствия n_s максимальному значению Δn_s , полученному в исследуемом диапазоне $\Delta n_s(\Delta U)$; устанавливались следующие пороговые уровни регистрации: $N_1 = 1$ и $N_2 = 2$, т.е. счетчик фотонов регистрировал символ «0» при подсчете одного или двух импульсов и символ «1» – при подсчете трех и более импульсов. Отметим, что пороговые уровни регистрации можно выбирать и другими, отлич-

ными от приведенных выше, однако при сравнении значений $C_{max}(\Delta t_c)$ для различных перенапряжений следует выбирать N_1 и N_2 постоянными. При других значениях N_1 и N_2 зависимости $C_{max}(\Delta t_c)$ имели схожий вид для всех исследуемых типов ЛФП, поэтому на рисунке 3 такая зависимость представлена для ЛФП со структурой p^+n-v-n^+ , нормированная на максимальное значение пропускной способности.

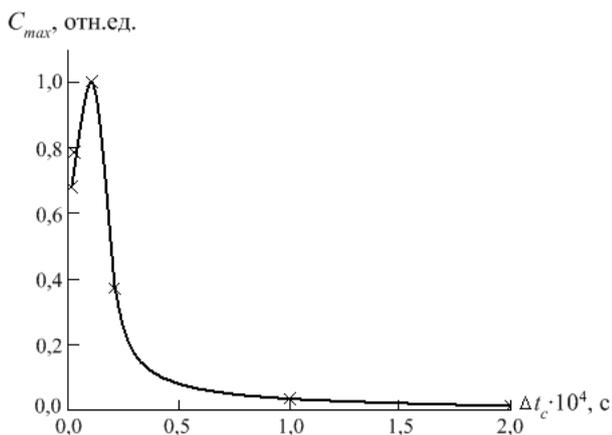


Рисунок 3 – Зависимость пропускной способности канала связи от длительности времени передачи управляющего импульса

Как видно из приведенной зависимости $C_{max}(\Delta t_c)$, она имеет максимум, которому соответствует длительность $\Delta t_c = 10$ мкс. Причем в диапазоне Δt_c от 1 до 10 мкс наблюдается рост величины C_{max} , а при $\Delta t_c > 10$ мкс – уменьшение. Увеличение C_{max} при увеличении $\Delta t_c = (1-10)$ мкс обусловлено тем, что при малых Δt_c его значение близко к мертвому времени счетчика фотонов – времени, в течение которого счетчик фотонов не способен регистрировать поступающие фотоны, следовательно, вероятность ошибочной регистрации достаточно велика, а пропускная способность не достигает больших значений. С увеличением длительности Δt_c влияние мертвого времени счетчика фотонов меньше сказывается при приеме информации, поэтому вероятность ошибочной регистрации символа уменьшается, а C_{max} – растет. Дальнейшее увеличение Δt_c увеличивает длительность передачи одного бита τ_b , что приводит к уменьшению C_{max} .

Для того чтобы отделить передачу одного символа от другого, используется защитный временной интервал t_3 по аналогии с защитным частотным интервалом, описанным в работе [4]. Длительность защитного интервала $t_3 = \tau_b - \Delta t_c$ необходимо выбирать, с одной сто-

роны, как можно меньшим. Это связано с тем, что с увеличением t_3 увеличится вероятность образования темновых импульсов, поэтому увеличится общая вероятность ошибочной регистрации за счет увеличения вероятности $P(1/0)$. С увеличением t_3 растет τ_b , что, в свою очередь, снижает пропускную способность. С другой стороны, минимальное значение длительности t_3 также ограничено, поскольку, приняв $t_3 < \Delta t_c$, в случае если счетчик фотонов при приеме двоичного символа, например, сработает не от первого, а от последнего фотона излучения в оптическом импульсе длительностью Δt_c , может произойти перекрытие временных интервалов, т.е. счетчиком фотонов посчитаются фотоны оптического излучения, которые относятся и к текущему передаваемому двоичному символу, и к последующему, однако на выходе счетчика фотонов сформируется один символ. В этом случае увеличится общая вероятность ошибочной регистрации, что снизит пропускную способность. Исходя из вышесказанного, длительность t_3 целесообразно выбирать равной длительности Δt_c , что исключает возможное перекрытие временных интервалов.

Выполнены исследования зависимости пропускной способности оптического канала связи от интенсивности излучения J_0 , применяемого для передачи символа «0». Поскольку для всех исследуемых типов ЛФП эта зависимость имела схожий вид, на рисунке 4 представлена зависимость $C_{max}(J_0)$ для ЛФП со структурой p^+n-v-n^+ .

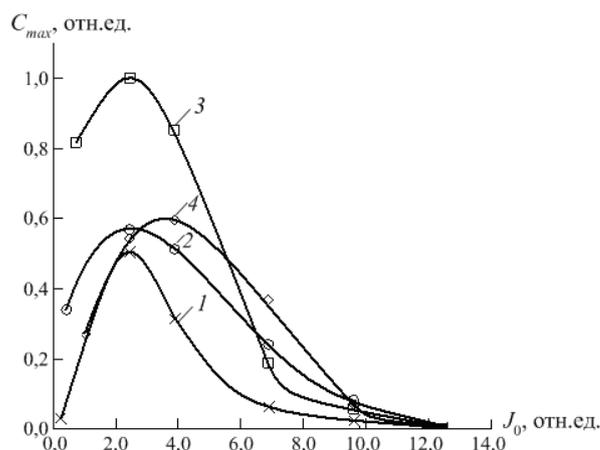


Рисунок 4 – Зависимость пропускной способности канала связи от интенсивности излучения, применяемого для передачи символа «0»:
 1 – $\Delta U = -0,13$ В; 2 – $\Delta U = 0,15$ В; 3 – $\Delta U = 0,47$ В;
 4 – $\Delta U = 0,83$ В

При определении зависимости $C_{max}(J_0)$ интенсивность оптического излучения J_1 , применяемого для передачи символа «1», выбиралась соответствующей максимальному значению n_s линейного участка зависимости $n_s(J)$. Отметим, что минимальное значение интенсивности оптического излучения J_0 , применяемого для передачи символа «0», выбиралось так же, как и в случае исследования зависимости $C_{max}(\Delta t_c)$.

Каждая из представленных на рисунке 4 зависимостей нормирована на наибольшее значение пропускной способности исследуемого диапазона перенапряжений. Из представленных результатов видно, что каждая из зависимостей $C_{max}(J_0)$ имеет максимум. Причем с ростом перенапряжения величина максимума зависимости $C_{max}(J_0)$ в начале увеличивается, достигая наибольшего значения, а затем – уменьшается.

Отметим, что полученные в результате измерений статистические распределения – $P_{st0}(N)$ и $P_{st1}(N)$ – соответствовали распределению Пуассона и имели выраженный максимум, что нами наблюдалось ранее и обсуждалось в [2].

Увеличение интенсивности оптического излучения J_0 приводило к смещению максимального значения вероятности в $P_{st0}(N)$ в сторону больших значений N . При малых интенсивностях излучения J_0 статистическое распределение $P_{st0}(N)$ практически совпадало со статистическим распределением темновых импульсов, описанным в [2], поэтому наблюдалась достаточно большая вероятность $P(-/0)$, что не позволяет достичь максимального значения пропускной способности. Последующее увеличение интенсивности излучения J_0 приводило к смещению максимального значения вероятности в $P_{st0}(N)$ в сторону больших значений N , за счет чего уменьшалась вероятность $P(-/0)$, увеличивалась вероятность $P(0/0)$ и пропускная способность C_{max} достигала своего максимально возможного значения (см. рисунок 4). Дальнейший рост интенсивности излучения J_0 приводил к уменьшению C_{max} . Это объясняется тем, что в этом случае $P(-/0)$ практически не изменяется, однако с ростом J_0 происходит рост вероятностей $P(0/1)$, $P(1/0)$, так как распределение $P_{st0}(N)$ смещается в сторону распределения $P_{st1}(N)$. В результате увеличивается условная энтропия и соответственно уменьшается пропускная способность, что видно из формул (5) и (6). Увеличение максимального значения пропускной способности с ростом перенапряжения до некоторого значения, а затем его спад

обусловлен тем, что с увеличением перенапряжения величина Δn_s также вначале растет, достигая своего максимума, после чего уменьшается (рисунок 2). При наибольших значениях Δn_s удается обеспечить интенсивности излучения J_0 и J_1 , для которых вероятности ошибочной регистрации символов «0» и «1» минимальны, следовательно, пропускная способность имеет максимальное значение. Поэтому перенапряжению, для которого величина Δn_s максимальна, будет соответствовать максимум пропускной способности.

Данные о максимальной пропускной способности рассматриваемого канала для исследуемых ЛФП представлены в таблице.

Таблица

Характеристики исследуемых лавинных фотоприемников

Сравниваемые параметры исследуемых ЛФП	Тип исследуемого ЛФП		
	ФД-115Л	структура p^+n-v-n^+	структура n^+p-p-p^+
Диаметр фоточувствительной поверхности, мкм	200	500	300
Напряжение пробоя, В	52,71	279,05	190,21
Максимальная пропускная способность счетчика фотонов, кбит/с	18,4	31,2	18,2
Скорость счета темновых импульсов $n_t \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	3,0	18,0	12,2
Перенапряжение $\Delta U, В$	0,25	0,75	0,10
Динамический диапазон $\Delta n_s \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	94,5	137,2	94,8

Как видно из приведенных результатов, для рассматриваемого канала связи наибольшее значение пропускной способности ($\approx 31,2$ кбит/с) получено при использовании в счетчике фотонов фотоприемника со структурой p^+n-v-n^+ . В сравнении с другими типами исследуемых ЛФП, площадь фоточувствительной поверхности ЛФП со структурой p^+n-v-n^+ больше, следовательно, его мертвое время также больше. При этом максимальная пропускная способность счетчика

фотонов на основе такого фотоприемника обусловлена тем, что для него наблюдался наибольший динамический диапазон за счет более высокой квантовой эффективности регистрации по сравнению со счетчиком фотонов, построенном на базе других типов исследуемых ЛФП. Отметим, что в [10] нами было экспериментально установлено, что пропускная способность увеличивается с уменьшением мертвого времени счетчика фотонов.

Для проведения экспериментальных исследований, выполненных в данной работе, счетчик фотонов был построен на основе ЛФП, включенных по схеме пассивного гашения микроплазменного лавинного пробоя. Мертвое время счетчика фотонов при такой схеме включения ЛФП много больше, чем при использовании схемы активного гашения микроплазменного лавинного пробоя [9]. Оценка пропускной способности рассматриваемого канала при включении исследуемых ЛФП по схеме активного гашения показала, что ее значение равно 100 кбит/с, что превышает пропускную способность канала со счетчиком фотонов на основе ЛФП, включенного по схеме пассивного гашения лавины.

Заключение

Построена математическая модель асинхронного оптического канала связи с приемником на основе счетчика фотонов; получено выражение для пропускной способности этого канала, учитывающее статистические распределения числа импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символа «0» и символа «1», а также пороговые уровни регистрации импульсов при передаче этих символов.

Экспериментально определено, что для получения наибольшего значения пропускной способности необходимо подбирать оптимальное значение длительности передачи двоичного символа Δt_c и интенсивности оптического излучения, использующегося для передачи символа «0».

Установлено, что величина перенапряжения влияет на пропускную способность канала связи: для всех исследуемых типов лавинных фотоприемников максимальное значение пропускной способности получено при перенапряжении, которому соответствовал максимум зависимости $\Delta n_s(\Delta U)$.

Получено, что при длительности передачи одного бита информации, равной 20 мкс, и длительности Δt_c , равной длительности защитного интервала, для всех исследуемых типов лавинных фотоприемников пропускная способность принимает максимальное значение.

Увеличить пропускную способность можно путем применения схемы активного гашения лавины ЛФП, что, в сравнении со схемой пассивного гашения, повысит пропускную способность канала связи до 100 кбит/с за счет уменьшения мертвого времени счетчика фотонов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Список использованных источников

1. Килин, С.Я. Квантовая криптография: идеи и практика / С.Я. Килин. – Минск, 2007.
2. Гулаков, И.Р. Исследование скорости передачи информации по оптическому каналу связи с приемником на основе счетчика фотонов / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 4. – С. 31–40.
3. Зеневич, А.О. Пропускная способность оптического канала связи при передаче сообщения отдельными фотонами / А.О. Зеневич, С.К. Комаров, А.М. Тимофеев // Электро-связь. – 2010. – № 10. – С. 14–16.
4. Клюев, Л.Л. Теория электрической связи: учебник / Л.Л. Клюев. – Минск, 2008.
5. Ветохин, С.С. Одноэлектронные фотоприемники / С.С. Ветохин [и др.]. – М., 1986.
6. Гулаков, И.Р. Пропускная способность оптического канала связи при передаче сообщения сигналами малой мощности / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, С.К. Комаров // Доклады БГУИР. – 2009. – № 8 (46). – С. 22–27.
7. Зеневич, А.О. Исследование пропускной способности оптического канала связи, в котором для детектирования сигнала используется счетчик фотонов / А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Доклады БГУИР. – 2011. – № 7(61). – С. 5–9.
8. Грехов, И.В. Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках / И.В. Грехов. – Л., 1980.
9. Гулаков, И.Р. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях / И.Р. Гулаков, С.В. Холондырев. – М., 1989.
10. Гулаков, И.Р. Пропускная способность квантовой оптической системы связи / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 104–109.

Gulakov I.R., Zenevich A.O., Timofeev A.M., Kosari A.G.

Investigation of asynchronous optical communication channel throughput containing a receiver on the basis of photon counter

A mathematical model of asynchronous optical communication channel with a photon counter applied as a receiving module has been built. The expression for calculating of data throughput of this channel has been obtained. As a result of implemented experimental investigations it has been established that the data throughput of asynchronous optical communication channel containing a photon counter on the basis of avalanche photodetector as a receiving module depends on optical radiation and photodetector supply voltage. (E-mail: zao@vks.belpak.by)

Key words: throughput, photon counter, avalanche photodetector.

Поступила в редакцию 02.04.2013.