

Приемное устройство канала утечки оптической информации из многомодового оптоволоконна на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя

И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Т. А. Матковская

В качестве объектов исследований использовались серийно выпускаемые многомодовые оптические волокна G651, кремниевые фотоэлектронные умножители ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035, а также Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл». Получены характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей и каналов утечки информации, сформированных на изгибах разного диаметра многомодового оптического волокна. Показана возможность использования кремниевых фотоэлектронных умножителей для регистрации оптического излучения, выходящего из области изгиба. Установлено, что уменьшение диаметра изгиба многомодового оптического волокна приводит к увеличению пропускной способности канала утечки информации, возникающего в области этого изгиба. Наибольшая пропускная способность образовавшегося при этом канала утечки информации 34,3 Мбит/с получена для диаметра изгиба волокна 5 мм при использовании фотоумножителя ketek PM 3325.

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектронный умножитель, многомодовое оптическое волокно, канал утечки информации, информационная безопасность, волоконно-оптические линии связи.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-86-91

Введение

Передача информации в волоконно-оптических линиях связи осуществляется оптическим излучением, распространяющимся внутри оптического волокна. Для организации направленного распространения оптического излучения используется его полное внутреннее отражение на границе сердцевинки воло-

на и оболочки, имеющих разные показатели преломления. В этом случае луч оптического излучения, направленный в сердцевину, будет распространяться в ней, многократно отражаясь от оболочки [1, 2]. Наличие защитной оболочки затрудняет несанкционированное подключение к волоконно-оптической линии связи. Однако, известны различные способы формирования каналов утечки информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи [3]. Поэтому обеспечение информационной безопасности волоконно-оптических линий связи является важной и актуальной задачей.

Одним из способов доступа к передаваемой информации является формирование изгиба оптического волокна. В результате формирования изгиба часть распространяющегося по оптическому волокну излучения выходит за пределы волокна и может быть зарегистрирована фотоприемником несанкционированного пользователя.

Гулаков Иван Романович, д.ф.-м.н., профессор.

E-mail: i.gulakov@bsac.by

Зеневич Андрей Олегович, д.т.н., профессор, ректор.

E-mail: a.zenevich@bsac.by

Кочергина Ольга Викторовна, аспирант.

E-mail: o.kochergina@bsac.by

Матковская Татьяна Александровна, аспирант.

УО «Белорусская государственная академия связи».

Республика Беларусь, 220114, г. Минск,

ул. Ф. Скорины, 8/2.

Статья поступила в редакцию 21 июня 2022 г.

© Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В.,
Матковская Т. А., 2022

В настоящее время для передачи информации в волоконно-оптических линиях связи на основе многомодового волокна применяется излучение с длиной волны 850 нм [4]. Для регистрации оптического излучения выходящего за пределы волокна необходимы фотоприемники, чувствительные к излучению с данной длиной волны. Такими фотоприемниками являются кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ), которые обладают достаточно большими коэффициентами усиления ($\geq 10^5$) и имеют большие площади фоточувствительной поверхности (до $6 \times 6 \text{ мм}^2$) по сравнению с другими типами лавинных фотоприемников [5]. Таким образом, целью данной статьи является исследование возможности использования Si-ФЭУ для регистрации оптического излучения, выходящего из области изгиба за пределы многомодового оптического волокна.

Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве объектов исследований использовались серийно выпускаемые многомодовые оптические волокна G651. Данные оптические волокна были выбраны для исследований, поскольку они достаточно часто используются в оптических кабелях. Объектом исследований в качестве приемника оптического излучения были выбраны кремниевые фотоэлектронные умножители *ketek PM 3325* и *ON Semi FC 30035*, а также Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» КОФ-1035.

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.

Экспериментальная установка функционирует следующим образом: от источника оптического излучения ИИ в оптическое волокно ОВ вводится излучение с длиной волны 850 нм. Мощность вводимого в волокно оптического излучения могла изменяться в пределах от 100 мкВт до 10 мВт. К выходу волокна ОВ для определения выходной мощности излучения подключен измеритель мощности ИМ. Длина оптического волокна ОВ составляла $L = 550 \text{ м}$, что соответствует максимальной длине оптического волокна, которая используется для реализации технологий Ethernet для объектовых линий связи [6]. Эти технологии в

настоящее время широко используются для передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи. Вблизи выхода волокна ОВ формируется изгиб, представляющий собой окружность. Диаметр этого изгиба можно изменять в пределах от 5 до 30 мм. Отметим, что при диаметре изгиба d меньшем 5 мм может произойти излом оптического волокна, а при $d > 30 \text{ мм}$ интенсивность оптического излучения, выходящего на изгибе волокна за его пределы мала и ей можно пренебречь.

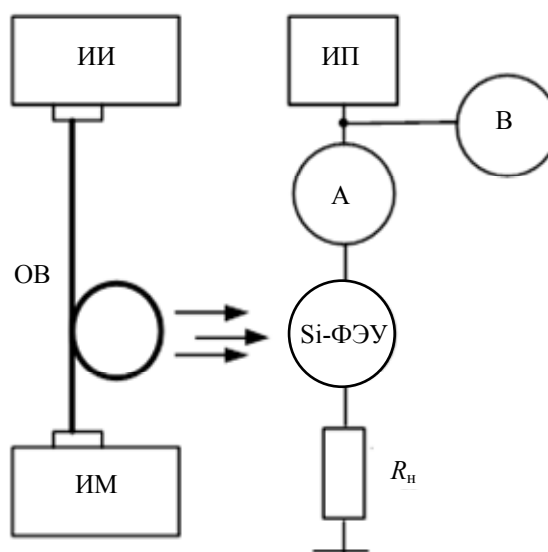


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: ИИ – источник оптического излучения; ИМ – измеритель мощности; ИП – источник питания фотоприемника; А – амперметр; В – вольтметр; ОВ – оптическое волокно; R_n – ограничивающее сопротивление

Выходящее за пределы оптоволокна ОВ в области изгиба передаваемое оптическое излучение регистрируется при помощи Si-ФЭУ.

На Si-ФЭУ от источника постоянного напряжения ИП подается напряжение питания U_n . Для работы кремниевого фотоэлектронного умножителя используются напряжения питания, превышающие напряжения пробоя p - n -перехода [7]. В этом случае происходит лавинное усиление первичных свободных носителей заряда (самогасящийся лавинный процесс), образующихся внутри области пространственного заряда отдельного элемента при поглощении оптического излучения или в результате тепловой генерации носителей, и появление электрического сигнала на выходе Si-ФЭУ. Протекание электрического тока че-

рез последовательное сопротивление фотоприемника $R_{\text{посл}}$, вызывает падение напряжения на сработавшем фоточувствительном элементе, что приводит к гашению лавинного процесса. Локализация лавинного процесса происходит в пределах засвеченных элементов, при этом остальная часть фоточувствительных элементов остается в рабочем состоянии, готовом к регистрации излучения. Через время τ , зависящее от конструкции Si-ФЭУ, напряжение на сработавшем элементе восстанавливается до первоначального значения и элемент снова становится чувствительным к оптическому излучению. Вклад в электрический сигнал на выходе Si-ФЭУ вносит каждый сработавший фоточувствительный элемент [8].

Значение $R_{\text{посл}}$ определялось по обратной ветви вольт-амперной характеристики Si-ФЭУ [8]. Для исследуемых приемников оптического излучения его значение находилось в диапазоне $10^5 \div 10^6$ Ом.

Величина напряжения питания контролируется при помощи вольтметра В. Амперметр А используется для измерения электрического тока I , протекающего через Si-ФЭУ.

Для ограничения величины тока I применяется резистор нагрузки $R_{\text{н}}$. Величина сопротивления резистора нагрузки $R_{\text{н}} = 500$ Ом.

При определении фототока $I_{\text{ф}}$ измеряют величины электрического тока $I_{\text{т}}$, протекающего через Si-ФЭУ в отсутствии оптического излучения в волокне, и при его наличии I соответственно. После чего фототок вычисляется по формуле: $I_{\text{ф}} = I - I_{\text{т}}$.

Чувствительность фотоприемника S определяется по методике, описанной в [9, 10], на линейном участке зависимости мощности оптического излучения P от тока $I_{\text{ф}}$, как $S = P/I_{\text{ф}}$. Для получения этой зависимости на Si-ФЭУ подается оптическое излучение заданной мощности с выхода волокна ОВ. Оптическое излучение заданной мощности создавалось за счет изменения диаметра изгиба волокна. Перед направлением оптического излучения с выхода волокна ОВ на Si-ФЭУ, мощность этого излучения определялась измерителем мощности ИМ.

Пропускная способность канала утечки информации из оптоволоконного П, в котором в качестве фотоприемника использовался Si-ФЭУ, определялась по формуле Шеннона [6]:

$$\Pi = B \log_2 \left(1 + \frac{I_{\text{ф}}^2}{I_{\text{ш}}^2} \right), \quad (1)$$

где B – ширина полосы частот; $I_{\text{ш}}^2$ – величина, определяющая уровень шумов фотоприемника, $I_{\text{ф}}^2 / I_{\text{ш}}^2$ – отношение сигнал/шум.

Величина ширины полосы частот определяется как:

$$B = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (2)$$

где C – емкость Si-ФЭУ, определялась по вольт-фарадной характеристике; R – выходное сопротивление. Выходное сопротивление находится по следующей формуле:

$$R = \frac{R_{\text{посл}} R_{\text{н}}}{R_{\text{посл}} + R_{\text{н}}}. \quad (3)$$

Интенсивность оптического излучения, регистрируемого фотоприемником с изгиба оптического волокна определялась на основании выражения:

$$J = \frac{S \cdot I_{\text{ф}}}{A}, \quad (4)$$

где A – площадь чувствительной поверхности фотоприемника.

Исследования были выполнены при температуре окружающей среды $T = 293$ К.

Результаты измерений и их обсуждение

В процессе проведения исследований были определены характеристики Si-ФЭУ при напряжениях питания, соответствующих их максимальной чувствительности. Следует отметить, что максимум чувствительности кремниевых фотоэлектронных умножителей соответствует напряжению пробоя p - n -перехода. Полученные характеристики Si-ФЭУ для данного напряжения представлены в табл. 1.

Наибольшую чувствительность имеют фотоприемники *ketek PM 3325*, а наименьшую – КОФ5-1035, равную $S = 0,06; 0,04$ и $0,01$ А/Вт для *ketek PM 3325*, *ON Semi FC 30035* и КОФ5-1035 соответственно. Также наименьшее значение пороговой мощности соответ-

ствует *ketek PM 3325*, а наибольшее КОФ5-1035. Поэтому фотоприемник марки *ketek PM 3325* способен регистрировать оптические сигналы меньшей интенсивности, чем *ON Semi FC 30035* и КОФ5-1035.

На рисунке 2 приведены зависимости отношения сигнал/шум фотоприемников от диаметра изгиба оптического волокна. Эти зависимости получены для мощности оптического излучения, вводимого в оптоволокно равного 10 мкВт. Наибольшее значение интенсивности оптического излучения J , поступающего на фотоприемник с боковой поверхности волокна для исследуемого диапазона диаметров изгиба, соответствовало $d = 5$ мм, и уменьшалось до нуля при $d > 30$ мм [11]. Так

для диаметра изгиба $d = 5$ мм величина интенсивности излучения $J = 260$ мВт/мм², а при $d = 20$ мм – $J = 18,1$ мВт/мм². Зависимость интенсивности оптического излучения от диаметра изгиба волокна представлена на рис. 2 (кривая 4). Эта зависимость не является линейной. Наибольшее изменение интенсивности оптического излучения ΔJ наблюдается при изменении d от 5 до 15 мм. В этом интервале изменений диаметра величина $\Delta J/\Delta d = -13,3$ мВт/мм³, где Δd – изменение диаметра изгиба оптического волокна. В интервале значений d от 15 до 30 мм величина $\Delta J/\Delta d = -4,0$ мВт/мм³. В этом интервале значений диаметров изгиба волокна зависимость J от d была достаточно близка к линейной.

Таблица 1

Характеристики кремниевых фотозлектронных умножителей

Тип Si-ФЭУ	Напряжение питания, В	Площадь чувствительной поверхности, мм ²	Длина волны, нм	Пороговая мощность, нВт
КОФ5-1035	31,0	1,25×1,25	850	13,0
<i>ON Semi FC 30035</i>	24,7	3×3		10,7
<i>ketek PM 3325</i>	27,0	3×3		9,9

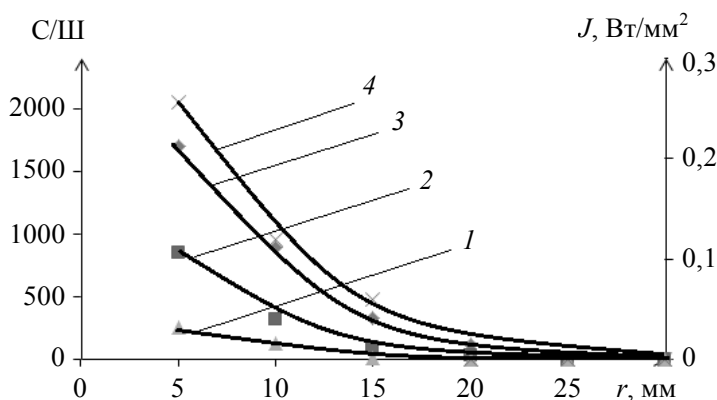


Рис. 2. Зависимости отношения сигнал/шум и интенсивности оптического излучения от диаметра изгиба оптоволокна: 1 – *ketek PM 3325*; 2 – *ON Semi FC 30035*; 3 – КОФ5-1035; 4 – интенсивность оптического излучения

Анализ результатов измерений, представленных на рис. 2, показывает, что изменение отношения сигнал/шум от диаметра изгиба в основном определяется поведением зависимости J от d . Отличие зависимостей отношения сигнал/шум от d для исследуемых Si-ФЭУ обусловлено различной чувствительностью S и уровнем собственных шумов фотоприемников. Во всем исследуемом диапазоне значений d наибольшее отношение сигнал/шум наблюдались для *ketek PM 3325*, а наименьшее – для КОФ5-1035.

Так как площади фоточувствительной поверхности фотоприемников разные, то и

электрические емкости у них отличаются между собой. Величина выходного сопротивления составляла около 500 Ом. Поэтому ширина полосы пропускания для таких фотоприемников различная (табл. 2).

Исходя их формулы (1) пропускная способность зависит от ширины полосы частот пропускания и отношения сигнал/шум. Увеличение отношения сигнал/шум в 1000 раз приводит к увеличению пропускной способности всего в 10 раз. Таким образом, величина пропускной способности определяется в большей степени шириной полосы пропускания и в меньшей отношении сигнал/шум.

Таблица 2

Характеристики канала съема информации с оптического волокна

Тип Si-ФЭУ	Емкость, пФ	Ширина полосы пропускания, МГц	Мощность оптического излучения, поступающая на изгиб, Вт	Диаметр изгиба, мм	Отношение сигнал/шум	Пропускная способность, МГц
КОФ5-1035	80	4,0	10^{-5}	5	250	32,0
<i>ON Semi FC 30035</i>	90	3,5			830	33,9
<i>ketek PM 3325</i>	100	3,2			1700	34,3

Как видно из рис. 3 увеличение диаметра изгиба волокна приводит к уменьшению пропускной способности П для всех исследуемых Si-ФЭУ. Такое поведение зависимостей в основном определяется изменением значения отношений сигнал/шум с увеличением диаметра изгиба (рис. 2). Зависимости пропускной способности от диаметра изгиба в диапазоне от 5 до 15 мм достаточно близки к линейной для всех исследуемых фотоприемников. Для этого участка зависимости оценка влияния изменения диаметра изгиба Δd на уменьшение пропускной способности $\Delta П$ определялась по отношению $\Delta П/\Delta d$. В диапазоне диаметров от 5 до 15 мм $\Delta П/\Delta d = -0,40$; $-0,38$ и $-0,36$ МГц/мм для *ketek PM 3325*, *ON Semi FC 30035* и *КОФ5-1035* соответственно. Таким образом, наибольшая зависимость изменения пропускной способности П от изменения диаметра изгиба волокна наблюдается для *ketek PM 3325*, а наименьшая – для *КОФ5-1035*.

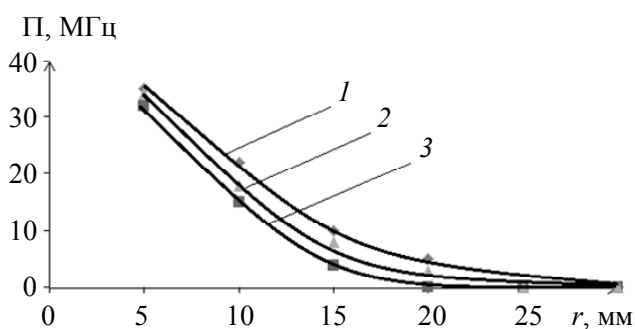


Рис. 3. Зависимость пропускной способности канала утечки информации от диаметра изгиба оптоволокна: 1 – *ketek PM 3325*; 2 – *ON Semi FC 30035*; 3 – *КОФ5-1035*

Несмотря на то, что *ketek PM 3325* имеют самый высокий уровень дробового шума среди всех исследуемых фотоприемников, а *КОФ5-1035* самый низкий, большая площадь фоточувствительной поверхности *ketek PM 3325*

позволяет эффективнее регистрировать передаваемое оптическое излучение из изгиба волокна. Наибольшее значение пропускной способности во всем исследуемом диапазоне диаметров изгиба наблюдается при использовании фотоприемника *ketek PM 3325*, а наименьшее – *КОФ5-1035*. Отметим, что наибольшая пропускная способность, которую удалось получить для канала утечки информации с изгиба оптического волокна, составляла 34,3 Мбит/с. Такая величина П достигается при использовании фотоприемника *ketek PM 3325*.

Заключение

Получена зависимость интенсивности оптического излучения от диаметра изгиба многомодового волокна, которая является нелинейной. Для этой зависимости наибольшее изменение интенсивности оптического излучения наблюдается при изменении диаметра изгиба от 5 до 15 мм.

Установлено, что уменьшение диаметра изгиба многомодового оптического волокна приводит к увеличению пропускной способности канала утечки информации, формируемого в области этого изгиба.

Показана возможность использования кремниевых фотоэлектронных умножителей для регистрации оптического излучения, выходящего из области изгиба за пределы многомодового оптического волокна. Наибольшая пропускная способность образовавшегося канала утечки информации равная 34,3 Мбит/с получена при диаметре изгиба волокна 5 мм для фотоприемника *ketek PM 3325*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001.

2. Govind P. Agrawal *Fiber-Optic Communication Systems*. – New York: Wiley-Interscience, 2002.
3. Зеневиц А. О. Обнаружители утечки информации из оптического волокна. – Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017.
4. Унгер Г. Оптическая связь. – М.: Связь, 1979.
5. Staglianoa M., Abegãob L., Chierici A., d'Erricoa F. // EPH – International Journal of Science and Engineering. 2018. № 10. P. 10.
6. Шубин В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.
7. Клемин С. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 8. С. 80.
8. Гулаков И. Р., Зеневиц А. О. Фотоприемники квантовых систем. – Минск: ВГКС, 2012.
9. Гулаков И. Р., Зеневиц А. О., Кочергина О. В. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 2. С. 164.
10. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприёмные устройства. Термины и определения. ГОСТ-21934–83. – М.: Издательство стандартов, 1988.
11. Зеневиц А. О., Василевский Г. В., Новиков Е. В. и др. // Веснік сувязі. 2019. № 3 (155). С. 55.

PACS: 85.60.-q

Receiving device for optical information leakage channel from multimode fiber based on silicon photomultiplier

I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, and T. A. Matkovskaya

Educational Institution “Belarusian State Academy of Communications”
8/2 F. Skorina st., Minsk, 220114, Belarus

Received June 21, 2022

Commercially available G651 multimode optical fibers and silicon photomultipliers ketek RM 3325, ON Semi FC 30035 and manufactured by OAO “Integral” have been used in this article as objects of research. The characteristics of silicon photomultipliers and information leakage channels formed on bends of different diameter of a multimode optical fiber have been obtained. The possibility of using silicon photomultipliers for registration of optical radiation emerging from the bend region has been shown. It has been established that a decrease in the bending diameter of a multimode optical fiber results in an increase in the bandwidth of the information leakage channel that occurs in the region of this bend. The maximum throughput of the resulting information leakage channel of 34.3 Mbps has been obtained for a fiber bending diameter of 5 mm using a ketek PM 3325 photodetector.

Keywords: silicon photomultiplier, multimode optical fiber, information leakage channel, information security, fiber optic communication lines.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-86-91

REFERENCES

1. R. R. Ubaidullaev, *Fiber-optic networks*. (Eko-Trendz, Moscow, 2001).
2. P. Govind, *Agrawal Fiber-Optic Communication Systems*. (Wiley-Interscience, New York, 2002).
3. A. O. Zenevich, *Information leakage detectors from optical fiber*. (Belorusskaya gosudarstvennaya akademiya svyazi, Minsk, 2017).
4. G. Unger, *Optical communication*. (Svyaz', Moscow, 1979).
5. M. Staglianoa, L. Abegãob, A. Chierici, and F. d'Erricoa, EPH – International Journal of Science and Engineering **10**, 10 (2018).
6. V. V. Shubin, *Information security of fiber optic systems*. (RFYaTs-VNIIEF, Sarov, 2015).
7. S. Klemin, *ELECTRONICS: Science, Technology, Business*, No. 8, 80 (2007).
8. I. R. Gulakov and A. O. Zenevich, *Photodetectors of quantum systems*. (VGKS, Minsk, 2012).
9. I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, and O. V. Kochergina, *Usp. Prikl. Fiz.* **9** (2), 164 (2021).
10. Semiconducting photoelectric detectors and receiving photoelectric devices. Terms and definitions. GOST 21934–83. (Standards publishing house, Moscow, 1988).
11. A. O. Zenevich, G. V. Vasilevsky, E. V. Novikov et al., *Vesnik Suvyaz*, No. 3 (155), 55 (2019).