

Научная статья

УДК 621.382

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-44-49



Исследование канала утечки информации в области изгиба оптического волокна

Иван Романович Гулаков¹, gulakov@bsu.by

Андрей Олегович Зеневич¹, a.zenevich@bsac.by

Ольга Викторовна Кочергина¹ ✉, o.kochergina@bsac.by

Татьяна Александровна Матковская¹, t.matkovskaya@bsac.by

¹Белорусская государственная академия связи,
Минск, 220114, Республика Беларусь

Аннотация: Данная работа посвящена исследованию канала утечки передаваемой информации, созданного на основе изгиба волокна. Установлено, что увеличение диаметра изгиба оптического волокна приводит к уменьшению мощности оптического излучения, выходящего за пределы этого изгиба. В диапазоне диаметров изгиба от 5 до 20 мм наибольшее значение мощности излучения наблюдалось для оптического волокна G.655, а наименьшее – для G.657. Определена пропускная способность для канала утечки информации при изменении диаметра изгиба для разных типов оптического волокна. Показано, что пропускная способность канала утечки информации зависит от местоположения фотоприемника, применяемого для регистрации оптического излучения, снимаемого с изгиба оптического волокна.

Ключевые слова: германиевый фотодиод, оптическое волокно, изгиб оптического волокна, канал утечки информации, пропускная способность

Ссылка для цитирования: Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Кочергина О.В., Матковская Т.А. Исследование канала утечки информации в области изгиба оптического волокна // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 44–49. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-44-49

Investigation of an Information Leakage Channel in the Area of Optical Fiber Bending

Ivan Gulakov¹, gulakov@bsu.by

Andrey Zenevich¹, a.zenevich@bsac.by

Olga Kochergina¹ ✉, o.kochergina@bsac.by

Tatiana Matkovskaia¹, t.matkovskaya@bsac.by

¹Belarusian State Academy of Communications,
Minsk, 220114, Republic of Belarus

Abstract: An information leakage channel created on the basis of fiber bending when transmitting information over an optical fiber is studied. An increase in the bending diameter of an optical fiber is shown to lead to a decrease in the power of optical radiation proceeding from it. In a bending diameter range from 5 to 20 mm, the highest radiation power was observed for the optical fiber G.655, while the lowest corresponding figure was recorded for G.657. The information leakage channel bandwidth with changed bending diameter is determined for different types of optical fiber. The bandwidth of the information leakage channel is shown to depend on the location of the photo-detector used to register optical radiation taken from the bend of the optical fiber.

Keywords: germanium photodiode, optical fiber, optical fiber bends, bandwidth

For citation: Gulakov I., Zenevich A., Kochergina O., Matkovskaya T. Investigation of an Information Leakage Channel in the Area of Optical Fiber Bending. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(3):44–49. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-44-49

Введение

В настоящее время большую популярность получили одномодовые оптические волокна, которые имеют малое затухание передаваемого сигнала, низкий уровень шума, высокую пропускную способность, устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям и пр. [1–3]. Несмотря на то, что оптические волокна обладают защитой от несанкционированного доступа, известны различные способы формирования каналов утечки информации. Одним из этих способов является создание такого канала при помощи изгиба оптического волокна [4]. При появлении изгиба определенного диаметра происходит изменение угла падения оптического излучения на границу раздела сердцевина-оболочка. В результате этого часть распространяемого по волокну излучения выходит за его пределы в месте изгиба [5, 6]. Зарегистрировать данное излучение можно, направив его на фотоприемник. Таким образом, создается канал утечки передаваемой информации. Часто для формирования такого канала используются ответвители-прищепки [7]. Например, волоконно-оптический ответвитель-прищепка FOD 5503 обеспечивает двунаправленное подключение к одномодовому волокну с 250-микронным покрытием без его разрыва, однако он не позволяет сформировать канал утечки информации в одномодовом оптическом волокне G.657. В работе [6] описан более простой способ создания канала утечки информации, который заключается в формировании изгиба волокна и направлении выходящего за пределы волокна оптического излучения непосредственно на фоточувствительную площадку фотоприемника. Такой способ можно использовать для любого одномодового волокна не зависимо от производителя. Однако в настоящее время отсутствуют сведения о пропускной способности такого канала утечки информации. Это необходимо для реализации мер по защите информации, передаваемой по оптическому волокну, от утечки по такому каналу. Поэтому целью данной статьи является определить пропускную способность канала утечки информации из оптического волокна в зависимости от диаметра изгиба волокна, места расположения фотоприемника и типа оптического волокна.

Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве объектов исследований использовались одномодовые оптические волокна G.652, G.655 и G.657 производства CORNING с диаметром оболочки 125 мкм, так как они наиболее часто

применяются в современных системах связи. Для регистрации оптического излучения в канале утечки информации использовался германиевый фотодиод ФД-10ГА. Это полупроводниковый фотодиод с одним *p-n*-переходом, имеющий высокую чувствительность в инфракрасной области спектра оптического излучения [8].

На рисунке 1 представлена структурная схема экспериментальной установки, которая функционирует следующим образом: от источника излучения «ИИ» в оптическое волокно «ОВ» вводится излучение. В качестве источника излучения использовались волоконно-оптические лазерные модули ВОЛМ-10-М. Длины волн генерации лазерных диодов этих модулей составляли: 1310 ± 5 ; 1490 ± 5 ; 1550 ± 5 ; 1610 ± 5 нм. Эти длины волн используются для передачи информации в одномодовом оптическом волокне [9] и соответствуют области чувствительности германиевого фотодиода [8, 10]. Для определения мощности излучения на выходе волокна был подключен измеритель «ИМ».

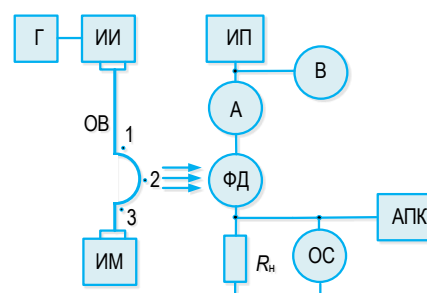


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

Fig. 1. Block Diagram of the Experimental Setup

Протяженность оптического волокна «ОВ» составляла $L = 1,00 \pm 0,02$ м. Коэффициент затухания исследуемых волокон не превышал 0,4 дБ/км. Таким образом, потерей мощности оптического излучения, распространяющегося в оптическом волокне этой протяженности, можно было пренебречь.

Перед началом формирования изгиба защитное покрытие с оптического волокна снималось. Изгиб формировался в виде полукружности. Для этого использовались специально изготовленные цилиндры с диаметрами 5, 10, 15, 20 и 30 мм. Выбор таких диаметров изгиба обусловлен тем, что при $d < 5$ мм может произойти излом оптического волокна. Для $d > 30$ мм наличие изгиба не оказывало влияние на потерю мощности оптического излучения в волокне [11].

Оптическое излучение источника «ИИ» модулировалось путем подачи на него импульсов от гене-

ратора прямоугольных электрических импульсов «Г» (см. рисунок 1). Длительность оптических импульсов составляет 1 мкс, а частота их следования – 0,5 МГц. Оба этих параметра подбирались из условия, чтобы они соответствовали ширине полосы частот канала утечки информации. При этом средняя мощность вводимого в волокно оптического излучения составляла 1 мВт для каждого лазерного диода модуля ВОЛМ-10-М.

В области изгиба оптического волокна происходит выход транслируемого оптического излучения за пределы волокна «ОВ». Это излучение регистрируется при помощи фотодиода «ФД» (см. рисунок 1). Питание фотодиода осуществляется с помощью источника питания «ИП». Величина напряжения питания контролируется при помощи вольтметра «В». Амперметр «А» используется для определения электрического тока I , протекающего через фотодиод «ФД». Для ограничения величины тока I применяется резистор нагрузки $R_n = 1$ кОм, который включен последовательно с фотодиодом.

При поступлении на фотодиод импульсов оптического излучения с изгиба волокна на сопротивлении нагрузки формируются импульсы напряжения, которые отображаются на осциллографе «ОС». Также импульсы напряжения поступают на аппаратно-программный комплекс «АПК». Комплекс выполняет преобразование импульсов напряжения в дискретный код. Дискретные коды накапливаются в «АПК». При помощи этих кодов вычисляются среднее значение амплитуды импульсов напряжения и их СКО.

Чувствительность фотоприемника определяется по методике, описанной в [12], на линейном участке зависимости мощности оптического излучения P_f от фототока I_f . Фототок I_f определяется как $I_f = I - I_m$, где I_m – электрический ток, протекающий через фотодиод «ФД» в отсутствии оптического излучения в волокне; I – электрический ток, протекающий через фотодиод «ФД» при наличии оптического излучения в волокне.

В результате исследования определялось отношение сигнал/шум ρ по формуле:

$$\rho = \frac{U_m}{\sigma}, \quad (1)$$

где U_m – средняя амплитуда импульсов напряжения при регистрации оптического излучения, ответвленного с изгиба волокна; σ – среднеквадратическое отклонение амплитуды этих импульсов.

Пропускную способность канала утечки информации Π можно определить по формуле Шеннона [6]:

$$\Pi = B \times \log_2(1 + \rho^2), \quad (2)$$

где B – ширина полосы пропускания канала.

Величина B определяется следующим образом:

$$B = \frac{1}{2\pi R_n C}, \quad (3)$$

где R_n – сопротивление нагрузки фотоприемника; C – электрическая емкость фотоприемника.

На рисунке 1 показаны точки 1, 2 и 3, в которые помещается фотодиод для измерения мощности оптического излучения, снимаемого с изгиба оптического волокна. Данные точки выбраны вдоль изгиба оптического волокна: точка 1 располагалась в месте поступления оптического излучения в изгиб; точка 2 – в середине изгиба; точка 3 – в конце изгиба. При помещении фотодиода в любую из этих точек кратчайшее расстояние от изгиба волокна до фотодиода оставалось одинаковым и составляло 1 мм. В этих точках определялась пропускная способность Π .

Исследования были выполнены при комнатной температуре окружающей среды $T = 293$ К для всех указанных точек.

Результаты измерений и их обсуждение

Поскольку в технической документации на фотодиод ФД-10ГА отсутствуют сведения о его чувствительности на исследуемых длинах волн, то нами были выполнены измерения этой характеристики. Данные о чувствительности фотодиода ФД-10ГА представлены в таблице 1 и получены при напряжении питания фотодиода 3,0 В. Как видно, наибольшее значение чувствительности соответствует длине волны 1490 нм, а наименьшее – 1610 нм.

ТАБЛИЦА 1. Чувствительность фотодиода ФД-10ГА

TABLE 1. Sensitivity of Photodiode FD-10GA

Длина волны, нм	1310	1490	1550	1610
Чувствительность, А/Вт	0,13	0,16	0,15	0,03

В процессе исследований были определены зависимости регистрируемой фотодиодом мощности оптического излучения, выходящего за пределы волокна, от диаметра изгиба для исследуемых длин волн излучения. На рисунке 2 представлены полученные зависимости для различных оптических волокон и длины волны 1610 нм. Измерения выполнены для точки 1 (см. рисунок 1), где наблюдалась наибольшая мощность оптического излучения для всех длин волн и диаметров изгиба независимо от типа оптического волокна. Как следует из полученных зависимостей, увеличение диаметра изгиба волокна приводит к уменьшению мощности оптического излучения, выходящего за его пределы и поступающего на фотодиод. Во всем диапазоне диаметров наибольшее значение мощности излучения P_f наблюдалось для оптического волокна G.655, а наименьшее – для G.657. При других длинах волн излучения эти зависимости имели аналогичный вид и поведение, что также под-

тверждается экспериментальными данными. В таблице 2 представлены результаты измерений мощности P_{Φ} , полученной для различных длин волн и точек расположения фотодиода, при диаметре изгиба 5 мм.

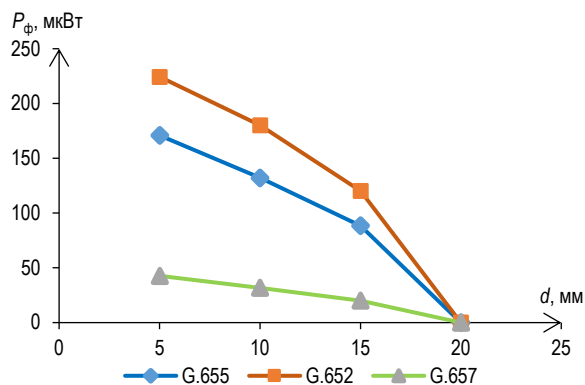


Рис. 2. Зависимость мощности оптического излучения от диаметра изгиба для различных типов оптоволокон

Fig. 2. Dependence of Optical Radiation Power on Bend Diameter for Different Types of Optical Fibers

ТАБЛИЦА 2. Характеристики изгибов оптического волокна
TABLE 2. Characteristics of Optical Fiber Bends

Оптическое волокно	Длина волны, нм	Мощность оптического излучения, мВт		
		Точка 1	Точка 2	Точка 3
G.655	1310	65,5	29,1	16,9
	1490	78,2	36,6	19,0
	1550	101,4	40,1	23,2
	1610	224,4	96,2	53,4
G.652	1310	35,2	23,0	10,6
	1490	41,6	26,6	10,8
	1550	61,2	32,5	12,7
	1610	170,9	74,8	13,3
G.657	1310	10,7	6,3	3,2
	1490	18,5	10,7	4,7
	1550	19,4	15,0	8,3
	1610	42,7	32,7	21,4

Как следует из данных таблицы 2, увеличение длины волны передаваемого по волокну излучения приводило к росту величины P_{Φ} для всех оптических волокон и точек расположения фотодиода. Чем больше расстояние от источника оптического излучения до рассматриваемой точки расположения фотодиода, тем меньше значение мощности P_{Φ} . Это обусловлено тем, что по всей длине изгиба волокна наблюдается выход части оптического излучения за пределы волокна. Поэтому в точку 3, находящуюся дальше от источника оптического излучения, поступает меньшая мощность оптического излучения, чем в точку 1, находящуюся ближе к источнику.

Выполнена оценка пропускной способности канала утечки информации при разных диаметрах изгиба и длинах волн оптического излучения. Для этого вначале была определена ширина полосы частот канала утечки информации B , которая в основном определялась электрической емкостью фотодиода $C = 35$ пФ и сопротивлением нагрузки $R_n \approx 1$ кОм и составила $B = 4,5$ МГц.

Зависимости пропускной способности канала утечки информации от диаметра изгиба, полученные для оптического волокна G.655 и точки 1 расположения фотодиода, для различных длин волн оптического излучения представлены на рисунке 3. Точка 1 была выбрана потому, что для нее наблюдались наибольшие значения пропускной способности для всех длин волн и диаметров изгиба независимо от типа оптического волокна.

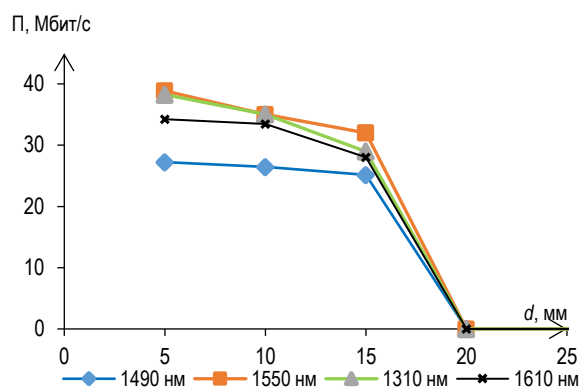


Рис. 3. Зависимость пропускной способности от диаметра изгиба для различных длин волн оптического излучения

Fig. 3. Dependence of the Bandwidth on the Diameter of the Bend for Different Wavelengths of Optical Radiation

Из полученных зависимостей следует, что при диаметре изгиба 5 мм значение пропускной способности было максимальным для всех длин волн. Для диаметров изгиба волокна от 5 до 15 мм пропускная способность уменьшается, и эта зависимость была близка к линейной. При диаметре изгиба 20 мм и более пропускная способность становилась равной нулю. Для других оптических волокон эти зависимости имели аналогичный вид и поведение. Наибольшая пропускная способность для всех исследуемых длин волн оптического излучения при одинаковой мощности, поступающей на вход оптического волокна, наблюдалась для изгибов с диаметром 5 мм при длине волны 1490 нм. Величина пропускной способности в этом случае составляла 34, 39, 33 Мбит/с для оптических волокон G.652, G.655 и G.657, соответственно. Таким образом, наибольшую пропускную способность удастся получить для волокна G.655. Максимальное значение пропускной способности излучения с длиной волны 1490 нм для всех диаметров изгиба связано с тем, что фотодиоды ФД-10ГА имеют наибольшую чувствительность на этой длине волны (см. таблицу 1).

В таблице 3 представлены значения отношения сигнал/шум и пропускной способности для различных длин волн и точек расположения фотодиода (см. рисунок 1) при диаметре изгиба 5 мм.

ТАБЛИЦА 3. Характеристики канала утечки информации

TABLE 3. Leakage Channel Characteristics

Оптическое волокно	Длина волны, нм	Точки 1 / 2 / 3	
		Отношение сигнал/шум	Пропускная способность, Мбит/с
G.655	1310	13,9 / 13,1 / 9,0	34,2 / 33,4 / 28,0
	1490	20,0 / 15,5 / 9,4	39,0 / 35,8 / 30,0
	1550	18,2 / 14,5 / 9,0	37,6 / 34,5 / 28,6
	1610	9,6 / 7,2 / 4,5	29,5 / 25,9 / 20,0
G.652	1310	9,4 / 7,4 / 6,1	29,1 / 26,1 / 23,7
	1490	13,7 / 9,2 / 7,8	34,0 / 28,9 / 26,8
	1550	11,5 / 8,4 / 6,7	31,7 / 27,7 / 24,8
	1610	7,9 / 6,4 / 5,7	27,0 / 24,3 / 22,9
G.657	1310	6,6 / 5,3 / 4,8	24,6 / 21,9 / 20,7
	1490	12,5 / 6,7 / 6,1	32,8 / 24,7 / 23,7
	1550	8,7 / 5,5 / 5,1	28,1 / 22,4 / 21,5
	1610	4,0 / 3,5 / 2,6	18,4 / 16,9 / 13,1

Для одного и того же оптического волокна и неизменной длины волны оптического излучения наблюдалось следующее: чем больше расстояние от источника оптического излучения до рассматриваемой точки расположения фотодиода, тем меньше значение пропускной способности канала утечки информации в этой точке. Это обусловлено тем, что чем дальше находится точка от источника оптического излучения, тем меньшая мощность оптического излучения доходит до нее и тем меньше для нее значение отношения сигнал/шум (см. таблицу 3), а пропускная способность при постоянной полосе частот B зависит от отношения сигнал/шум – выше пропускная способность.

Выполнено сравнение пропускной способности двух каналов связи. Один канал связи создан на основе оптического волокна длиной 1 м, в котором отсутствуют изгибы. Другой – такой же длины, но с изгибом волокна (канал утечки информации). Для передачи информации в эти волокна подавались импульсы оптического излучения одинакового вида и мощности. Длина волны составляла 1310 нм, так как излучение на этой частоте испыты-

тывает меньшие потери мощности в области изгиба по сравнению с другими длинами волн [13, 14]. Для регистрации оптического излучения в этих каналах использовался фотодиод ФД-10ГА. Было установлено, что пропускная способность канала утечки информации меньше, чем канала связи на основе оптического волокна без изгибов. Пропускная способность последнего составляла 60 Мбит/с для всех исследуемых волокон. Пропускная способность канала утечки информации при диаметре изгиба волокна 5 мм имела значения приблизительно 29, 34 и 25 Мбит/с для волокон G.652, G.655 и G.657, соответственно. Это составляет в среднем 49 % от пропускной способности канала на основе оптического волокна без изгибов.

Заключение

Установлено, что увеличение диаметра изгиба оптического волокна приводит к уменьшению мощности оптического излучения, выходящего за его пределы. Во всем диапазоне диаметров наибольшее значение мощности этого излучения наблюдалось для оптического волокна G.655, а наименьшее – для G.657.

Установлено, что пропускная способность канала утечки информации, сформированного в области изгиба оптического волокна, зависит от типа волокна и диаметра его изгиба. Так уменьшение диаметра изгиба приводило к увеличению пропускной способности канала утечки информации. При диаметре изгиба 5 мм значение пропускной способности было максимальным для всех исследуемых длин волн. При диаметре изгиба 20 мм и более пропускная способность канала утечки информации была равной нулю. Для одинаковых диаметров изгиба оптического волокна пропускная способность канала утечки информации была меньше у волокна G.657 при всех исследуемых длинах волн излучения.

Показано, что пропускная способность канала утечки информации зависит от местоположения фотодиода, применяемого для регистрации оптического излучения, снимаемого с изгиба оптического волокна. Чем дальше расстояние от источника оптического излучения до точки изгиба волокна, с которой регистрируется излучение фотодиодом, тем меньше значение пропускной способности канала утечки информации.

Список источников

1. Govind P. Agrawal Fiber-Optic Communication Systems. New York: Wiley-Interscience, 2002. 530 p.
2. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М: Техносфера, 2010. 576 с.
3. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2001. 263 с.
4. Зеневич А.О. Обнаружители утечки информации из оптического волокна. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. 143 с.
5. Унгер Г. Оптическая связь. М.: Связь, 1979. 264 с.
6. Шубин В.В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. 257 с.

7. Iqbal M.Z., Fathallah H., Belhadj N. Optical fiber tapping: Methods and precautions // Proceedings of the 8th International Conference on High-capacity Optical Networks and Emerging Technologies (Riyadh, Saudi Arabia, 19–21 December 2011). IEEE, 2011. PP. 164–168. DOI:10.1109/HONET.2011.6149809
8. Бараночников М.Л. Приемники инфракрасного излучения. Состояние разработок и промышленного выпуска, перспективы развития и прогнозы. Аналитический обзор. М.: 1985. 94 с.
9. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСА Рарт, 2003. 107 с.
10. Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Кочергина О.В., Матковская Т.А. Характеристики германиевых лавинных фотодиодов в режиме счета фотонов // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2022. Т. 67. № 2. С. 228–235. DOI:10.29235/1561-8358-2022-67-2-222-229
11. ГОСТ Р 52266–2020 Кабели оптические. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2020.
12. ГОСТ 17772–88 Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. М.: Издательство стандартов, 1988. 64 с.
13. Рекомендация МСЭ-Т G652 (11/2016) Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля.
14. Рекомендации МСЭ-Т G657 (11/2016) Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля, не чувствительного к потерям на изгибе.

References


1. Govind P. Agrawal *Fiber-Optic Communication Systems*. New York: Wiley-Interscience; 2002. 530 p.
2. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Fiber-Optic Technology: Current State and New Prospects*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2010. 576 p. (in Russ.)
3. Ubaydullaev R.R. *Fiber-Optic Networks*. Moscow: Eco-Trends Publ.; 2001. 263 p. (in Russ.)
4. Zenevich A.O. *Detectors of Information Leakage from Optical Fiber*. Minsk: Belarusian State Academy of Communications Publ.; 2017. 143 p. (in Russ.)
5. Unger G. *Optical Communication*. Moscow: Svyaz' Publ.; 1979. 264 p. (in Russ.)
6. Shubin V.V. *Information Security of Fiber-Optic Systems*. Sarov: Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics Publ.; 2015. 257 p. (in Russ.)
7. Iqbal M.Z., Fathallah H., Belhadj N. Optical fiber tapping: Methods and precautions. *Proceedings of the 8th International Conference on High-capacity Optical Networks and Emerging Technologies, 19–21 December 2011, Riyadh, Saudi Arabia*. IEEE; 2011. p.164–168. DOI:10.1109/HONET.2011.6149809
8. Baranochnikov M.L. *Infrared Radiation Receivers. The State of Development and Industrial Output, Development Prospects and Forecasts. Analytical Review*. Moscow: 1985. 94 p. (in Russ.)
9. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Optical Fibers for Communication Lines*. Moscow: LESA Rart Publ.; 2003. 107 p. (in Russ.)
10. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Kochergina O.V., Matkovskaia T.A. Study of the characteristics of germanium avalanche photodiodes in the photon counting mode. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series*. 2022;67(2):228–235. DOI:10.29235/1561-8358-2022-67-2-222-229
11. GOST R 52266–2020 *Fibre optical cables. General specifications*. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (in Russ.)
12. GOST R 17772–88 *Semiconducting photoelectric detectors and receiving photoelectric devices. Methods of measuring photoelectric parameters and determining characteristics*. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ.; 1988. 64 p. (in Russ.)
13. Rec. ITU-T G652 (11/2016) *Characteristics of single-mode optical fiber and cable*.
14. Rec. ITU-T G657 (11/2016) *Characteristics of a bending loss insensitive single mode optical fibre and cable for the access network*.

Статья поступила в редакцию 08.08.2022; одобрена после рецензирования 09.09.2022; принята к публикации 12.09.2022.


The article was submitted 08.08.2022; approved after reviewing 09.09.2022; accepted for publication 12.09.2022.

Информация об авторах:


ГУЛАКОВ
Иван Романович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и физики
Белорусской государственной академии связи
 <https://orcid.org/0000-0002-7330-9928>


ЗЕНЕВИЧ
Андрей Олегович

доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи
 <https://orcid.org/0000-0002-5930-1401>

КОЧЕРГИНА
Ольга Викторовна

аспирант кафедры математики и физики Белорусской государственной академии связи
 <https://orcid.org/0000-0002-3597-0395>

МАТКОВСКАЯ
Татьяна Александровна

аспирант кафедры математики и физики Белорусской государственной академии связи
 <https://orcid.org/0000-0002-1499-6158>