

УДК 535

А.И. Гаранин, Я.Д. Токарева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ПРОВЕРКИ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ ОБРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

В статье разработана схема проверки целостности волоконно-оптической цепи методом обратных отражений. В схеме использовались многомодовые волоконные разветвители, оптическое волокно доставки и узел ввода с напыленным на конце диэлектрическим зеркалом. Приведены рецепт и модель светоотражающего диэлектрического покрытия. Проведены испытания силового лазерного диода в критических температурных условиях. Данная методика находит применение в горнодобывающей промышленности при инициации взрывчатых веществ лазерным излучением.

Ключевые слова: градиентная линза, GRIN-линза, оптическое волокно, диэлектрическое покрытие, лазерный диод, узел ввода, оптический детонатор, горнодобывающая промышленность, обратные отражения.

A.I. Garanin, Ya.D. Tokareva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DEVELOPMENT OF VERIFICATION SCHEMES OF FIBER-OPTIC CIRCUIT BY BACK REFLECTIONS

The article developed a scheme for checking the integrity of the fiber-optic circuit by the method of back reflections. The scheme used multimode fiber splitters, a delivery optical fiber and an input unit with a dielectric mirror deposited at the end. A recipe and a model of a reflective dielectric coating are provided. Testing of power laser diode in critical temperature conditions is performed. This technique is used in the mining industry in the initiation of explosives by laser radiation.

Keywords: gradient lens, GRIN lens, optical fiber, dielectric coating, laser diode, input node, optical detonator, mining industry, back reflections.

Введение

В современной горнодобывающей промышленности электрические взрыватели (детонаторы) являются основным средством для разрыва пластов горных пород. Электрический способ детонации взрывчатых веществ дает возможность одновременного взрывания серии зарядов с любого расстояния при различных внешних условиях [1].

Однако существенным недостатком такого метода является высокая вероятность появления преждевременного взрыва от блуждающих токов.

Для увеличения безопасности при проведении взрывных работ встает задача разработки и создания надежного и помехоустойчивого детонатора.

Актуальность данной статьи базируется на разработке детонатора, инициируемого лазерным излучением.

В основе разработанного нами устройства лежит оптическое волокно, которое является диэлектриком, таким образом исключается возможность появления электрической наводки или статики, как в электрических проводах.

Для активизации взрывчатых веществ применяются различные источники оптического излучения, такие как полупроводниковые лазерные диоды, волоконно-оптические лазеры, твердотельные лазеры с постоянным и импульсным режимом работы [2, 3].

Одним из преимуществ волоконно-оптического кабеля перед электрическим взрывным кабелем является вес – 8 и 14 кг на 1 км длины соответственно [4, 5].

Оптический взрыватель представляет собой фторосиликатное оптическое волокно (рис. 1) доставки излучения (диаметр – 125 мкм, кварцевая сердцевина – 105 мкм) с узлом ввода, в качестве которого используется фокусирующая линза.

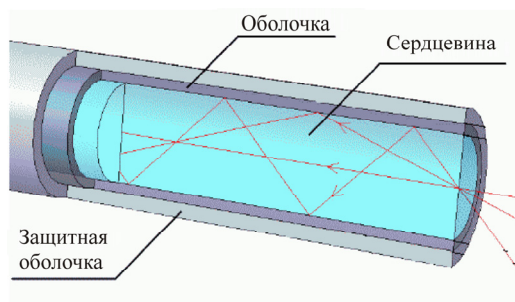


Рис. 1. Оптическое волокно доставки излучения

Для каждого электрического взрывателя существует своя система проверки целостности цепи, основанная на проверке по электрическому сопротивлению.

В данной статье будет разработана система проверки целостности волоконно-оптической схемы по обратному оптическому излучению с помощью напыленных диэлектрических покрытий.

Для простоты и надежности работы оптического взрывателя в представленной статье будет использоваться источник излучения на

лазерном диоде с волоконным оптическим выходом. Данный лазерный диод работает в постоянном режиме и имеет выходную оптическую мощность 10 Вт. В качестве узла ввода излучения используется градиентная линза (GRIN-линза) с напыленным на торце диэлектрическим покрытием (рис. 2).

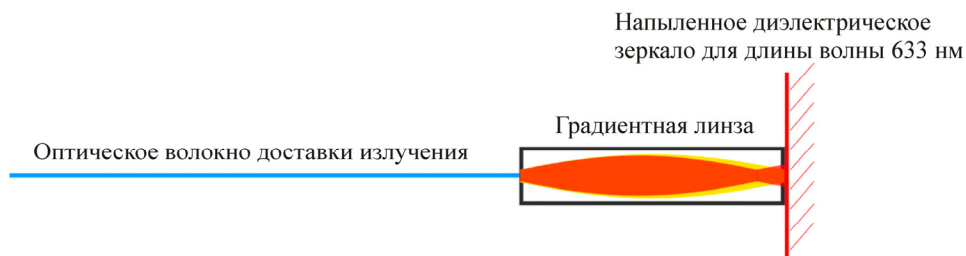


Рис. 2. Принципиальная схема распространения излучения разных длин волн в GRIN-линзе: ■ – 633 нм; ■ – 970 нм

Методика эксперимента

Метод обратных отражений заключается в измерении отраженной оптической мощности. Зондирующее излучение от лазерного диода (633 нм) попадает на выходной торец фокусирующей линзы (рис. 3), а после регистрируется фотоприемником. Измеряются оптическая мощность зондирующего лазерного диода, посылаемого в волоконно-оптическую схему, и мощность обратного отражения, поступившая на фотоприемник.

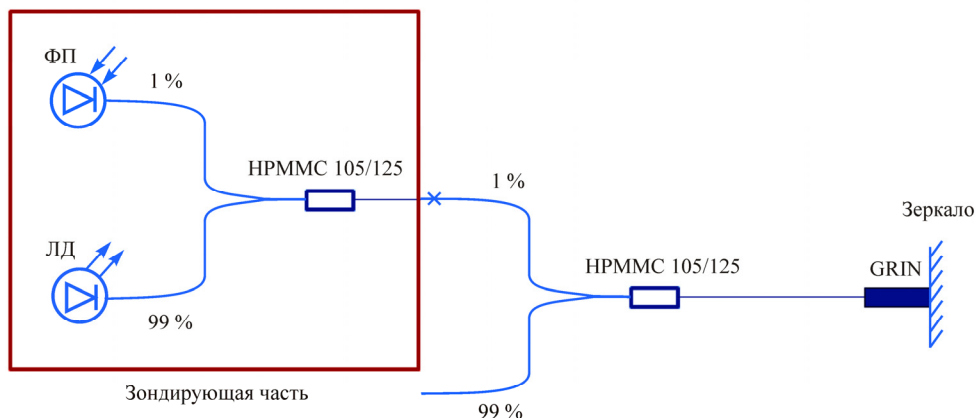


Рис. 3. Схема проверки целостности волоконного соединения узла ввода

В местах, где будет применяться данный оптический детонатор, возможны перепады температур от -60 до $+60$ °С, а такие изменения климатических условий влияют на длину волны излучения силового лазерного диода [6], следовательно, необходимо провести ряд дополнительных исследований.

Первоначально для силового лазерного диода проводятся температурные испытания по измерению выходной длины волны излучения. От данных характеристик по температуре будет зависеть ширина спектра пропускания диэлектрического напыленного зеркала.

Вторым этапом проведения эксперимента является моделирование свойств диэлектрического светоотражающего покрытия, в котором красное излучение (633 нм) будет отражать, а на рабочей длине волны (970 нм) пропускать. Излучение в 970 нм будет инициатором, а красное (633 нм) участвовать в проверке целостности волоконного соединения.

Красное излучение примечательно тем, что при нарушении целостности волоконно-оптической цепи или разрыва очень легко невооруженным глазом заметить причину разрыва цепи, например, перегиб волокна или разрыв волокна внутри защитной оболочки.

1. Температурные испытания лазерного диода

Данные измерения проводились при использовании оптического излучения силового лазерного диода (мощность 4,2 Вт), который был помещен в термокамеру. Рабочая длина волны зависит от температуры, изображение на графике которой носит линейный характер (рис. 4). Шаг измерения температуры составлял 20 °С. Время выдержки в термокамере составляет 1 ч.

Расчетная температурная зависимость составила $0,33$ нм/°С. По данным (см. рис. 4) можно сделать вывод, что окно пропускания для диэлектрического зеркала нужно делать шириной порядка 40 нм.

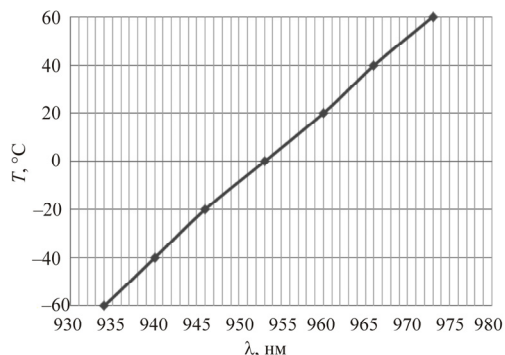


Рис. 4. Температурная зависимость центральной длины волны силового лазерного диода

2. Модель диэлектрического напыления

По температурному изменению центральной длины волны (см. рис. 4) формируется рецепт напыления диэлектрического зеркала на выходной торец GRIN-линзы (см. рис. 4) [7]. В данном случае нужно добиться коэффициента пропускания более 95 % для силового лазерного диода (970 нм) и отражения более 95 % для красного (633 нм) излучения. Для напыления диэлектрического зеркала использовались оксид титана (TiO_2) и оксид кварца (SiO_2).

В таблице приведен рецепт напыления диэлектрического зеркала на кварцевой подложке.

Рецепт диэлектрического покрытия

Номер слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Материал	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2
Толщина, нм	21	115	124	78	65	118	80	99	74	111	67

Номер слоя	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Материал	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2	TiO_2	SiO_2
Толщина, нм	106	76	93	76	103	65	96	60	108	27	47

Данные по спектру отражения приведены на рис. 5.

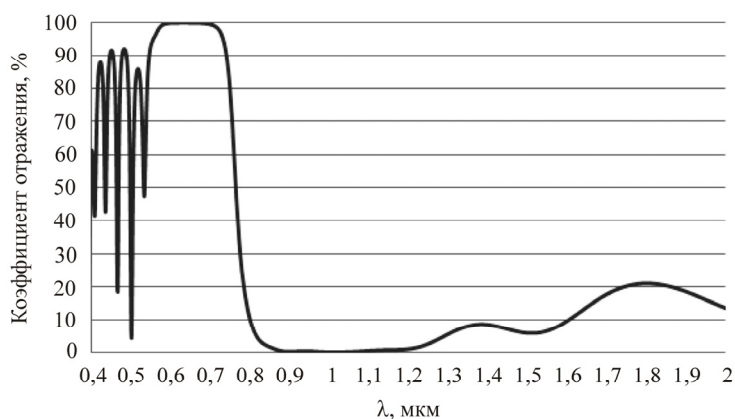


Рис. 5. Модель спектра отражения диэлектрического зеркала

Из рисунка модели следует, что коэффициент отражения стремится к 99 %, где длина волны составляет от 570 до 710 нм, а коэффи-

коэффициент пропускания при ширине от 890 до 1070 нм составляет порядка 99,8 %. Данный рецепт диэлектрического покрытия моделировался в программной среде TFCalc.

Схемы и результаты проверки целостности волоконно-оптической цепи

В представленной статье рассмотрены две волоконно-оптические схемы, где в качестве зондирующей части были разветвители на многомодовых (см. рис. 3) и одномодовых (рис. 6) оптических волокнах, в которых измерялась обратно-отраженная мощность от зондирующего лазерного диода.

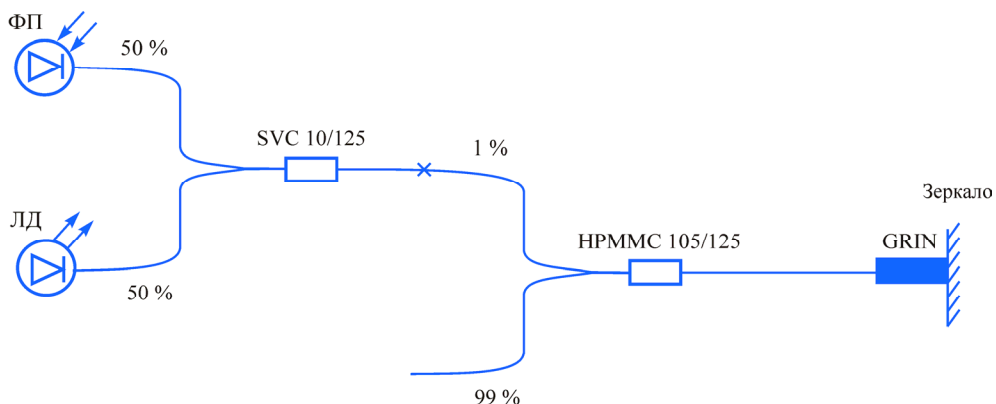


Рис. 6. Схема с одномодовым волоконным разветвителем

В качестве проверки целостности волоконного соединения и GRIN-линзы использовался лазерный источник FOD-2114 (ЛД) на длине волны 633 нм с выходной оптической мощностью 0,515 мВт.

Принципиальная схема проверки целостности волоконного соединения узла ввода на многомодовых разветвителях представлена на рис. 3. В данной схеме используются два волоконных разветвителя 1×2 (НРММС 105/125) с коэффициентами разделения 1 и 99 %, зондирующий лазерный диод (ЛД) на длине волны 633 нм, кремниевый фотоприемник (ФП), и в качестве узла ввода излучения используется GRIN-линза. Свободный конец плеча разветвителя отведен под силовой лазерный диод с длиной волны 970 нм.

После подачи излучения обратные отражения составили 0,535 мкВт. Падение мощности составило порядка 30 дБ, данное зна-

чение удовлетворяет требованиям к чувствительности кремниевого фотоприемника.

В начале испытаний по проверке обратного отражения от поверхности GRIN-линзы мы отбраковали схему с одномодовым волоконным разветвителем (см. рис. 6), поскольку из-за несостыковки сердцевин оптического волокна были большие потери на обратное отражение. Потери составили порядка 45 дБ, что является пределом чувствительности измерения фотоприемного устройства. Данные испытания на одномодовых волоконных разветвителях проводились из расчета ценовой политики, так как данные разветвители намного дешевле многомодовых разветвителей.

Помимо несостыковки сердцевин дополнительные потери на обратное отражение составляет зондирующая длина волны, так как длина GRIN-линзы подобрана для длины волны излучения силового лазерного диода (см. рис. 2).

Чтобы проверить достоверность данных обратных отражений, линза менялась на обычную без напыленных диэлектрических покрытий, где после проделанной операции обратные отражения сводились к нулю.

Заключение

В результате работы были проведены исследования по проверке целостности волоконно-оптического соединения на многомодовых оптических волокнах методом обратных отражений от диэлектрического зеркала, напыленного на поверхности узла ввода.

При данных оптических параметрах падение мощности от зондирующего красного лазерного диода составило порядка 30 дБ, что удовлетворяет разрешающей чувствительности фотоприемника.

В дальнейшей перспективе будут рассматриваться более длинные участки оптического волокна доставки (порядка 1 км). Для удешевления производства изучается возможность уйти в телекоммуникационную длину волны зондирования оптического волокна, где компоненты будут на порядок дешевле. В качестве зондирующего излучения будет являться волоконно-оптический эрбиевый усилитель [8]. Также исследуется возможность стабилизации длины волны волоконно-оптического эрбиевого усилителя путем создания лазерного резонатора, основанного на волоконно-брэгговских решетках [9].

Список литературы

1. Варенышев Б.В. Солдату о подрывном деле. – М.: Воен. изд-во Мин-ва обороны СССР, 1956. – 24 с.
2. Волков В.Г. Твердотельные лазеры с накачкой мощными лазерными диодами, используемые в системах обеспечения безопасности // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 2. – С. 142–161.
3. Леоненко Н.А. Разработка способов и средств повышения эффективности и безопасности взрывных работ на карьерах: дис. ... канд. техн. наук (25.00.20) / РАН. – Хабаровск, 2002. – 126 с.
4. Линейка оптических кабелей связи для подвески и прокладки в грунт типа ИКВ [Электронный ресурс]. – URL: http://insystem-company.ru/new_g_catalog.php?sort=kintegra_vnutri&show=20&tech=true#t20 (дата обращения: 21.02.19).
5. Провод ВП 2×0,8 [Электронный ресурс]. – URL: <https://bystrokabel.ru/item/vp/vp-2h0-8> (дата обращения: 21.02.19).
6. Власов С.В., Петров В.В., Шапочкин П.Ю. Использование полупроводниковых лазерных диодов в области низких температур // Вестник МГТУ. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 697–703.
7. Cushing David. Enhanced optical filter design. – Bellingham, Washington USA: SPIE, 2011. – 152 p.
8. Летов Д.А., Токарева Я.Д. Исследование остаточной поляризации излучения эрбиевого суперлюминесцентного волоконного источника для волоконно-оптического гироскопа // Прикладная фотоника. – 2018. – Т. 5, № 4. – С. 372–391.
9. Вотинов Г.Н., Токарева Я.Д. Датчик высоких температур на основе волоконных брэгговских решеток // Прикладная фотоника. – 2017. – Т. 4, № 3. – С. 222–229.

References

1. Varenyshev B.V. Soldatu o podryvnom dele [Subversive work for soldiers]. Moscow, Voennoe izdatelstvo ministerstva oborony SSSR, 1956, 24 p.
2. Volkov V.G. Tverdotelnye lazery s nakachkoi moshchnymi lazernymi diodami, ispolzuemye v sistemakh obespecheniia bezopasnosti [Solid-state lasers pumped by high-power laser diodes for use in safety

systems]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti*, 2016, no. 2, pp. 142-161.

3. Leonenko N.A. Razrabotka sposobov i sredstv povysheniia effektivnosti i bezopasnosti vzryvnykh rabot na karerakh [Method development as well as efficiency and safety increase of quarries blasting]. Ph. D. thesis. Khabarovsk, 2002, 126 p.

4. Lineika opticheskikh kabelei sviazi dlia podveski i prokladki v grunt tipa IKV [A range of optical communication cables for suspension and laying in the IKV ground], available at: http://insystem-company.ru/new_g_catalog.php?sort=kintegra_vnutri&show=20&tech=true#t20 (accessed 21 Februar 2019).

5. Provod VP 2x0,8 [Wire of VP 2x0.8 type], available at: <https://bystrokabel.ru/item/vp/vp-2h0-8> (accessed 21 Februar 2019).

6. Vlasov S.V., Petrov V.V., Shapochkin P.Iu. Ispolzovanie poluprovodnikovyykh lazernyykh diodov v oblasti nizkikh temperatur [The use of semiconductor laser diodes at low temperatures]. *Vestnik MGTU*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 697-703.

7. Cushing D. Enhanced optical filter design. Bellingham, Washington USA, SPIE, 2011, 152 p.

8. Letov D.A., Tokareva Ia.D. Issledovanie ostatochnoi poliarizatsii izlucheniia erbievogo superliuminescentnogo volokonno-go istochnika dlia volokonno-opticheskogo giroskopa [Investigation of an erbium superluminescent fiber source radiation residual polarization for a fiber-optic gyroscope]. *Applied photonics*, 2018, vol. 5, no 4, pp. 372-391.

9. Votinov G.N., Tokareva Ia.D. Datchik vysokikh temperatur na osnove volokonnykh breggovskikh reshetok [Fiber Bragg high temperature sensor]. *Applied photonics*, 2017, vol. 4, no. 3, pp. 222-229.

Получено 21.04.19