

Е. М. НИКУЩЕНКО

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ОСВЕТИТЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

Рассмотрены возможности применения волоконно-оптического осветителя с нарушенным полным внутренним отражением в устройствах обеззараживания воды. Представлены результаты экспериментального моделирования осветителя, выполненного в виде катушки многомодового оптоволокна. Обозначены практические проблемы создания волоконно-оптического осветителя.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, волоконный световод, обеззараживание воды.

Введение. Проблема разработки компактных эффективных устройств обеззараживания питьевой воды, принцип действия которых основан на ее облучении ультрафиолетовым светом, приобрела в последние годы особую актуальность. Создание недорогих мощных лазерных и светоизлучающих диодов видимого и ультрафиолетового диапазонов волн обусловило возможность их практического использования в таких устройствах. Заслуживает внимания и применение в качестве осветителя волоконных световодов (ВС), в том числе многомодовых световодов с нарушенным полным внутренним отражением света. Это явление возникает вследствие изгиба или скручивания оптоволокна, выбор типа и размеров (геометрии) которого должен производиться в соответствии с наибольшей светоотдачей излучения из световода в окружающую среду (неочищенную воду).

В настоящей статье представлены результаты моделирования оптоволоконного осветителя, выполненного в виде катушки кварцевых волокон с различными диаметрами сердцевины. Полученные в ходе экспериментов данные позволяют сделать вывод о перспективности развития работ в данном направлении и возможности применения специализированных оптических волокон, снабженных эффективной системой ввода в него УФ-излучения.

Физические основы метода. Применительно к геометрической оптике изгибы либо скручивание волоконного световода приводят к нарушению условия полного внутреннего отражения света на границе сердцевина — оболочка ВС и, как следствие, к дополнительным

радиационным потерям — передаче световой энергии от направляемых мод ВС к оболочечным. Радиационные потери излучения в ВС (α) непосредственно зависят от радиуса R изгиба оптоволоконна:

$$\alpha = A \frac{\exp(-BR)}{\sqrt{R}},$$

где A, B — коэффициенты, зависящие от размеров сердцевины и оболочки ВС и их показателей преломления [1—3].

Критическое значение радиуса R , при котором дополнительные радиационные потери в ВС резко возрастают, зависит от соотношения радиусов R и a (где a — радиус сердцевины ВС), величины числовой апертуры N_A оптоволоконна и вида функции радиального распределения показателя преломления ВС — ступенчатой, треугольной или градиентной. Чем больше радиационные потери излучения в ВС, тем соответственно выше эффективность вывода излучения через боковую поверхность световода в окружающую среду.

При использовании многовитковой катушки оптоволоконна возможен практически полный вывод излучения из сердцевины ВС во внешнюю среду, при этом локальная интенсивность излучения такого волоконного осветителя (P) убывает по длине катушки в соответствии с законом Бугера — Ламберта — Бера:

$$P = P_0 \exp(-\beta z),$$

где β — интегральный коэффициент радиационных потерь в ВС, z — координата точки наблюдения вдоль оси катушки.

Коэффициент потерь β зависит от соотношения a/R , величины числовой апертуры ВС и длины волны излучения (λ), которая, в свою очередь, зависит от величин показателей преломления сердцевины (n_1) и оболочки (n_2) ВС, а следовательно, от величины числовой апертуры N_A световода, равной

$$N_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Номенклатура современных волоконных световодов, как кварцевых, так и полимерных, весьма разнообразна. Выбор конкретного типа световодов, применяемых в осветителях установок для обеззараживания воды, должен производиться с учетом требуемых характеристик осветителя и является самостоятельной задачей.

Моделирование волоконно-оптического осветителя. Оптическая схема экспериментальной установки для моделирования волоконного осветителя показана на рис. 1. В качестве источников света 1 использовались гелий-неоновый лазер ($\lambda = 633$ нм), твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм) и светодиоды красного, оранжевого и ультрафиолетового диапазонов спектра. Излучение вводилось в оптоволоконно посредством микрообъектива 2 кратностью $20\times$, точная настройка ввода производилась с применением трехкоординатного микропозиционера 3. Визуальный контроль эффективности ввода излучения осуществлялся посредством отображения на экране 7, расположенном перед выходным концом 6 световода. Интенсивность излучения с боковой поверхности катушки оптоволоконна 4 фиксировалась с помощью универсального люксметра 5 марки ТКА. Перед фотоприемным окном люксметра располагалась щелевая диафрагма шириной 2 мм, щель находилась на расстоянии 3 мм от поверхности

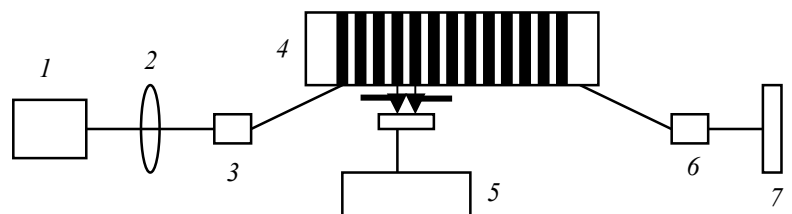


Рис. 1

катушки, сканирование рабочей поверхности осветителя производилось перемещением фотоприемника (люксметра) вдоль всей длины L катушки катушки.

Параметры исследованных световодов и размеры катушек (бобин) приведены в табл. 1, где r — диаметр катушки осветителя, $2a$ и $2b$ — диаметр сердцевины и оболочки ВС соответственно.

Таблица 1

Номер катушки осветителя	r , мм	$2a$, мкм	$2b$, мкм	L , мм
1	22	185	400	16
2	32	185	400	7
3	6,8	70	135	46
4	17	30	110	22
5	8	70	135	38
6	10,5	100	200	50
7	5	45	125	58

При больших диаметрах катушки ($r = 15 \dots 20$ мм) излучение вдоль поверхности осветителя было сравнительно равномерным. При изменении условий ввода излучения в ВС посредством микропозиционера (при возбуждении разных групп мод световода) достигается неравномерное либо почти однородное распределение яркости поверхности осветителя. При малых ($r = 5 \dots 7$ мм) диаметрах катушки вследствие интенсивной светоотдачи излучения через боковую поверхность световода распределение яркости поверхности осветителя существенно изменяется вдоль длины катушки.

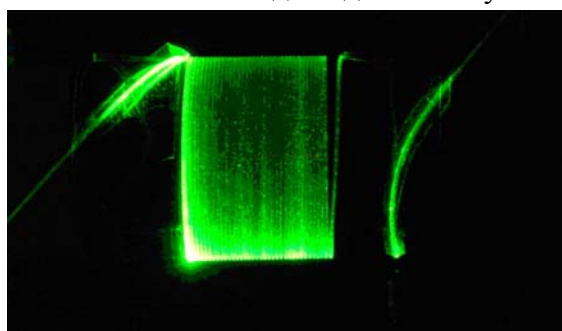


Рис. 2

На рис. 2 изображена катушка осветителя № 1 (см. табл. 1), показано эффективное возбуждение оболочечных мод ВС зеленым светом.

На рис. 3 графически представлены примеры экспериментального распределения интенсивности излучения вдоль поверхности волоконного осветителя (катушка № 6), возбуждаемого красным (кривые 1, 2) и зеленым (кривые 3—5) светом при $\lambda = 633$ нм и $\lambda = 532$ нм соответственно. (Нумерация кривых соответствует номеру эксперимента.)

Расхождение в величинах максимумов кривых вызвано изменениями режимов возбуждения световодов (разными значениями эффективности ввода излучения в световоды).

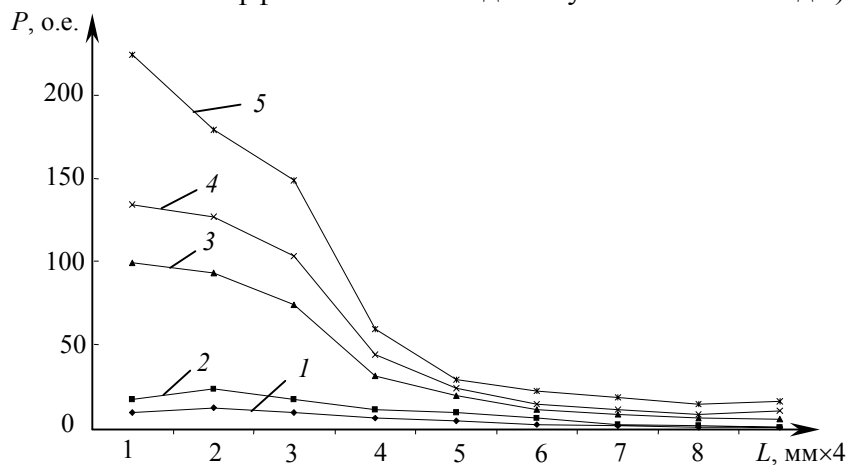


Рис. 3

Оценка особенностей использования волоконного осветителя. При возбуждении рассмотренных образцов волоконных осветителей излучением УФ-светодиодов на длине волны 360 нм (использовался светодиод типа FG360-R5-WC015 мощностью около 0,5 мВт)

интенсивность излучения с боковой поверхности катушек оптоволоконна была на уровне предела чувствительности люксметра (менее 1 мкВт). Этот результат естественен, принимая во внимание малую (менее 10 %) эффективность ввода УФ-излучения светодиодов в кварцевые световоды рассмотренных выше типов. Очевидно, что для создания волоконного осветителя необходимы источники УФ-излучения большей мощности и с улучшенными характеристиками расходимости излучения для его эффективного ввода в оптоволоконно.

На основании результатов исследований волоконного осветителя в красном и зеленом свете были получены оценки его характеристик при использовании в ближней УФ-области спектра при $\lambda=350$ нм. Результаты изменения интенсивности излучения вдоль поверхности волоконного осветителя № 6 приведены в табл. 2, где P_i — снижение интенсивности, ΔP — относительная величина снижения интенсивности при шаге измерений 4 мм.

Таблица 2

Номер эксперимента	P , о.е., при $z = 8$ мм	P_i , о.е., при $z = 12$ мм	ΔP
1 (633 нм)	13,4	10,4	0,78
2 (633 нм)	23,8	17,8	0,75
3 (532 нм)	93,9	74,5	0,79
4 (532 нм)	128,1	104,3	0,81
5 (532 нм)	180,3	150,5	0,83

При красном свете среднее значение ΔP составляет 0,773, при зеленом — 0,82, т.е. уменьшение длины волны (от красного света к зеленому) в 1,19 раза привело к увеличению коэффициента спада яркости примерно в 1,06 раз. Число M мод ВС равно

$$M = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} N_A^2.$$

Интенсивность излучения, рассеянного в результате радиационных потерь на изгибах оптоволоконна, приблизительно пропорциональна полному числу мод. Принимая это во внимание, можно допустить, что и относительная величина ΔP возрастает с уменьшением значения λ по степенному закону с показателем, примерно равным 1,5—2,0 (следует учитывать, что числовая апертура N_A кварцевого оптоволоконна в УФ-диапазоне больше, чем в зеленой и красной областях спектра). В результате при $\lambda = 360$ нм согласно приближенным оценкам расчетное значение $\Delta P \approx 1,2 \dots 1,5$. Следовательно, при заданных характеристиках осветителя (см. табл. 1) ожидаемый спад интенсивности УФ-излучения вдоль его поверхности будет существенно выше, чем при возбуждении зеленым и красным светом. Это указывает на необходимость не только тщательного расчета условий ввода УФ-излучения в световод волоконного осветителя, но и учета его общей геометрии (диаметров сердцевин оптоволоконна и катушки, общего числа витков и др.).

Для получения равномерного светового потока вдоль осветителя достаточно большой (несколько десятков миллиметров) длины необходимо обеспечить оптимальное соотношение радиуса изгиба оптоволоконна (диаметра катушки) и размера сердцевин световода. Количественная оценка такого соотношения может быть получена в результате теоретических и экспериментальных исследований.

Проблемы эффективного ввода излучения светодиодов в оптоволоконно. Вопросы эффективного ввода излучения полупроводниковых лазеров и светодиодов в оптоволоконно активно обсуждались еще в начале 70-х гг. прошлого века [1—3]. Основным результатом теоретических и экспериментальных исследований по данной проблеме заключается в необходимости точного согласования линейных и угловых апертур волоконного световода и излучателя. При прямой стыковке оптоволоконна с ламбертовским излучателем, который в хорошем приближении отражает свойства светоизлучающих диодов, показатель эффективности ввода излучения в ВС (отношение мощности излучения, введенного в сердцевину ВС, к мощности

излучателя) прямо пропорционален квадрату числовой апертуры оптоволоконного элемента. Распространенными методами также являются иммерсия и использование фокусирующих оптических элементов, например микролинз, градианов или стеклянных шариков диаметром порядка нескольких миллиметров [4]. При этом диапазон значений показателя эффективности ввода излучения весьма широк: от 5—50 % для светоизлучающих диодов до 30—90 % для лазерных излучателей.

Основная трудность при создании высокоэффективных устройств фокусировки излучения светодиодов в оптоволокно заключается в сравнительно больших размерах излучающей области диодов (десятки и сотни микрометров). Изображение излучающего тела светодиода, сформированное оптической системой фокусировки на торце оптоволоконного элемента, по своим размерам часто превышает площадь сечения жилы световода, при этом угловой спектр вводимого излучения существенно превышает угол захвата излучения оптоволокном.

Наилучшим решением проблемы эффективного ввода излучения светодиода в оптоволокно является их прямая стыковка, осуществляемая в технологическом процессе изготовления модуля-излучателя, жестко связанного с оптоволокном (тип „пигтейл“). Затруднением при использовании в волоконных осветителях светоизлучающих диодов коммерческого типа является наличие в них коллиматоров и другой фокусирующей оптики, абберрации которой обычно слишком велики и не позволяют сфокусировать изображение светящегося тела таких светодиодов до размеров, близких к размерам световодной жилы оптоволоконного элемента. Это затруднение может быть преодолено созданием специализированных светоизлучающих и лазерных диодов для массового использования в приборах оптического обеззараживания воды.

Заключение. Результаты выполненных экспериментов показывают принципиальную возможность создания волоконно-оптического УФ-осветителя для установки по обеззараживанию питьевой воды, принцип действия которой основан на явлении нарушенного внутреннего отражения света в оптоволокне.

При использовании в волоконном осветителе обычных коммерческих кварцевых оптических волокон с диаметром световодной жилы порядка 100—200 мкм предельный радиус изгиба волокон составляет примерно 4—7 мм. Возможным способом создания эффективных волоконных осветителей с внешним диаметром катушки 5—10 мм является использование в них специализированного полимерного оптоволоконного элемента.

Для реализации экономичного волоконного осветителя весьма важным является успешное решение проблемы эффективного ввода излучения в оптоволокно с КПД не менее 50 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы волоконно-оптической связи / Пер. с англ.; Под ред. Е. М. Дианова. М.: Сов. радио, 1980.
2. Мурадян А. Г., Гольдфарб И. С., Иноземцев В. П. Оптические кабели многоканальных линий связи. М.: Радио и связь, 1987.
3. Гроднев И. И., Ларин Ю. Т., Теумин И. И. Оптические кабели. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Сложные дифракционные преобразователи волновых полей (дифракционные элементы) // Методы компьютерной оптики / Под ред. В. А. Сойфера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

Сведения об авторе

Евгений Михайлович Никущенко — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; зав. лабораторией; E-mail: znem@list.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
07.12.09 г.