

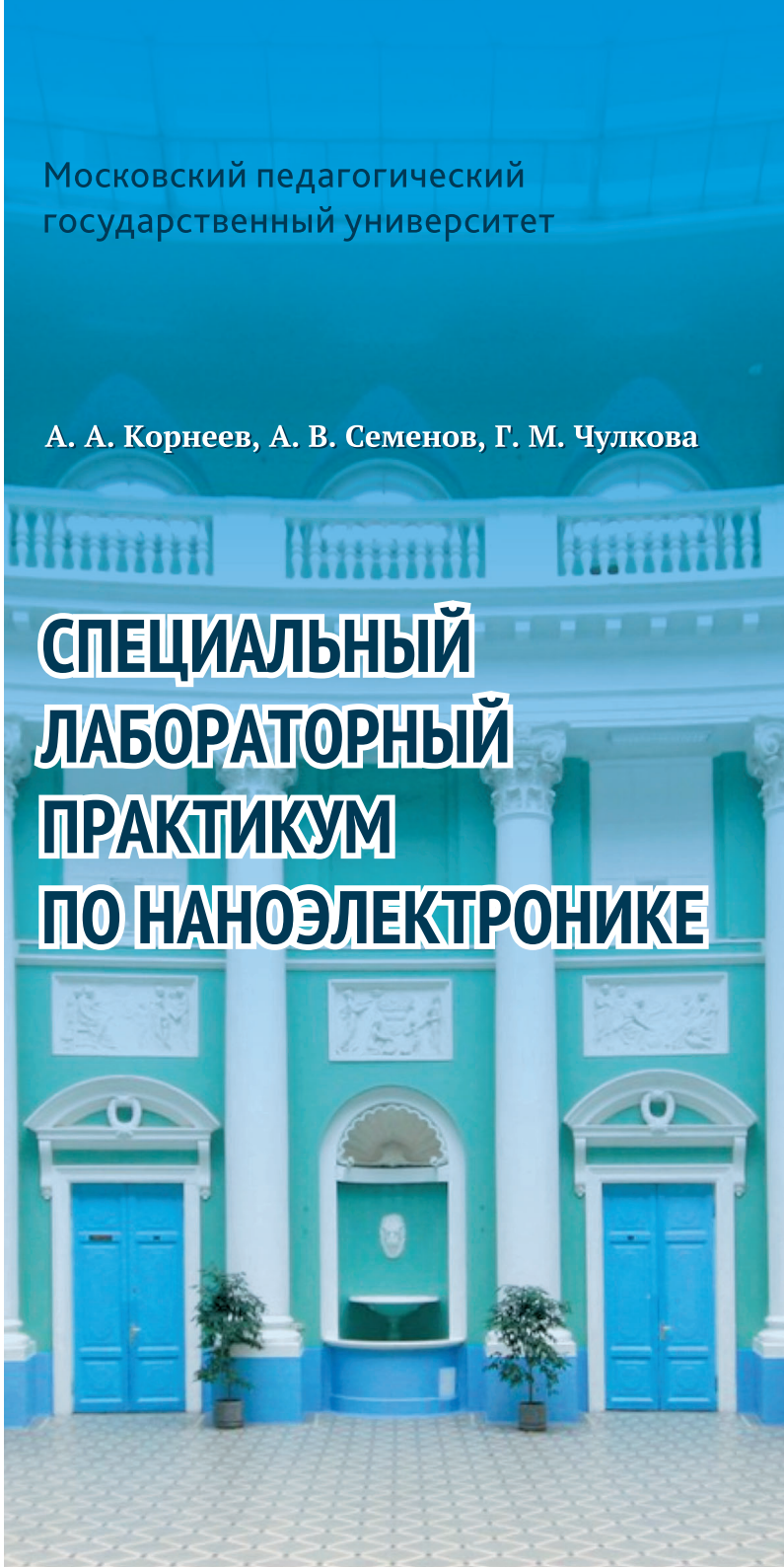


Московский педагогический
государственный университет

А. А. Корнеев, А. В. Семенов, Г. М. Чулкова

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Москва
2018



УДК 63(076.5)
ББК 30.3-5
К672

Рецензенты:

Васильева Ирина Александровна, профессор, доктор физ.-мат. наук,
Институт физики, технологий и информационных систем, МПГУ

Кулагин Владимир Петрович, профессор, доктор технических
наук, Московский институт электроники и математики
им. А. Н. Тихонова, НИУ «Высшая школа экономики»

Корнеев, Александр Александрович.

К672 Специальный лабораторный практикум по нанoeлектронике : учебное пособие / А. А. Корнеев, А. В. Семенов, Г. М. Чулкова. – Москва : МПГУ, 2018. – 88 с. : ил.

ISBN 978-5-4263-0681-3

Специальный лабораторный практикум по нанoeлектронике ориентирован на выполнение лабораторных работ на современном исследовательском оборудовании, которые носят учебно-исследовательский характер, способствуют формированию у студентов методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности и являются базой для изучения дисциплин по выбору, а также для подготовки к выполнению магистерской диссертации. Описание каждой лабораторной работы содержит краткий теоретический материал и контрольные вопросы.

Учебное пособие предназначено для студентов Института физики, технологий и информационных систем МПГУ, обучающихся по направлению 03.04.02 Физика, по магистерской программе «Физика и технология наноструктур и наноматериалов».

**УДК 63(076.5)
ББК 30.3-5**

ISBN 978-5-4263-0681-3

© МПГУ, 2018
© А. А. Корнеев, А. В. Семенов,
Г. М. Чулкова, текст, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1	
ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК	
ОПТИКО-ВОЛОКОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	5
Литература	5
Введение	5
Содержание работы.....	13
Вопросы для защиты работы.....	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2	
ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК	
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.	
ОСНОВЫ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ.....	18
Литература	18
Введение	19
Содержание работы.....	27
Вопросы для защиты работы.....	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3	
МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ АНТЕНН	
С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА HFSS	33
Литература	33
Введение	33
Содержание работы.....	39
Порядок выполнения	41
Задание	61
Вопросы для защиты работы.....	61
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4	
РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ	
ПАРАМЕТРОВ НАНОСТРУКТУР С ВОЛНОВОДАМИ	
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ	
COMSOL.....	62
Литература	62
Введение	62
Содержание работы.....	66
Вопросы для защиты работы.....	72

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5
ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ
НАНОСТРУКТУР ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ,
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ73

Литература73

Введение74

Описание экспериментальной установки.....76

Ход работы.....76

Задания78

Вопросы для защиты работы.....79

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6
ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК,
КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УРОВНЯ
ТЕМНОВОГО СЧЕТА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ
ОДНОФОТОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ80

Литература80

Введение81

Описание экспериментальной установки82

Измерение квантовой эффективности SSPD84

Измерение и обработка результатов86

Вопросы для защиты работы.....87

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

ОПТИКО-ВОЛОКОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: измерение коэффициентов ослабления оптического волокна и калибровка оптико-волоконных устройств.

Приборы и принадлежности: лазеры с длиной волны 1320 и 1550 нм, оптические волокна SMF-28(FC/APC), волоконный измеритель оптической мощности (Ophir), волоконные коннекторы, катушка оптического волокна длиной 25 км.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Игнатов А. Н.* Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2011.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические волокна

Волоконный световод (ВС) – это направляющая система, выполненная в виде тонкого стеклянного волокна цилиндрической формы, состоящая из сердцевины и оболочки, по которой осуществляется передача световых волн.

Показатель преломления материала сердцевины $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$, а оболочки – $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$, где ε_1 и ε_2 – относительные диэлектрические проницаемости. Относительная магнитная проницаемость материала μ обычно постоянна и равна единице. Показатель преломления вакуума n_0 равен единице.

Типичный волоконный световод представляет собой длинную нить диаметром от 100 до 1000 мкм в зависимости от применений, состоящую из цилиндрической сердцевины, окруженной одной или несколькими обо-

лочками из материалов с меньшими показателями преломления. Показатель преломления оболочки постоянен, а сердцевины в общем случае является функцией поперечной координаты (например, радиуса в случае круглого световода). Эту функцию называют профилем показателя преломления (ППП).

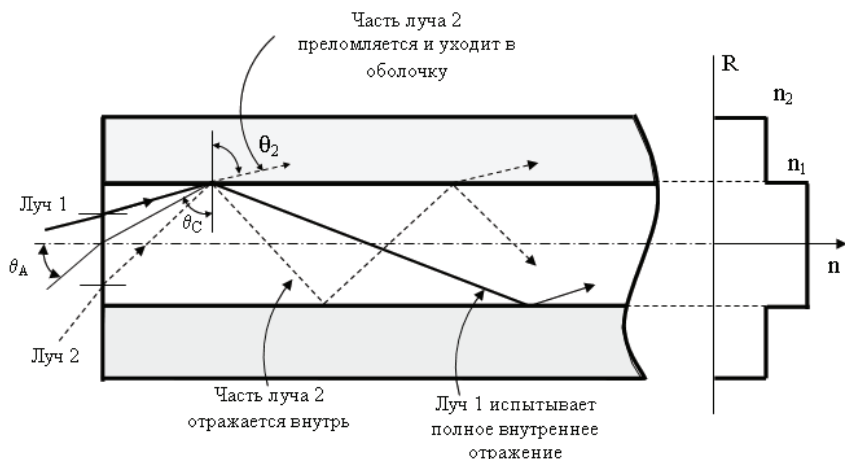


Рис. 1.1. Виды лучей в волоконном световоде

Для передачи электромагнитной энергии по световоду используется известное явление полного внутреннего отражения на границе раздела двух диэлектрических сред, поэтому, как будет показано ниже, необходимо, чтобы $n_1 > n_2$. Разность показателей преломления на границе «сердцевина – оболочка» обычно составляет 1–0,1%. Угол падения, при котором наблюдается такой эффект, называется предельным углом полного внутреннего отражения. Для всех углов падения, которые превышают предельный, будет иметь место только отражение, оно положено в основу передачи оптического излучения по световоду (рис. 1.1).

В зависимости от величины угла θ , который образует с осью лучи, выходящие из точечного источника, могут существовать лучи, которые выходят в оболочку (луч 2 на рис. 1.1).

Лучи, траектории которых полностью лежат в оптически более плотной среде (в сердцевине) 1, называются направляемыми. Поскольку энергия в направляемых лучах не рассеи-

вается наружу, такие лучи могут распространяться на большие расстояния.

Волноводные моды

Световые волны, которые образуются направляемыми лучами, многократно отражаясь от границы «сердцевина – оболочка», накладываются сами на себя и образуют направляемые волны (моды). Для облегчения восприятия под модой достаточно понимать вид траектории, вдоль которой распространяется свет.

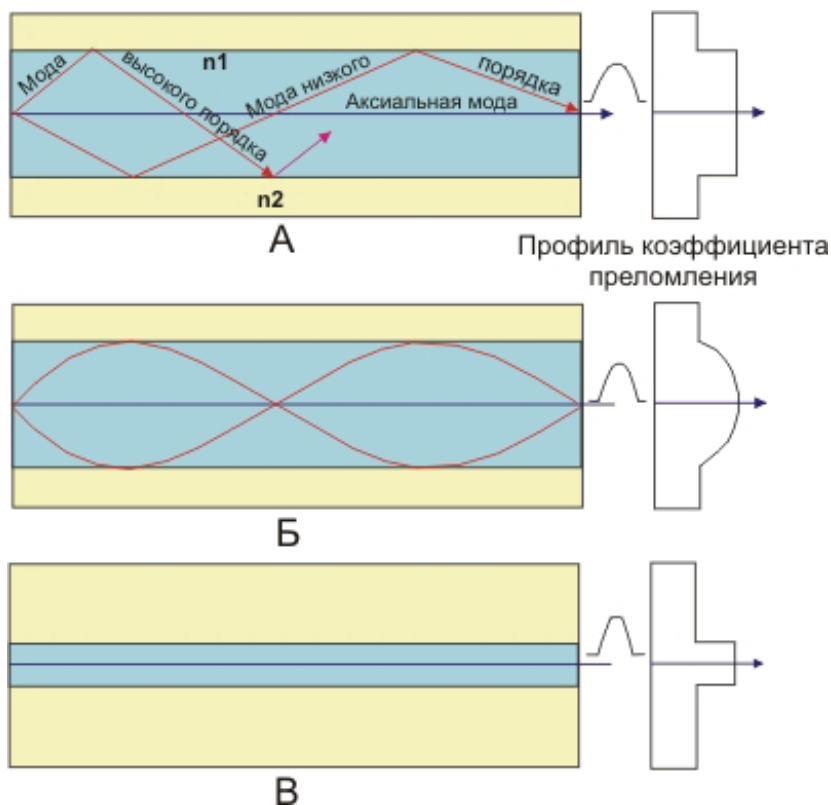


Рис. 1.2. Ход лучей и профиль коэффициента преломления ступенчатого многомодового (А), градиентного многомодового (Б) и ступенчатого одномодового (В) волокна

Волокно, в котором распространяется несколько мод, называется *многомодовым* (ММ). В ММ-волокне диаметр

сердцевины больше длины волны ($d_c \gg \lambda$). Волокно, в котором распространяется одна мода, называется *одномодовым* (ОМ). В ОМ-волокне диаметр сердцевины соизмерим с длиной волны ($d_c \approx \lambda$). По существующему международному стандарту для средств связи принято, что диаметр оболочки волокна должен быть равен 125 мкм. Оболочка изготавливается из кварцевого стекла (SiO_2) с $n_2 = 1,45$, а сердцевина – из кварцевого стекла с добавками GeO_2 или P_2O_5 . Для промышленно выпускаемых световодов ОМ-волокно имеет диаметр сердцевины 7–10 мкм, а ММ-волокно – 50–65,5 мкм. Существует три основных типа волокон: ступенчатое ММ (А), градиентное ММ (Б) и ступенчатое ОМ волокно (В) (рис. 1.2).

Типы колебаний – моды – определяются решениями системы уравнений Максвелла. Уравнения Максвелла дают набор из n, m решений, т.е. различных типов волн (появляются целые индексы n для каждого целого m).

Индекс n характеризует азимутальные (угловые) свойства волн (число полных изменений поля по окружности), а m – радиальные (число полных изменений поля по диаметру).

Оптические потери в волоконном световоде

Оптические потери α оценивают с помощью следующего соотношения 1.1. Если на входе линии длиной L мощность сигнала равна P_0 , на выходе P_1 , потери α на единицу длины световода определяются как:

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_0}{P_1} \quad (1.1)$$

α имеет размерность дБ/км и прямо пропорционален коэффициенту поглощения среды a_B (закон Бугера)

$$\alpha = \frac{10 a_B}{\ln 10}$$

Основные причины потерь в оптических волокнах:

- **Рэлеевское рассеяние** – оно примерно одинаковое в прямом и обратном направлении, линейная поляризация рассеянного излучения и сильная зависимость мощности рассеянного излучения от длины волны $\sim 1/\lambda^4$. Его

вклад наибольший в коротковолновой части. **Рассеяние Ми** на крупных неоднородностях отличается вытянутой в направлении распространения падающего света диаграммой направленности и слабой спектральной зависимостью мощности рассеяния. Потери на поглощение обусловлены тремя механизмами – собственным поглощением, поглощением на примесях и на дефектах решетки.

- **Поглощение на колебательных степенях свободы в молекулах кварца.**
- **Дефекты оптоволокна:** трещины, пузырьки и т.п. приводят к потерям. Изгиб приводит к нарушению условия полного внутреннего отражения.

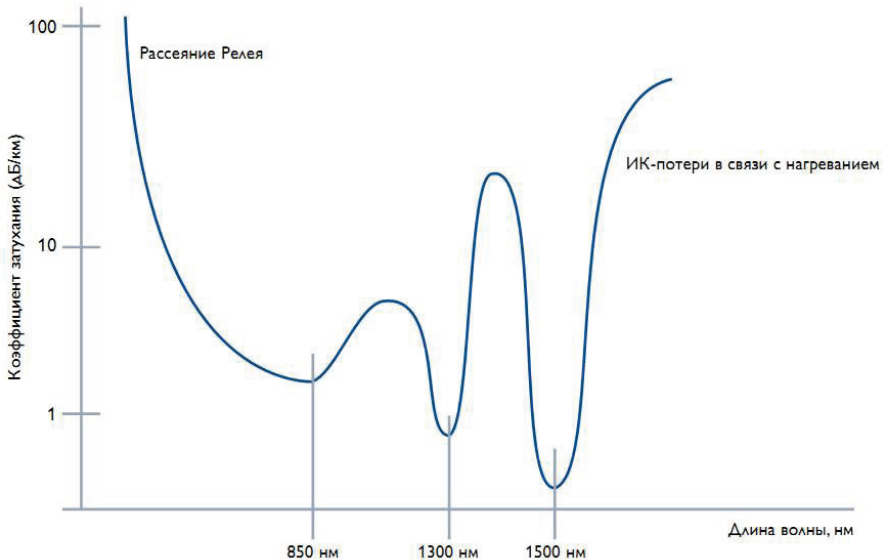


Рис. 1.3. Спектр потерь в кварцевом волокне

Практически все механизмы потерь имеют спектральную зависимость (рис. 1.3). Рэлеевское рассеяние характеризуется зависимостью интенсивности рассеянного излучения, пропорционального $1/\lambda^4$. Примесь, которая часто встречается в кварцевом волокне и вызывает резонансное фундаментальное поглощение на длинах волн 1,24 и 1,38 мкм, это гидроксильные группы OH^- . В состав волоконно-оптической