

На правах рукописи

*Кручинин*

**Кручинин Александр Сергеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ  
НАНОСТРУКТУР**

Специальность: 05.12.13 "Системы, сети и устройства телекоммуникаций"

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Московский государственный университет путей сообщения" (МГУПС (МИИТ)) на кафедре «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь».

Научный руководитель: **Журавлева Любовь Михайловна**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры "Автоматика, телемеханика и связь на  
железнодорожном транспорте", МГУПС (МИИТ)

Официальные оппоненты: **Ромашкова Оксана Николаевна**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующая кафедрой "Прикладная информатика" Института  
математики и информатики ГБОУ ВПО "Московский  
городской педагогический университет" (МГПУ),  
г. Москва

**Червяков Олег Вячеславович**  
кандидат технических наук,  
руководитель проектов, ОАО "Интеллект Телеком",  
г. Москва

Ведущая организация: ОАО Научно-исследовательский и проектно-  
конструкторский институт информатизации, автоматизации и  
связи на железнодорожном транспорте, (НИИАС), г.Москва

Защита диссертации состоится "30 " сентября 2014г. в 14.00 часов в ауд.301 (к.3) на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г., Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета ВлГУ.

Автореферат разослан «3» июля 2014 года.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г.Владимир, ул. Горького, д.87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.т.н., профессор



Самойлов Александр Георгиевич

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы** обусловлена постоянным ростом объемов информации, передаваемых по волоконно-оптическим системам передачи (ВОСП). Поэтому основной задачей является повышение пропускной способности и скорости передачи сигналов ВОСП.

Скорость и пропускная способность ВОСП определяются возможностями оптических волноводов, быстродействием элементной базы электроники и оптоэлектроники. Совершенствование элементной базы зависит от уровня развития технологии производства и от успехов в создании новых материалов. Быстродействие элементной базы электроники определяется временем пролета электрона, следовательно, его скоростью и длиной затвора транзистора. Поэтому максимальная рабочая частота устройств обработки и передачи информации зависит от электронных характеристик материала и геометрических размеров микроэлементов.

С уменьшением геометрических размеров точность изготовления элементной базы должна увеличиваться. Однако существуют технологические пределы, связанные с разбросом параметров, энергопотреблением и тепловыделением, а также физические пределы уменьшения размеров. Для дальнейшего повышения скорости передачи и быстродействия требуется переход на низкоразмерные структуры. В настоящее время наиболее перспективными являются низкоразмерные изотопические структуры, где имеет место чередование слоев из различных изотопов одного и того же вещества.

Преимущества таких наноструктур заключаются в том, что исходные вещества (собственные изотопы химического элемента) близки по химическому составу (одинаковая электронная оболочка) и значениям постоянной кристаллической решетки. В то же время изотопы различны по физическим оптоэлектронным характеристикам (разные ширина запрещенной зоны, спины ядер, коэффициенты преломления, поглощения и т.д.). Это позволяет создавать пространственные ограничения для носителей заряда без посторонних химических элементов, ухудшающих оптоэлектронные характеристики

материала. При этом получаемые «гетеропереходы» не будут вызывать напряжения кристаллической решетки и влиять на волновые функции свободных носителей заряда.

В настоящее время наиболее «узким» местом для повышения скорости передачи информации ВОСП является оптический модулятор. Самым быстродействующим в настоящее время является модулятор Маха-Цендера (МЦМ). Исследование возможностей такого модулятора - важная и актуальная задача. Принцип работы МЦМ лежит в основе более совершенного модулятора на сверхрешетках (СВР).

Максимальная рабочая частота модулятора МЦМ на СВР составляет 100 ГГц.

Использование изотопических сверхрешеток позволит повысить максимальную рабочую частоту оптического модулятора свыше 200 ГГц.

В основе решения указанных проблем лежат:

- теоретические и прикладные исследования Убайдуллаева Р. Р., Мартинес-Дуарта Дж.М., Бутусова М.М., Верника С.М., Галкина С.Л. и др.

**Задачи** анализа и разработки методов оценки влияния параметров модулятора Маха-Цендера на качество оптической последовательности являются актуальными. Результаты диссертации направлены на решение этих задач и предназначены для использования при разработке новых модуляторов на базе МЦМ с использованием ИСВР.

**Объектом** исследований диссертационной работы является модулятор Маха-Цендера

**Предмет** исследований - влияние параметров модулятора Маха-Цендера, на качество оптической последовательности.

**Целью** настоящей диссертационной работы является оценка влияния параметров модулятора Маха-Цендера на качество оптической последовательности.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие основные задачи.

1. Получение зависимости Q-фактора от параметров сигнала и помехи;
2. Определение зависимости интеграла перекрытия сигналов в двух параллельных каналах МЦМ от его параметров;
3. Выполнение расчета, позволяющего оценить влияние разности размеров сердцевин модуляторов типа Маха-Цендера на качество передачи;
4. Получение зависимости коэффициента ошибок от разности  $\Delta\rho$  размеров сердцевин модулятора, позволяющей оценить влияние технологии на качество передачи.

**Методы исследований.** В проводимых исследованиях используются методы теории волновых процессов, теории информации, теории передачи сигналов, математическое моделирование, мезоскопической физики.

**Научная новизна.**

- 1) получены результаты исследования влияния несимметричности оптических волноводов на качество передачи;
- 2) произведен расчет, позволяющий влияние качества изготовления на оптические потери МЦМ;
- 3) осуществлен расчет BER в зависимости от разности  $\Delta\rho$  размеров сердцевин модулятора;
- 4) предложен модулятор на базе новых наноструктур с использованием изотопических сверхрешеток.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что исследованы потенциальные возможности модулятора МЦМ с учетом влияний технологий, предложен новый модулятор на основе изотопических сверхрешеток. За счет этого быстродействие МЦМ может повыситься более чем в 2,5 раза по сравнению со сверхрешетками из разных полупроводников и в 5 раз по сравнению с МЦМ из ниобата лития.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обусловлена корректным применением используемых математических методов, полученных научных результатов, выводов и рекомендаций обусловлена корректной

постановкой задачи, принятыми допущениями и ограничениями, теории информации, математического моделирования.

Полученные результаты согласуются с результатами работ других авторов.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту.**

1. Зависимость Q-фактора от параметров сигнала и помехи

2. Зависимость интеграла перекрытия сигналов в двух параллельных каналах МЦМ от его параметров

3. Зависимости от изменения коэффициента преломления набега фазы и интеграла перекрытия для номинальных для МЦМ значений длины волны, показателя преломления, волнового и полуволнового напряжений.

4. Результаты оценки влияния качества изготовления на оптические потери МЦМ

5. Зависимость коэффициента ошибок от разности размеров сердцевин волноводов МЦМ

**Внедрение результатов работы** осуществлено в соответствующие проекты ООО «Наука-Связь», ООО НПП "АКСИОН-РТИ". Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс РОАТ в рамках дисциплин «Теория передачи сигналов» и "Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства". Все результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

**Апробация работы** выполнена на:

- 1) Международных НТК «Перспективные технологии и средства передачи информации» в г. Владимире в 2009, 2011, 2013 гг.;
- 2) В НТО РЭС им А.С.Попова в г. С-Петербург в 2009, 2010, 2011 гг.;
- 3) На 11-й, 12-ой, 13-ой научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов» в МИИТе в 2010, 2011, 2012 гг.;
- 4) На заседаниях кафедр «Радиотехника и электросвязь» и «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь» МИИТа в 2010-2013 гг..

**Участие в НИР Госбюджетные НИР:**

Перспективные технологии в средствах передачи информации железнодорожного транспорта, 2012 г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 26 статей, в том числе 7 статей во включенных в перечень ВАК журналах.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 105 наименований, приложения. Основная часть работы изложена на 107 страницах машинописного текста и содержит 35 рисунков и 2 таблицы.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведена краткая характеристика состояния исследуемых вопросов, сформулированы цель и задачи исследования, отражено практическое значение работы.

**В первой главе** проанализированы способы повышения эффективности волоконно-оптических систем передачи.

Проведенный анализ развития ВОСП показал, что повышение пропускной способности волоконно-оптических систем связи и скорости передачи сигналов возможны только путем совершенствования элементной базы и переходом на низкоразмерные структуры (квантовые ямы, проволоки, точки).

Для получения новой элементной базы на основе низкоразмерных структур необходимо создание новых материалов и новых технологий.

Так, новый материал можно создать на базе модели сверхрешетки с помощью собственных изотопов исходного вещества. Наиболее перспективными способами изготовления изотопических сверхрешеток являются ядерные технологии. В их основе лежит реакция поглощения тепловых нейтронов ядрами облучаемого вещества.

**Во второй главе** Представлены результаты эксперимента по определению энергетических характеристик мультиплексора технологии DWDM компании ВТІ.

Разработанная схема эксперимента, использующая мультиплексор «компании ВТІ», представлена на рисунке 1.

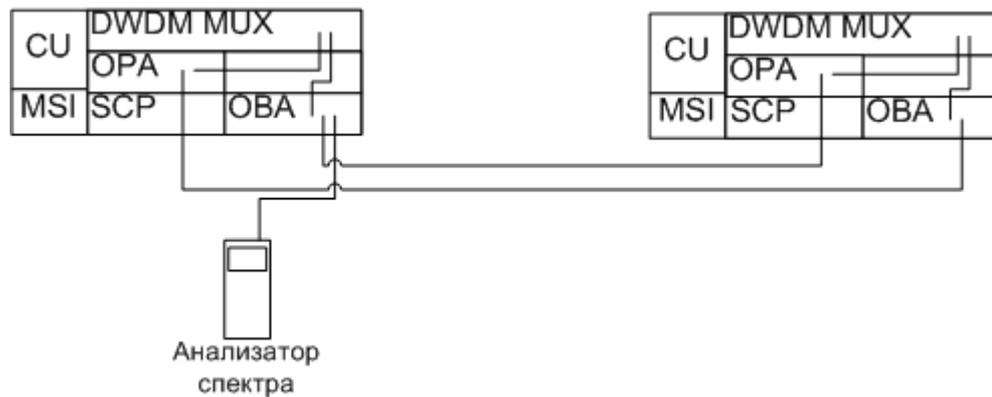


Рисунок 1. Схема проведения эксперимента

На рисунке 1 использованы обозначения:

DWDM MUX – DWDM мультиплексор;

OPA (optical pre-amplifier) – оптический предусилитель;

OBA (optical booster amplifier) – оптический усилитель;

MSI (managment system interface) – плата управления;

SCP (system control processor) – процессорная плата;

CU (cooling unit) – вентилятор;

В ходе эксперимента на входы мультиплексора подавались сигналы от SFP+ модулей разной длины волны, подключенных в порты коммутатора. В результате проведенных измерений, с помощью анализатора спектра, были получены экспериментальные зависимости уровня мощности сигнала на выходе усилителя OBA, от числа каналов  $n$  и длины волны  $\lambda$ .

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость уровня мощности сигнала в  $i$ -м канале  $P_i$  на выходе усилителя ОВА от числа каналов  $n$  и длины волны  $\lambda$

Число каналов $n$	Уровень $P_i$ , дБм при $\lambda$ , нм							
	1554,13	1554,94	1555,75	1556,56	1557,36	1558,17	1558,98	1559,79
1	7	6,80	6,78	6,88	6,95	6,74	6,98	6,85
2	6,40	6,25	6,35	6,20	6,32	6,42	6,08	6,12
3	4,76	4,8	4,78	4,9	4,79	4,87	4,67	4,73
4	3,88	3,8	3,6	3,76	3,73	3,7	3,49	3,53
5	3,2	3,1	3,15	3,25	3,1	3,14	3,04	3,07
6	2,5	2,35	2,3	2,43	2,33	2,37	2,34	2,38
7	2,07	2,03	1,93	2,03	2	1,94	2,01	1,91
8	1,93	1,73	1,7	1,66	1,62	1,6	1,52	1,56

В третьей главе исследована зависимость качества оптической последовательности (ОП) на выходе оптического модулятора Маха-Цендера (МЦМ) от значений его параметров.

Модулятор МЦМ получил наибольшее распространение в высокоскоростных системах волнового уплотнения. Он представляет собой два встречно включенных Y-разветвителя, соединенных отрезками отдельно управляемых волноводов, по которым распространяется свет от лазера.

Модулятор МЦМ и сигнал на его выходе характеризуются следующими параметрами: волновое напряжение  $V$ , полуволновое напряжение  $V_{\pi}$ , коэффициенты преломления  $n$  и их изменения  $\Delta n$ , коэффициенты электрооптических свойств  $\beta$  волноводов модулятора, набег фазы сигнала  $\Delta\Phi$ .

При учете этих параметров используя результаты М.М. Бутусова, С.М. Верника, С.Л. Галкина, в работе получена зависимость набег фазы и интеграла перекрытия: от параметров МЦМ.

$$\Delta\Phi = \gamma \cdot (n + \Delta n) \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot L \quad (1)$$

$$K = \int_0^{v_n} \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \cos \left( \pi \cdot \frac{V}{V_n} \right) \right) \right] \cdot \left[ \frac{1}{2} + \cos \left( \pi \cdot \frac{V}{V_{nl}} \right) \right] dV \quad (2)$$

где  $V_{nl} = \frac{\lambda}{(n + \Delta n)^3 \cdot r \cdot \gamma \cdot L}$ ;

$\lambda$  - длина волны;

$r$  - электрооптический коэффициент, определяемый материалом;

$d$  - расстояние между электродами с напряжением;

$\gamma$  - коэффициент оптического фактора моды;

$L$  - длина волновода.

Для значений  $\lambda = 1310 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $n = 1,45$ ,  $V_n = 5 \text{ В}$ ,  $V = 2,5 \text{ В}$  определены зависимости от  $\Delta n$  набегу фазы и интеграла перекрытия (рисунок 2 и рисунок 3, соответственно).

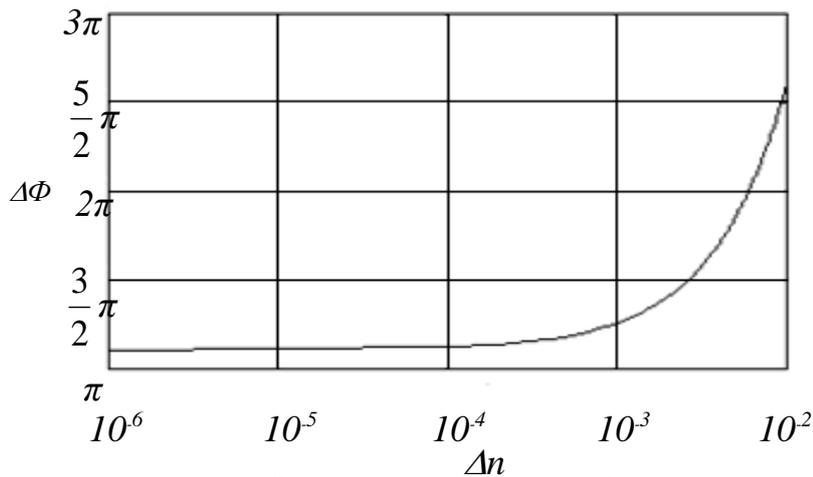


Рисунок 2. Зависимость набегу фазы от  $\Delta n$

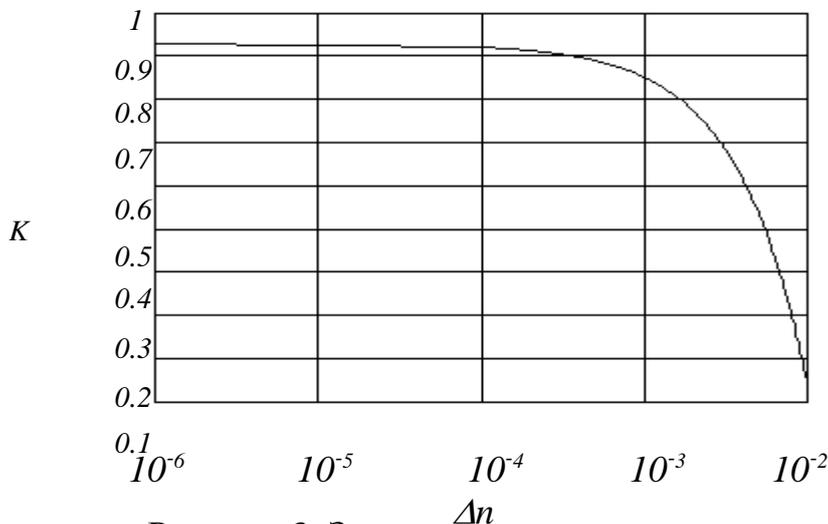


Рисунок 3. Зависимость интеграла перекрытия от  $\Delta n$

Изменения  $\Delta n$  влияют на уровень компенсации сигнала на выходе оптического модулятора МЦМ и приводят, начиная с порогового значения  $\Delta n = 10^{-3}$  к инверсии символа цифрового оптического сигнала (см. рисунок 3).

**В четвертой главе** исследовано влияния несимметричности (разности  $\Delta \rho$  размеров сердцевин) волноводов на напряженность электрического поля и оптические потери в МЦМ.

Для определения коэффициента  $\beta_1$  распространения моды в работе составлена система уравнений:

$$\begin{aligned} E_I(x) &= Ae^{-qx}, \\ E_{II}(x) &= B_1 \sinh x + C \cosh x, \\ E_{III}(x) &= De^{q(x+\rho)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $h^2 = n^2 k^2 - \beta_1^2$

$k$  – волновое число ( $k = 2\pi/\lambda$ );

$$q^2 = \beta_1^2 - n^2 k^2$$

$E_{II}$  - напряженность электрического поля в сердцевине;

$E_I, E_{III}$  - напряженности электрического поля в оболочке;

$x$  - размер оболочки.

Система уравнений (3) составлены из условия непрерывности функции  $E(x)$  и ее производной на границе слоев волновода. В результате ее решения определено  $\beta_1$  (рисунок 46).

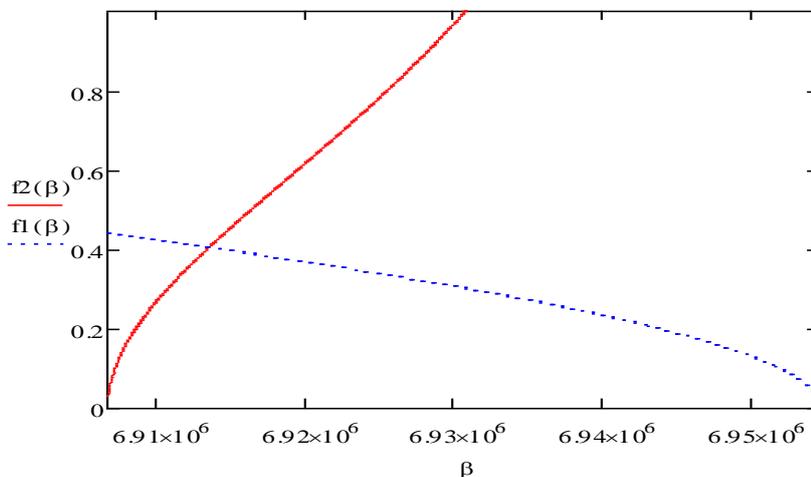


Рисунок 4. Графическая иллюстрация к определению  $\beta_1$

С использованием системы уравнений (36) определена зависимость интеграла перекрытия от разницы размеров сердцевин, представленная на рисунке 47.

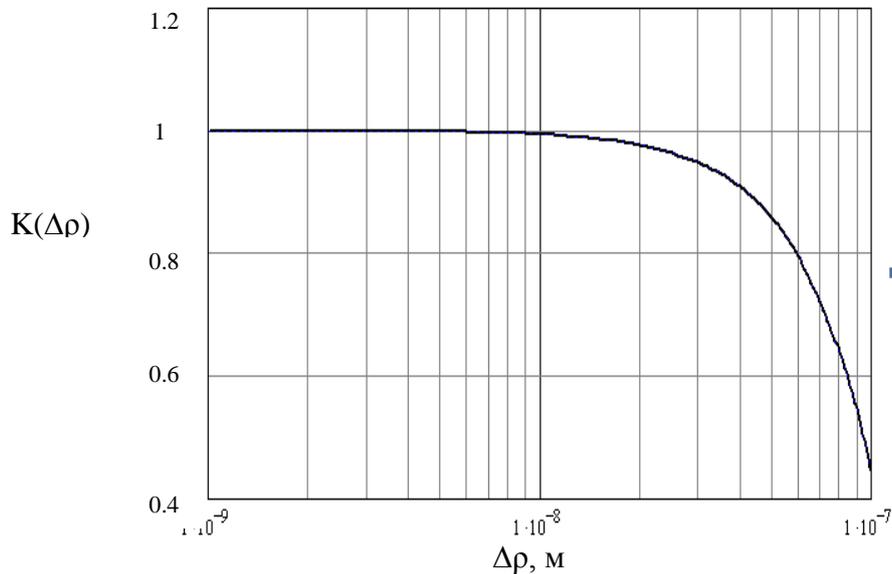


Рисунок 5. Зависимость интеграла перекрытия от разницы размеров сердцевин

Существенное уменьшение интеграла перекрытия начинается со значения  $\Delta\rho = 10^{-8}$  м и приводит к увеличению коэффициента ошибок в цифровом оптическом сигнале. Степень этого увеличения определена в пятой главе.

**В пятой главе** осуществлен расчет, позволяющий оценить влияние разности  $\Delta\rho$  размеров сердцевин волноводов МЦМ на качество передачи.

Разность  $\Delta\rho$  влияет на среднее значение напряженности  $\mu_1$  и  $\mu_0$  электрического тока при битовых посылках, соответствующих 1 и 0. Чем меньше разность между  $\mu_1$  и  $\mu_0$ , тем больше Q-фактор и тем меньше BER при одной и той же дисперсии шума фотоприемника.

Качество любой цифровой последовательности, в том числе ОП на выходе МЦМ, определяется, прежде всего, показателем BER (Bit Error Rate) - коэффициентом битовых ошибок.

Согласно Рекомендации МСЭ-Т О.201 BER связан с Q-фактором - признанный критерий оценки качества оптических каналов, который целесообразно использовать при определении качества ОП, тем более, что этот метод определения Q-фактора требует меньшего времени по сравнению с измерением BER.

В диссертации получена зависимость Q-фактора от параметров МЦМ, сигнала и помехи:

$$Q = \frac{(K - (1 - K))I}{\sigma_1 + \sigma_2}, \quad (4)$$

где I – тепловой ток фотоприемника;

$\sigma_0, \sigma_1$  – среднеквадратичное отклонение тока теплового шума.

С использованием формулы (4) определена зависимость Q от размера волноводов  $\rho$  (Рисунок 6)

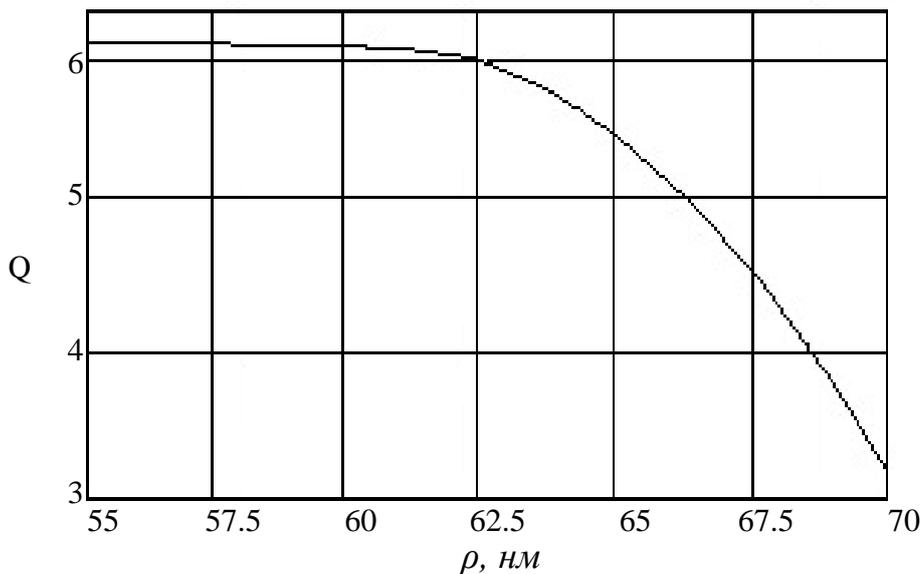


Рисунок 62. Зависимость Q-фактора от  $\rho$

Для стандартного (для модулятора МЦМ) значения  $\rho = 62.5$  нм  $Q = 6$ .

С использованием формулы (I-3) Рекомендации МСЭ-Т О.201 в работе определена зависимость BER от Q-фактора,

$$BER(Q) = e^{-\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2} \times \frac{a_0 + a_1 \frac{Q}{\sqrt{2}} + a_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left[ b_0 + b_1 \frac{Q}{\sqrt{2}} + b_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2 + b_3 \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^3 \right] \sqrt{\pi}}, \quad (5)$$

где  $a_0 = 1,69071595$ ,  $a_1 = 1,45117156$ ,  $a_2 = 0,5000323$ ,  $b_0 = 1,90764542$ ,  $b_1 = 3,7948594$ ,  $b_2 = 2,90845448$ ,  $b_3 = 1$ .

$$BER(Q) = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right), \quad (6)$$

В диссертации для стандартного для модулятора МЦМ значения размера волноводов 62,5 нм с использованием (5) и (6) определена зависимость BER от Q-фактора (рисунок 7).

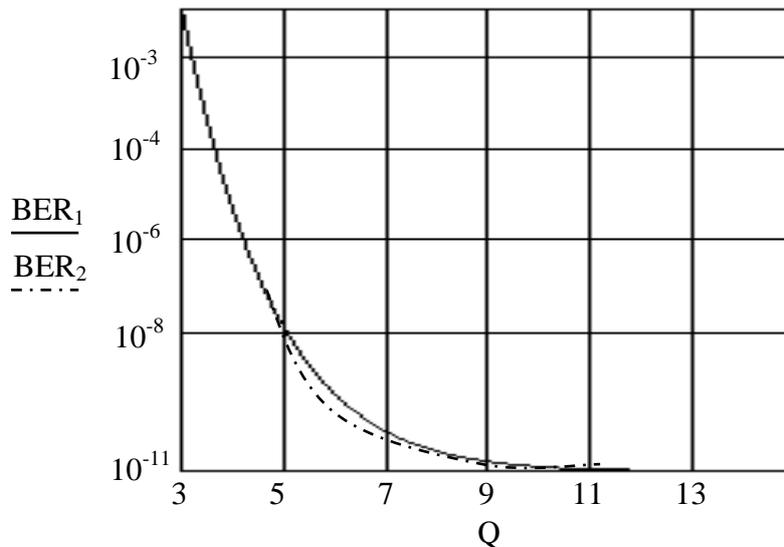


Рисунок 7. Зависимость BER от Q-фактора

Сравнение графиков построенных по формулам (5)  $BER_1$  и (6)  $BER_2$ , показало незначительную разницу между ними. Значения BER полученные по формуле (5) ближе к значениям полученным экспериментальным путем, что позволило сделать вывод о возможности использования формулы (5), рекомендованной МСЭ-Т О.201.

Известно, что при значении  $BER=10^{-5}$  (пороговом значении), происходит закрытие оптического канала. На основании зависимости BER (Q) (см. рисунок 3) можно прийти к выводу, что в случае МЦМ пороговое значение  $BER=10^{-5}$  соответствует значению  $Q = 4$ .

С использованием формулы (5), уточненной с учетом решения системы уравнений (3) в диссертации установлена зависимость BER от разности размеров сердцевин МЦМ (рисунок 8).

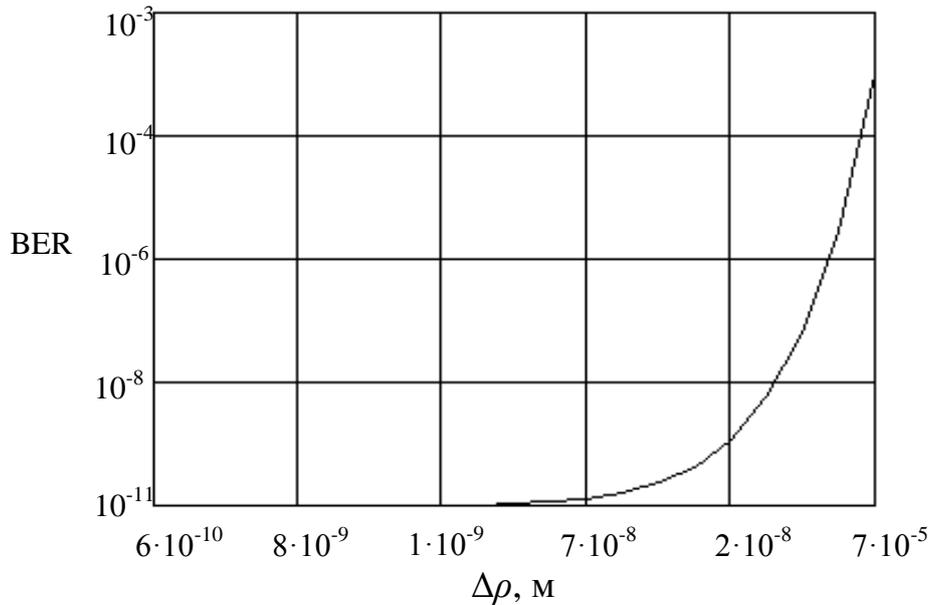


Рисунок 8. Зависимость BER от  $\Delta\rho$

Как видно из рисунка 8, разброс значений размеров волноводов модулятора МЦМ влияет на величину коэффициента ошибок цифрового оптического сигнала. График  $BER(\Delta\rho)$  имеет пороговый характер. При значениях  $\Delta\rho > 2 \cdot 10^{-8}$  м происходит обрыв цифрового оптического сигнала. Пороговое значение  $\Delta\rho$  может служить рекомендацией для качества изготовления модуляторов на базе МЦМ.

Зависимость  $BER(\Delta\rho)$  позволяет оценить влияние технологии на максимальную канальную скорость модуляции. Повышение точности выше  $10^{-8}$  м несущественно для улучшения качества связи и скорости модуляции.

Для повышения быстродействия модуляторов предложено в качестве одного из волноводов МЦМ использовать СВР.

Применение СВР позволяет повысить скорость модуляции до 100 ГГц. Эти преимущества СВР перед объемными материалами объясняются пространственными ограничениями носителей заряда.

Если использовать изотопические сверхрешетки, то быстродействие МЦМ повысится в 2 раза, по сравнению с СВР. Это основано на том, что использование изотопически чистых материалов, позволило увеличить скорость микропроцессоров вдвое, за счет очистки исходного материала от тяжелых изотопов.

Использование изотопической сверхрешетки (ИСВР), в качестве материала волноводов МЦМ, позволит увеличить скорость передачи сигнала по сравнению с ниобатом лития. Это объясняется тем, что в ИСВР нет дефектов, т.к. кристаллические решетки однородны и отсутствуют легирующие атомы, что повышает скорость носителей заряда.

### Основные выводы и результаты

1. Получена зависимость Q-фактора от параметров сигнала и помехи на выходе оптического модулятора Маха-Цендера (МЦМ). Определена зависимость значений напряжения сигнала, соответствующих значениям элементарных символов в оптической последовательности на выходе МЦМ от интеграла перекрытия сигналов в его каналах.

2. Получена зависимость интеграла перекрытия сигналов в двух параллельных каналах МЦМ от его параметров

3. Определены зависимости от изменения коэффициента преломления набега фазы и интеграла перекрытия для номинальных для МЦМ значений длины волны, показателя преломления, волнового и полуволнового напряжений. Изменения коэффициента преломления приводят, начиная с порогового его значения  $10^{-3}$  к инверсии символов цифрового оптического сигнала.

4. Исследовано влияния несимметричности (разности  $\Delta\rho$  размеров сердцевин) волноводов на напряженность электрического поля и оптические потери в МЦМ.

5. Определена зависимость Q-фактора от диаметров волноводов. Для стандартных для МЦМ значений диаметров волноводов 62.5 нм, величина Q-фактора составила  $Q=6$ .

6. Для стандартных значений диаметров определена зависимость коэффициента ошибок от Q-фактора, на основании которой сделан вывод, что в случае МЦМ пороговое значение BER=  $10^{-5}$  (при закрытии оптического канала) определяется значением Q-фактора  $Q = 4$ .

7. Оценено влияние  $\Delta\rho$  на качество передачи. Определена зависимость BER от  $\Delta\rho$ . При значениях  $\Delta\rho > 2 \cdot 10^{-8}$  м происходит увеличение коэффициента ошибок цифрового оптического канала. Данное значение может служить рекомендацией для качества изготовления модуляторов на базе МЦМ

### Список публикаций

#### Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Математическое моделирование процесса распространения света в многослойном планарном волноводе [Текст]/Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Мир транспорта. - 2012. - №1. – С.26-31.
2. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Змеева А.А. Повышение эффективности волоконно-оптических систем передачи [Текст]/Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.А. Змеева //Мир транспорта. - 2012. - №2. - С.11-19.
3. Журавлева Л.М., Кручинин А.С., Змеева, А.А.// Быстродействие волоконно-оптических систем [Текст]/Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.А. Змеева // Мир транспорта. - 2012. - №3. – С.164-167.
4. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Качество модулятора и нанотехнология [Текст]/Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Мир транспорта. - 2012. - №4. - С.28-33.

5. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации с помощью изотопических сверхрешеток [Текст]/Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2012. - №12. - С.60-66.
6. Журавлева Л.М., Кручинин А.С., Новожилов А.В., Логинов, Д.А. Проектирование изотопических сверхрешеток [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов, Д.А. Логинов // Телекоммуникации. - 2013. №7. - С.12-18.
7. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В., Журавлев, О.Е. Потенциальные возможности повышения пропускной способности оптического канала [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов, О.Е. Журавлев // Успехи современной радиоэлектроники. - 2013. - №9. - С. 11-16.

#### Прочие публикации

8. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Передача информации по волоконно-оптическим линиям связи [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // “Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения” Материалы шестнадцатой межрегиональной научно-технической конференции. - 2008. - С.127-131.
9. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Применение фотонных кристаллов в современных системах передачи информации [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды десятой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов”. –2008. - С.VIII-3.
10. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Перспективы использования фотонно-кристаллического волокна в широкополосных сетях доступа на базе технологии PON [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С.

- Кручинин, А.В. Новожилов // Труды научно-практической конференции “Наука МИИТа –Транспорту 2008”, часть 2. - 2008. - С.VII-110
11. Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Компьютерное моделирование волновых процессов в планарном волноводе [Текст] / А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2009 “Наука МИИТа -Транспорту” в двух частях. - 2009.-С. II-63-64.
12. Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Нанотехнология оптических волноводов [Текст] / А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды научно-практической конференции Неделя науки-2009 “Наука МИИТа -Транспорту” в двух частях. - 2009. - С. II-97.
13. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Нанотехнология оптических устройств передачи информации [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды 64-ой Научно-технической конференции – С-Петербург. - 2009. - С.142-144.
14. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Нанотехнология оптических устройств обработки информации [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды 64-ой Научно-технической конференции – С-Петербург. - 2009. - С.144-146.
15. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение качества оптических устройств передачи информации с помощью нанотехнологий [Текст]/Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды десятой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов”. - 2009. - С.VIII-1-VIII-2.
16. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В., Журавлев, О.Е. Математическое моделирование волновых процессов с помощью MathCad [Текст]/Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов, О.Е. Журавлев // Перспективные технологии в средствах передачи информации:

Материалы 8-й международной научно-технической конференции – Владимир: Изд-во Владим.гос.ун-та, 2009 С.98-99.

17. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Нанотехнология оптических устройств обработки информации [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды 65-ой Научно-технической конференции посвящённая Дню Радио. - 2010-С.221-222.

18. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение эффективности волоконно-оптической связи с помощью изотопической нанотехнологии [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды одиннадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов”. – 2010.- С.VIII-10.

19. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение пропускной способности оптического волокна с помощью низкоразмерных изотопических структур [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды одиннадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов”. – 2010. - С.VIII-9.

20. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Определение энергетических характеристик многослойного оптического волокна с помощью математического моделирования [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды двенадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов”. – 2011. - С.XIV-74.

21. Журавлева, Л.М., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение быстродействия модулятора с помощью изотопической нанотехнологии [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды двенадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов”. – 2011 - С.XIV-72.

22. Кручинин, А.С. Оптимизация форматов оптической модуляции для систем DWDM [Текст] / А.С. Кручинин // Перспективные технологии в

средствах передачи информации: Материалы 9-й международной научно-технической конференции. - 2011.-С.179-181т 2.

23. Журавлеву, Л.М., Кручинин, А.С. Влияние нанотехнологий на эффективность оптического модулятора в системах DWDM. [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 9-й международной научно-технической конференции. - 2011. - С.238-240. т1

24. Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Методика повышения быстродействия оптического модулятора Маха-Цендера [Текст] / А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды научно-практической конференции Неделя науки. - 2012.- С.III-70

25. Журавлева, Л.М., Змеева, А.А., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Повышение эффективности волоконно-оптических линий связи за счет применения изотопических сверхрешеток [Текст] / Л.М. Журавлева, А.А. Змеева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Труды тринадцатой научно-практической конференции “Безопасность движения поездов”. – 2012. - С.VIII-10.

26. Журавлева, Л.М., Новожилов, А.В., Кручинин, А.С. Повышение эффективности волоконно-оптических систем связи с помощью новых наноструктур и нанотехнологий [Текст] / Л.М. Журавлева, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов //Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 10-й международной научно-технической конференции, т. 1. - 2013. - С.136-139.

Подписано в печать 30.06.14.

Формат 60 84/16. Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз.

Заказ 153

Издательство

Московского государственного университета путей сообщения.

127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9