

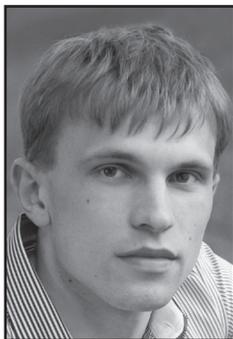


# Быстродействие волоконно-оптических систем



Любовь ЖУРАВЛЕВА  
Lubov M. ZHURAVLEVA

Александр КРУЧИНИН  
Alexander S. KRUCHININ



Анастасия ЗМЕЕВА  
Anastasia A. ZMEEVA

*Журавлева Любовь Михайловна – кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).*

*Кручинин Александр Сергеевич – аспирант МИИТ.*

*Змеева Анастасия Александровна – аспирант МИИТ.*

**Вопросы повышения эффективности волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) за счет увеличения быстродействия элементной базы оптоэлектроники. Основное внимание уделено оптическим модуляторам Маха-Цендера. Исследования модуляционной характеристики позволили сформулировать требования к качеству изготовления оптических волноводов.**

**Э**ффективность волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) во многом определяется общими тенденциями развития оптических технологий. Под эффективностью в рыночных условиях функционирования ВОСП понимается прежде всего экономическая эффективность. Она предусматривает снижение стоимости единицы передаваемой информации (бит) и рост ежемесячного потребления информации (байт).

Снижение стоимости бита связано с увеличением скорости передачи сигналов: ее увеличение в 4 раза уменьшает стоимость бита в 2,5 раза. При этом важную роль играет повышение спектральной эффективности системы.

## НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ

Создание сверхбыстрых оптических систем связи – это требование со стороны потребителей услуг ВОСП. Все больше клиентов желает получать не только аудио-, но и видеoinформацию высокого качества [1].

Производительные широкополосные каналы могут строиться разными способами. Но основных вариантов два:

*Ключевые слова: оптоэлектроника, волоконно-оптическая система передачи информации, модулятор Маха-Цендера, эффективность, качество волноводов.*

1) интенсивный путь развития оптических технологий за счет увеличения скорости передачи информации;

2) экстенсивный путь развития за счет технологий волнового уплотнения WDM.

В первом варианте главными вопросами являются повышение быстродействия элементной базы, совершенствование форматов оптической модуляции и кодирования, а также компенсация различных видов дисперсии. Быстродействие устройств электроники и оптоэлектроники зависит от размеров элементной базы. Чем она меньше, тем большей скорости передачи информации можно достичь [2]. Однако существуют технологические, физические и эксплуатационные пределы снижения размеров и увеличения скорости передачи.

Во втором варианте создания широкополосных каналов (экстенсивном) предполагается общее увеличение пропускной способности ВОСП посредством волнового уплотнения. В этом случае каждому разряду широкополосного сообщения может быть предоставлена своя частотная полоса. Для реализации такого пути развития требуются:

- повышение канальной скорости передачи двоичных сигналов за счет увеличения быстродействия оптических модуляторов;

- увеличение количества волновых каналов при снижении межканальных интервалов и рост спектральной эффективности.

Задачи эти связаны с совершенствованием форматов оптической модуляции и кодирования, борьбой с дисперсионными и нелинейными искажениями [3].

Каким путем станут развиваться оптические системы связи, зависит от продвинутой и качества информационных и нанотехнологий. Причем определяющим сегодня во многом становятся способы оптической модуляции, спектральная эффективность оптической системы связи  $\gamma$ . Параметр  $\gamma$  характеризует полноту использования частотного диапазона ВОСП. Увеличить спектральную эффективность можно, например, увеличением канальной скорости  $V$ . Однако повышение  $V$  сопровождается ростом искажений в линии связи. Поэтому наиболее актуальна задача

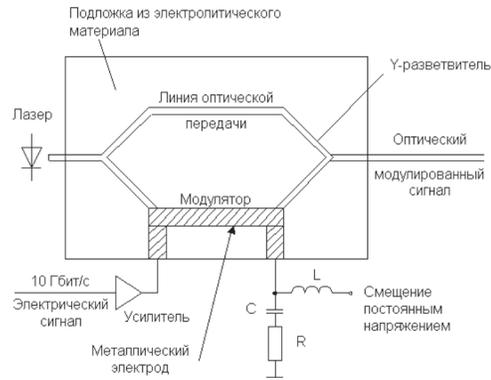


Рис. 1. Модулятор Маха-Цендера.

поиска таких форматов оптической модуляции, которые обеспечили бы наибольшую эффективность  $\gamma$  при наименьших дисперсионных и нелинейных искажениях.

Способы оптической модуляции для цифровых сигналов могут быть классифицированы по методам модуляции оптической несущей и параметру электромагнитной волны, используемой при кодировании информации, а также по формату линейного кодирования.

Принципы действия оптического модулятора

Одним из главных элементов в большинстве структурных схем модуляции света является оптический модулятор. По принципам действия такие модуляторы подразделяются на электрооптические, магнитооптические, упругооптические и т. д. Наибольшее распространение в высокоскоростных системах волнового уплотнения получил модулятор Маха-Цендера [4]. Он представляет собой два встречно включенных Y-разветвителя, соединенных отрезками отдельно управляемых волноводов, по которым распространяется свет от лазера (рис. 1).

Распределенная связь между световодами отсутствует. Модуляция происходит в одном волноводном канале, расположенном на электрооптической подложке. Пропуская электрический сигнал через эту подложку, изменяют показатель преломления  $n$  волноводного канала. На другой канал никакого воздействия не оказывается. Оптические сигналы в этих волноводах распространяются с разной скоростью и имеют разные набеги фаз.

Интерференция волн вызывает уменьшение мощности оптического сигнала



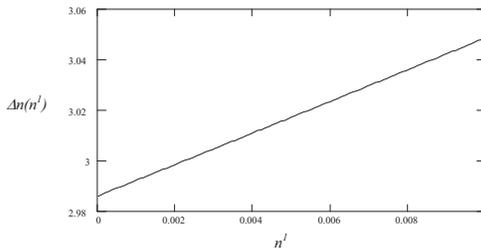


Рис. 2. Зависимость разницы показателей преломления каналов от флуктуаций  $n^1$ .

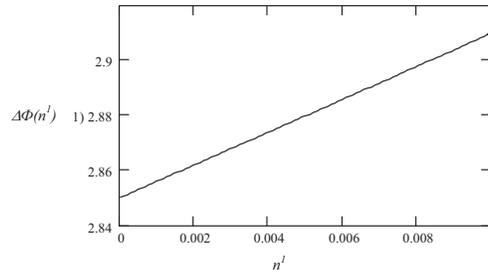


Рис. 3. Зависимость набега фазы от флуктуаций  $n^1$ .

(используется принцип модуляции интенсивности оптического излучения). Коэффициент передачи оптической мощности модулятора  $T = (1/2)(1 + b \cos \Delta\Phi)$  (1) зависит от набега фазы  $\Delta\Phi = \chi \Delta n L 2\pi / \lambda$  (2), где  $b$  – коэффициент сбалансированности ( $b=1$  для симметричных волноводов);  $\lambda$  – длина волны;  $\chi$  – величина оптического фактора моды;  $L$  – длины волноводов;  $\Delta n = \beta(n + n^1)^3$  (3) – изменения показателя преломления;  $\beta$  – постоянный коэффициент, зависящий от электрооптических свойств материала, приложенного напряжения, расположения электродов. Набег фазы  $\Delta\Phi = \pi V / V_\pi$  между световыми сигналами в двух параллельных каналах зависит от приложенного напряжения  $V$  и величины полуволнового напряжения  $V_\pi$  модуляционной характеристики модулятора  $T(V) = f(\Delta n, V)$ . Соотношение между  $\Delta n$  и  $V$  носит нелинейный характер, что приводит к сложной зависимости коэффициента передачи  $T$  от модулирующего напряжения  $V$ .

Величина линейного участка модуляционной характеристики определяется значением полуволнового напряжения  $V_\pi$  и выбором рабочей точки  $V_p$  (без учета напряжения смещения величина  $V_p$  равна половине  $V_\pi$ ). Величина полуволнового напряжения показывает качество работы модулятора, его быстродействие и зависит от точности изготовления волноводных каналов по длине и коэффициентам преломления (их симметричности). Если символически приравнять набег фазы  $\Delta\Phi = \pi V / V_\pi$  к периоду косинусоидальной функции  $2\pi t / T$ , то получим, что полуволновое напряжение  $V_\pi$  есть половина периода, т.е.  $T/2$ .

Следовательно, даже незначительные отклонения коэффициента преломления

от расчетных значений приведут к уменьшению или увеличению параметра  $V_\pi$  (сжатию или растяжению косинусоиды). Отсюда и положение рабочей точки на модуляционной характеристике, зависящее от тока смещения, должно изменяться. Главное, диапазон значений модуляционного напряжения не будет соответствовать линейному участку. Это приведет к искажениям, которые можно оценить с помощью интеграла перекрытия  $K=f(V_\pi, n^1)$ , где  $n^1$  – изменения коэффициента преломления. Интеграл перекрытия равен выражению  $K = \int_0^{V_{\pi\phi}} T_\phi \cdot T^1 dV$  (4), где  $T_\phi$  – коэффициент передачи для фиксированных значений коэффициента преломления и длины волны соответственно  $n, \lambda$  и полуволнового напряжения  $V_{\pi\phi}$ , а также неизменной рабочей точки  $V_{\pi\phi} = V_{\pi\phi}/2$ ;  $T^1$  – то же, но для других коэффициентов преломления ( $n + n^1$ ) и полуволнового напряжения  $V_\pi$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что качество изготовления оптоэлектронных устройств, определяемое возможностями промышленных технологий, оказывает влияние на скорость работы оптического модулятора и эффективность ВОСП.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДУЛЯЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Оценку влияния качества изготовления волноводных каналов на показатель преломления можно осуществить с помощью специально введенного параметра  $n^1$ , характеризующего флуктуации  $n$ . Для совершенствования производственных технологий нужно исследовать зависимость

модуляционной характеристики от показателя преломления.

На рис. 2–5 изображены зависимости разницы показателей преломления каналов, набега фазы, коэффициента передачи оптической мощности и интеграла перекрытия от флуктуаций  $n^1$ . Графики построены для значений  $\lambda = 1310 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $n = 1,44$ ,  $V_i = 5A$ ,  $V_n = 5B$ ,  $V = 2,5B$  [4]. Вид этих зависимостей свидетельствует о наличии заметного влияния параметра  $n^1$  на модуляционную характеристику. Так, превышение флуктуаций  $n^1$  критического значения  $n^1 = 0,005$  может привести к значительным искажениям модулированного сигнала. Величины этих искажений наглядно демонстрирует кривая  $K = f(V, n^1)$  на рис. 5, которая имеет пороговый характер.

В конечном итоге расчеты интеграла перекрытия  $K$  по формуле (4) дают возможность более полно оценить потери за счет флуктуаций показателя преломления, а также сформулировать требования к качеству изготовления элементной базы модулятора с точки зрения чистоты материала. Исследования влияния этих флуктуаций на модуляционную характеристику и быстродействие модулятора имеют большое значение для повышения спектральной эффективности ВОСП.

Улучшение качества изготовления элементной базы оптоэлектроники — весьма актуальная задача, которая непосредственно касается требований по разрешающей способности нанотехнологий. К наиболее перспективному направлению технологий изготовления изделий для оптоэлектроники, обеспечивающему необходимую чистоту материала и высокую точность размеров,

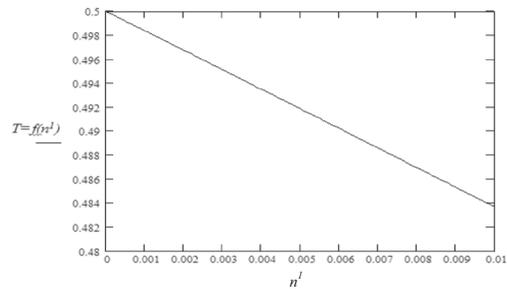


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи от флуктуаций  $n^1$ .

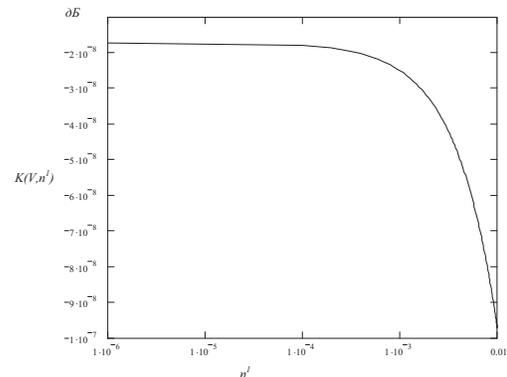


Рис. 5. Зависимость нормированного интеграла перекрытия от флуктуаций  $n^1$ .

относится сегодня изотопическая нанотехнология [2].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Слепов Н. Н. Развитие оптической связи и волокон//Электроника: Наука. Технология. Бизнес. — 2006. — № 4.
2. Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Изотопическая нанотехнология низкоразмерных структур//Нано-и микросистемная техника. — 2010. — № 9.
3. Величко М. А., Наний О. Е., Сусьян А. А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи// Lightwave Russian Edition № 4, 2005, с. 21–30.
4. [http://www.do.sibsubtis.ru/magistr/courses\\_work/vosp\\_work/lec4.htm](http://www.do.sibsubtis.ru/magistr/courses_work/vosp_work/lec4.htm)

## OPERATING SPEED OF FIBER-OPTICS SYSTEM

**Zhuravleva, Lubov M.** — Ph.D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

**Kruchinin, Alexander S.** — Ph.D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

**Zmeeva, Anastassia A.** — Ph.D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The authors study the issues of increasing performance of fiber-optics system of transmission via the growth of operating speed of elementary components of optoelectronics. They pay special attention to optical modulators of Mach–Zehnder. The researches on modulation characteristics permitted to formulate the requirements for the quality of fabrication of optical waveguides.

**Key words:** optoelectronics, fiber-optics system of data transmission, Mach–Zehnder modulator, performance, waveguide's quality.

Координаты авторов (contact information): Журавлева Л. М. — zhlubov@mail.ru, Кручинин А. С. — amori07@mail.ru, Змеева А.А. — a\_zmeeva@mail.ru

