



Качество модулятора и нанотехнологии



Любовь ЖУРАВЛЕВА
Lubov M. ZHURAVLEVA

Александр КРУЧИНИН
Alexander S. KRUCHININ



Александр НОВОЖИЛОВ
Alexander V. NOVOZHILOV

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

Кручинин Александр Сергеевич — аспирант МИИТ.

Новожилов Александр Владимирович — аспирант МИИТ.

Поиск резервов пропускной способности линий связи — неременная задача информационных технологий. Одним из проблемных звеньев здесь остается формат модуляции сигнала. И именно с этой точки зрения авторы статьи оценивают свои усилия по повышению быстродействия оптического модулятора Маха-Цендера с помощью нанотехнологий.

Ключевые слова: информация, волоконно-оптическая система связи, пропускная способность, оптический модулятор, нанотехнологии.

Высокие темпы роста рынка телекоммуникационных услуг стимулируют повышение пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП). Появление сверхбыстрых скоростей стало возможным благодаря стремительному развитию информационных и нанотехнологий. Как известно, нанотехнологии позволяют расширить информационный объем канала, предоставляемого оптическим волокном, за счет совершенствования элементной базы ВОСП. Информационные технологии направлены на сжатие первичных сигналов, в результате чего повышается пропускная способность волоконно-оптических линий связи.

В первом случае увеличение быстродействия электронных и оптоэлектронных устройств (например, посредством низкоразмерных структур) позволяет освоить весь частотный ресурс оптического волокна (порядка 30 ТГц) [1]. Во втором случае есть возможность повысить эффективность этого ресурса, допустим, путем уплотнения оптического волокна, форматов оптической модуляции. Однако в том и другом случаях самым проблемным звеном в по-

вышении эффективности ВОСП остается оптический модулятор [2].

I.

Наибольшее распространение в высокоскоростных системах волнового уплотнения получил модулятор Маха-Цендера (MZM). В нем с помощью линейной кодовой последовательности осуществляется модуляция по интенсивности инфракрасного излучения [3]. Оптический модулятор этого типа представляет собой два встречно включенных Y-разветвителя, соединенных отрезками отдельно управляемых волноводов, по которым распространяется свет от лазера (рис. 1). Модуляция происходит в одном волноводном канале, расположенном на электрооптической подложке.

Пропуская электрический сигнал через 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. Принцип действия здесь основан на квадратичном электрооптическом эффекте Керра, который связан с изменением значения показателя преломления оптического материала в зависимости от приложенного напряжения электрического сигнала. Наиболее выраженными электрооптическими свойствами обладает бесцветное твердое вещество ниобат лития. Это оптически прозрачный кристалл (сегнетоэлектрик) в диапазоне 0,4–5,0 мкм с показателем преломления 2,29.

Максимальная скорость передачи информации с помощью модулятора MZM достигает 40 Гбит/с. Эта цифра определяется двумя основными факторами: электрооптическими свойствами материала, качеством изготовления модулятора. Под электрооптическими свойствами сегнетоэлектрика подразумевается крутизна зависимости его поляризованности от приложенного напряжения, называемая петлей гистерезиса и характеризующаяся величиной коэрцитивной силы. Последняя определяет скорость деполяризации сегнетоэлектрика (чем она больше, тем больше энергии надо прикладывать) [4].

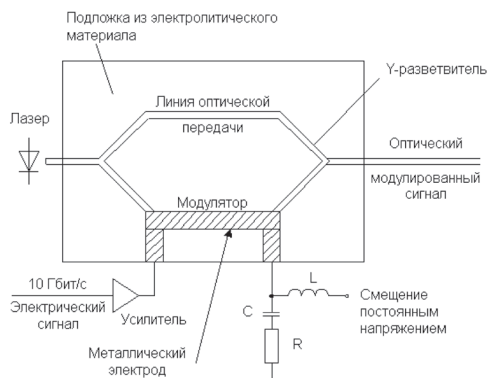


Рис. 1. Модулятор Маха-Цендера.

Если исходить из сказанного, то быстродействие модулятора MZM ограничивается инерционностью процессов поляризации материала, предельные возможности которого по скорости передачи сигналов выше, чем 40 ГГц [5]. Однако кроме материала на быстродействие MZM влияет симметричность волноводов, которая определяет качество интерференции в оптических разветвителях. Под качеством следует понимать способность модулятора обеспечить величину разности фаз $\Delta\Phi$ в волноводах: при передаче логической «единицы» $\Delta\Phi = 0$, при передаче логического «нуля» $\Delta\Phi = \pi$. Симметричность волноводов зависит от качества изготовления MZM: чистоты материала (флуктуаций показателей преломления) и точности геометрических размеров волноводов (флуктуаций диаметров и длины отрезков оптического волокна).

Известно, что каждая технология производства элементной базы оптоэлектроники имеет свои ограничения – например, по точности изготовления геометрических размеров, характеризуемой разрешающей способностью. Поэтому исследования влияния на MZM качества изготовления оптических модуляторов представляют определенный научный интерес. Они помогут, в частности, ответить на вопрос, можно ли повысить ресурс скорости модуляции за счет применения более совершенной производственной технологии.

Такие исследования следует провести в два этапа: на первом оценить степень влияния несимметричности диаметров волноводов, на втором – неравенство оптических путей волноводов за счет разных





длин волокон или разницы в показателях преломления.

Для решения первой задачи необходимо рассчитать оптические моды волноводов. Затем сравнить их с помощью коэффициента перекрытия [3,6], который позволит увидеть величину оптических потерь, например при неполной компенсации мод при передаче логического «нуля». Эти потери характеризуют «оптический шум», снижающий вероятность правильного обнаружения на приеме логической «единицы». На основе расчетов можно построить зависимости вероятности ошибки от величины флуктуаций размеров диаметров волноводов и оценить возможности технологий изготовления MZM.

Для решения второй задачи достаточно вспомнить, что оптический путь света есть произведение длины волновода на показатель преломления. Следовательно, зная величину разрешающей способности нанотехнологии, реально найти возможные значения отклонений волноводов по длине оптического пути света.

II.

Разрешающая способность нанотехнологий (минимальная ширина линий, при которой их можно различить) определяется длиной волны излучения, применяемого при изготовлении. Основным фактором, ограничивающим точность изготовления, являются дифракционные искажения, которые имеют порядок длины волны излучения. Так, например, метод нанолитографии предполагает точность порядка 20 нм, метод молекулярно-лучевой эпитаксии — еще меньше (толщина каждого из нескольких атомарных слоев равна примерно 0,5 нм), метод нейтронного облучения может дать наибольшую точность изготовления, поскольку длина волны тепловых нейтронов имеет порядок 1 нм [2,7]. Средние значения флуктуаций оптических длин волокна определяют сдвиги фаз в виде временной задержки τ^1 между сигналами в волноводах и образование межканальных помех, которые требуют увеличения межканального временного интервала $\Delta\tau$, что учитывается при расчете продолжительности временного канала. Поэтому уменьшение длительности элементарного

импульса τ (увеличение скорости передачи информации больше, чем 40 Гбит/с) при неизменной точности изготовления, определяющей величину τ^1 , приведет к усилению искажений оптических сигналов («логических нулей и единиц»). В предельном случае при $\tau = \tau^1$ процесс модуляции окажется невозможным.

Отсюда заключение: для полного использования ресурса кристалла ниобата лития по скорости модуляции необходимо пропорциональное уменьшение τ^1 , т.е. повышение точности изготовления волноводов. Чем выше разрешающая способность технологии, тем меньше разность фаз (оптических длин) и величина τ^1 в волноводах, тем меньше может быть интервал $\Delta\tau$ для обеспечения заданного качества связи. Таким образом, без изменения скорости передачи полученную «экономия» в величине временного межканального промежутка можно использовать или для увеличения числа временных каналов за период тактового отсчета, или для повышения качества приема (уменьшения вероятности ошибки).

На флуктуации оптических длин волноводов оказывает влияние не только точность изготовления по длине, но и по показателям преломления.

Представим величину τ^1 как разность оптических длин в волноводах за счет неточности изготовления:

$$\tau^1 = \partial l(n) / v \text{ или } \tau^1 = l(\partial n) / v, \quad (1)$$

где n , ∂n , ∂l , v соответственно показатель преломления, разрешающая способность технологии по показателю преломления и длине волокна, скорость распространения света в волноводах. Следует при этом отметить, что скорость v определяется оптическими свойствами материала. Поэтому увеличение показателя преломления на величину ∂n влечет за собой уменьшение скорости на величину ∂v , которая рассчитывается с помощью скорости света в вакууме c следующим образом:

$\partial v = c / n - c / (n + \partial n) = c(\partial n) / n(n + \partial n)$ или $\partial v \approx c(\partial n) / n^2$ при условии, что n много больше ∂n . Тогда длина оптического пути увеличивается в ∂n раз, а скорость уменьшается в $(1 + \partial n / n)$ раз. Это выражение позволяет допустить, что изменения скорости при повышении показателя пре-

ломления на величину δn незначительны.

Используя выражения (1), можно сравнить различные технологии по критерию качества изготовления оптического модулятора. Так, если принять, что промышленные методы нанолитографии не превысили пока величину линейной разрешающей способности $\delta l \geq 13,5 \text{ нм}$ [8], то ядерные технологии (облучение тепловыми нейтронами [9]) в состоянии обеспечить для кремния величину $\delta n \leq 10^{-4}$. Отсюда несинхронность оптических импульсов в волноводах можно уменьшить в $(\partial l \cdot n / l \cdot \partial n) = 2,3 \cdot 10^2$ раз ($\partial l = 10^{-8} \text{ нм}$, $n = 2,29$; $l = 1550 \text{ нм} \cdot 1,5 / n$, $(l \cdot n)_{\min} \geq 1,5 \lambda$) при условии создания соответствующих технологических методов производства.

Таким образом, технологии производства могут повысить пропускную способность ВОЛС и качество передачи информации за счет точности изготовления параметров волноводов.

III.

Наиболее сложную задачу представляет оценка влияния флуктуаций диаметров волноводов на качество работы модулятора MZM. Возникающая несимметричность оптических мод приводит к неполной компенсации в процессе интерференции света в волноводах при передаче «нуля» и искажениям амплитуды огибающей оптического импульса при передаче «единицы». Для решения этой задачи необходимо осуществить математическое моделирование распространения света в волноводе, например с помощью программы Mathcad. В основе моделирования лежит дифференциальное уравнение, описывающее волновой процесс:

$$\frac{\partial y^2}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial y^2}{\partial x^2} + h^2 y, \quad (2)$$

где $y = \Phi(t, x)$ — решение дифференциального уравнения;

$h^2 = n_c^2 k^2 - \beta_n^2$ — параметр оболочки;

n_c — коэффициент преломления сердцевины;

c — скорость распространения электромагнитной волны;

x — направление распространения волны;

t — время;

β_n — коэффициент распространения

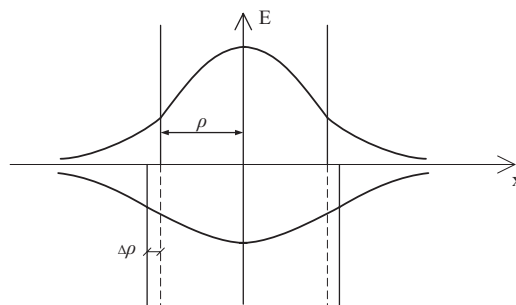


Рис. 2. Несимметричность оптических мод.

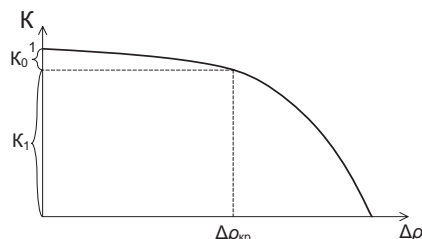


Рис. 3. Зависимость коэффициента перекрытия от величины флуктуаций радиуса волноводов $\Delta \rho$.

моды (типа электромагнитной волны); $n = 0, 1, 2$.

При решении уравнения следует задать начальные условия (описать состояние системы при $t=0$), граничные условия (определить состояние объекта на границе сердцевин и оболочки), ввести в программу расчета параметры волновода (коэффициенты преломления сердцевин и оболочки n_o , радиус сердцевин (рис. 2) волновода ρ и волновое число $k = 2\pi / \lambda$).

С помощью программы Mathcad можно во времени проследить изменения напряженности электрического поля стоячей волны $E(x)$ [10]. Важным моментом в компьютерном моделировании является выбор значений шагов ΔT ; ΔX . Они должны быть достаточно малыми, чтобы добиться устойчивости $(\Delta T / \Delta X)^2 \leq 1$ и заданной точности решения.

Полученные распределения напряженности электрического поля электромагнитной волны будут отличаться для каждого волновода MZM тем сильнее, чем больше разница диаметров сердцевин и показателей преломления. Эту разницу оптических мод можно рассчитать, используя коэффициент перекрытия:

$$K = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x) E_2(x) dx, \quad (3)$$



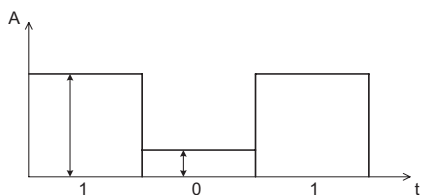


Рис. 4. Средние значения амплитуды оптической огибающей.

где $E_1(x), E_2(x)$ — распределения напряженности электрического поля в сердцевине и оболочке соединяемых волноводов; x — расстояние от центра волноводов.

Вид функции $E(x)$ зависит от внутренней структуры волновода. Для случая планарного волокна напряженность электрического поля $E(x)$ представляет из себя непрерывную кривую, состоящую из двух участков: косинусоидальной зависимости в сердцевине и экспоненциальной в оболочке (рис. 2).

Подставив в формулу (3) выражения функции $E(x)$ для обоих волноводов, получаем значения коэффициента перекрытия. Зависимость коэффициента перекрытия от величины флуктуаций радиуса волноводов $\Delta\rho$ показана на рис. 3.

Равенство коэффициента перекрытия «единице» означает полную компенсацию в процессе интерференции при передаче «нуля» и отсутствие искажений при передаче «единицы». Уменьшение значения коэффициента перекрытия означают снижение амплитуды огибающей оптического импульса при «единице» и появление оптического сигнала при «нуле» (рис. 4).

Уменьшение разницы между амплитудами при передаче «единицы» и «нуля» в условиях помех фотоприемника может привести к увеличению вероятности ошибки. Как видно из рис. 3, оптические потери резко увеличиваются после определенного значения $\Delta\rho_{кр}$ точности изготовления волноводов. Это критическое значение характеризует граничную величину разрешающей способности технологии изготовления. На рис. 3–4 показано, какие средние значения мощности и амплитуды оптической огибающей будут соответствовать «единице» (K_1) и «нулю» (K_0) для случая, когда разрешающая способность технологии равна критическому значению.

IV.

Если принять в качестве закона распределения плотностей вероятности амплитуд помехи фотоприемника нормальный закон, то задача обнаружения «единицы» на фоне межканальных помех может быть решена следующим образом:

1) определяем выражения для вероятностей пропуска «единицы» и ложного срабатывания при передаче «нуля» через табличные интегралы вероятностей;

2) приравниваем эти выражения, считая, что обе эти вероятности одинаково опасны для работы приемника;

3) находим из уравнения порог срабатывания N решающего устройства для значений α^2 отношения мощностей огибающей сигнала при «единице» и темнового тока фотоприемника;

4) рассчитываем вероятность ошибки как сумму вероятностей пропуска и ложного срабатывания;

5) строим зависимость вероятности ошибки от величины разрешающей способности технологии изготовления.

Последние два пункта алгоритма можно реализовать путем анализа «глаз-диаграммы», которая представляет из себя наложение большого количества реализаций цифрового двоичного сигнала в пределах одного тактового интервала [10]. При этом вероятность ошибки $P_{ош}(BER)$ вычисляется с помощью Q -фактора, равного

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}.$$

Полученная аналитическим путем и экспериментально подтвержденная зависимость вероятности ошибки от Q -фактора имеет вид:

$$P_{ош} = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right). \quad (4)$$

Поскольку при допустимых уровнях оптического сигнала ток фотодетектора пропорционален оптической мощности, то среднее значение $\mu_{0,1}$ напряжение электрического тока, соответствующее значениям логического «нуля» или логической «единицы», и среднеквадратическое отклонение теплового шума $\sigma_{0,1}$ можно представить в нашем случае следующим образом: $\mu_{0,1} = K_{0,1} \cdot R$, где R — чувствительность фотодетектора (для длины волны

1550 нм и германиевых фотодетекторов $R = 0,85 \text{ A/Bm}$ [11]; $\sigma_{0,1} = \sqrt{I^2} = \sqrt{4kTB/r} = 1,1367 \cdot 10^{-6} \text{ A}$; I — тепловой ток, имеющий наибольший величину среди других составляющих шума фотодетектора, где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана, $T = 298 \text{ K}$ — абсолютная температура по шкале Кельвина, $B = 40 \text{ ГГц}$ — ширина полосы цифрового сигнала, $r = 510 \text{ Ом}$ — нагрузка в цепи фотодетектора [11].

В качестве примера сравним результаты расчетов по формуле (4) для двух значений $\Delta\rho_1 = 0,25 \text{ мкм}$; $\Delta\rho_2 = 0,05 \text{ мкм}$. Соответствующие им значения коэффициентов пропускания для логической «единицы»: $K_1^1 = 0,9992$; $K_1^{11} = 0,99997$ [6]. Причем эти коэффициенты являются нормированными величинами. Поэтому для получения оптической мощности на входе фотодетектора их нужно умножить на величину входной мощности по уровню $p \geq p_{\text{пор}}$ ($p_{\text{пор}}$ — порог чувствительности). Так, для величины $p = 16,6 \text{ дБ}$ оптическая мощность равна 22 мкВт .

Таким образом, воспользовавшись формулой (4) и значениями, приведенными выше, можно вычислить вероятности ошибки для двух величин $\Delta\rho$, а именно: $P_{\text{ош}1} = 0,1125 \cdot 10^{-15}$; $P_{\text{ош}2} = 0,1027 \cdot 10^{-15}$. Полученные цифры мало отличаются друг от друга, что объясняется оценочным характером расчетов, цель которых показать возможность влияния точности изготовления волоконно-оптических устройств на качество связи.

Рассмотренные примеры свидетельствуют о том, что с помощью разработанной методики можно проводить исследования влияния качественных характеристик технологий изготовления элементной базы оптоэлектроники на вероятность ошибки при приеме отдельных символов.

Такой алгоритм расчета позволяет не только сравнивать различные технологии производства, но и оценивать возможности повышения эффективности MZM за счет улучшения качества изготовления оптических модуляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. — М.: Радио и связь, 2000.
2. Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Изотопическая нанотехнология низкоразмерных структур//Нано-и микросистемная техника. — 2010. — № 9.
3. Журавлева Л. М., Кручинин А. С., Змеева А. А. Быстродействие волоконно-оптических систем//Мир транспорта. — 2012. — № 3.
4. Верещагин И. К., Кокин С. М., Никитенко В. А., Селезнев В. А., Серов Е. А. Физика твердого тела. — М.: Высшая школа, 2001.
5. Алексеев Е. Б., Попов А. Г., Попов В. И. Волоконно-оптический коммутатор на интерферометрах Маха-Цендера//Телекоммуникации и транспорт. — 2011. — № 8.
6. Журавлева Л. М., Бухалкин М. Ю., Кручинин А. С., Новожилов А. В. Современные технологии в волоконно-оптических системах связи//Проектирование и технология электронных средств. — 2008. — № 4.
7. Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Перспективы применения нанотехнологии в телекоммуникационных системах//Успехи нанотехнологии: электроника, материалы, структуры. Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона. — М.: Техносфера, 2011.
8. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника/Под ред. П. П. Мальцева — М.: Техносфера, 2006.
9. Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Ядерная нанотехнология низкоразмерных изотопически-смешанных структур//Наноиндустрия. — 2009. — № 4.
10. Журавлева Л. М., Новожилов А. В., Кручинин А. С. Математическое моделирование волновых процессов с помощью Mathcad//Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 8-й международной научно-техн. конференции. — Владимир: ВГУ, 2009.
11. Скларов О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. — М.: Солон-Пресс, 2004.
12. Стерлинг Д. Волоконная оптика. — М.: Лори, 1998.

MODULATOR QUALITY AND NANOTECHNOLOGY

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).

Novozhilov, Alexander V. — Ph. D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

One of indispensable tasks of information technology presumes exploration of reserves of carrier capacity, and optimum signal modulation ratio is among the existing problems. The authors describe their efforts to increase speed of optical Mach-Zehnder modulator using nanotechnology.

Key words: information, fiber-optics communication system, bandwidth, carrier capacity, optical modulator, chopper, nanotechnology.

Координаты авторов (contact information): Журавлева Л. М. — zhurlov@mail.ru, Кручинин А. С. — amori07@mail.ru, Новожилов А. В. — sanyaaleks88@mail.ru.

