

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.31; 53.082; 6817

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАТЧИКАХ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРОВ С ПРЯМОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

К. Н. Белов, О. Е. Наний, Д. Д. Щербаткин, М. А. Величко

(кафедра оптики и спектроскопии)

С помощью метода численного моделирования исследованы характеристики оптического сигнала, излучаемого полупроводниковыми лазерами с прямой модуляцией структурированными импульсами тока накачки (СИН), и его распространение в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). Установлено, что использование СИН обеспечивает увеличение скорости и дальности передачи информации в ВОЛС за счет повышения стабильности формы сигнала, устранения паразитной частотной модуляции и подавления релаксационных колебаний.

Введение

Экономичные лазеры с прямой модуляцией (ЛПМ) все чаще используются в качестве источников сигнала для городских оптических сетей со скоростью передачи информации 2.5 Гбит/с. Рассматривается возможность их использования в сетях со скоростью 10 Гбит/с. Однако области применения ЛПМ ограничиваются относительно широким спектром их выходного излучения, обусловленным наличием паразитной частотной модуляции (чирпом) световых импульсов. Импульсы с положительным чирпом, характерные для ЛПМ, при распространении в стандартном одномодовом волокне, обладающим положительной дисперсией, быстро расширяются, что ограничивает дальность передачи информации [1].

Физическая природа чирпа связана с девиацией частоты при изменении числа носителей заряда в активной области ЛПМ. Наличие положительного чирпа в стандартном волокне с положительной дисперсией искажает оптический сигнал и устанавливает предел максимально достижимой дальности передачи информации. Обусловленные дисперсией искажения светового сигнала являются главным фактором, ограничивающим протяженность городских оптических сетей, использующих стандартное одномодовое волокно. Поэтому, как правило, лазеры с прямой модуляцией используются для передачи данных по стандартному волокну SMF-28 с дисперсионными потерями менее 2 дБ только в сетях зональной и городской связи [1]. Методы ослабления влияния хроматической дисперсии, основанные на использовании специальных волокон [2], неприменимы к уже проложенным оптическим сетям связи и, кроме того, увеличивают стоимость вновь строящихся сетей.

В работе [3] было предложено использовать структурированные импульсы тока накачки (СИН) для снижения положительного чирпа ЛПМ, однако

численно была исследована форма только одиночного импульса без учета влияния спонтанных шумов. Форма случайной последовательности импульсов, имитирующей информационный оптический сигнал в волоконно-оптической системе связи (ВОСС), была исследована в [4], однако влияние шумов также не учитывалось, хотя они оказывают существенное влияние на работу линии связи [5].

Целью настоящей работы является исследование возможности улучшения параметров цифровой волоконно-оптической системы связи, использующей экономичные полупроводниковые лазеры с прямой модуляцией. В работе численно исследована форма информационного сигнала, полученного на выходе стандартного полупроводникового лазера с прямой модуляцией и полупроводникового лазера с СИН с учетом шумов спонтанного излучения. Изучено изменение формы информационных сигналов при распространении в стандартном телекоммуникационном волокне. Продемонстрирована возможность увеличения дальности передачи информации при использовании полупроводникового лазера с СИН.

1. Математическая модель лазера с прямой модуляцией

Для численного моделирования процессов, происходящих в лазере, использовались кинетические уравнения одномодового лазера с оператором Ланжевена, применявшиеся ранее для моделирования работы ЛПМ без СИН [5]:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\frac{S}{\tau_p} + \Gamma G(N)S + \beta BN(N + P_0) + \xi(t), \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{\alpha}{2} \left[\Gamma G(N) - \frac{1}{\tau_p} \right], \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{I}{q} - R(N) - \Gamma G(N)S, \end{aligned} \quad (1)$$

где φ — фаза электромагнитного поля, N — плотность инвертированных частиц, τ_p — время жизни

фотона в резонаторе, Γ — фактор ограниченности полости резонатора, β — статистический вес спонтанных переходов в генерирующей моде, B — коэффициент некогерентной рекомбинации, P_0 — число инвертированных частиц без инжекции, S — число фотонов в резонаторе;

$$G(N) = G_p(N - N_{tr})(1 - \varepsilon S), \quad (2)$$

где G_p — усиление, а ε — нелинейные искажения, α — фактор уширения, N_{tr} — число инвертированных частиц при просветлении активного элемента лазера, I — ток накачки, q — заряд частицы, $R(N)$ — некогерентная рекомбинация (с учетом излучательных и безызлучательных переходов):

$$R(N) = AN + BN(N + P_0) + CN(N + P_0)^2. \quad (3)$$

Спонтанное излучение моделировалось путем введения случайной величины $\xi(t)$, которая описывает гауссовский белый шум, среднее значение которого равно нулю, а функция корреляции $\langle \xi(t)\xi(t') \rangle = 2\delta(t - t')$. Шумы при генерации излучения и при безызлучательных процессах незначительны по сравнению с величиной $\xi(t)$ в режиме импульсного излучения, который рассматривался в настоящей работе. Значения параметров системы уравнений (1) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
G_p	$2.628 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$
N_{tr}	$7.8 \cdot 10^7$
P_0	$1.5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$
A	$1 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$
B	2.788 с^{-1}
C	$7.3 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$
Γ	0.3
q	$1.30219 \cdot 10^{-19} \text{ К}$
τ_p	$2.072 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1}$
α	4.4 с^{-1}
β	$1.735 \cdot 10^{-4}$
ε	$9.6 \cdot 10^{-8}$

2. Модуляция формы импульса тока накачки

Для уменьшения чирпа и соответственно дисперсии, была выбрана такая форма импульса тока накачки, прикладываемого при включении или выключении, которая позволяет полностью подавить релаксационные колебания (РК) в лазере.

Форма импульса подбиралась исходя из информации о фазовом пространстве системы, которое описывает особые состояния лазера в моменты переключения и таким образом помогает найти пути решения задачи устранения релаксационных колебаний. Переключением ЛПМ будем называть процесс изменения интенсивности излучения от уровня,

соответствующего одному логическому значению, до уровня, соответствующего другому логическому значению. В дальнейшем для простоты будем именовать процесс переключения «0» → «1» включением, а процесс переключения «1» → «0» — выключением.

Структурированный импульс тока имеет два плато, высота и длительность которых оптимизированы для снижения времени переключения лазера и устранения релаксационных колебаний. При включении лазера первое плато тока, чья высота значительно больше «1», резко увеличивает число частиц на верхнем уровне и, следовательно, интенсивность излучения, уменьшая таким образом время включения. В то же время второе плато, высота которого по сравнению с «1» очень мала, производит разгрузку верхнего уровня от «избыточных» частиц и таким образом исключает возможность возникновения релаксационных колебаний. При выключении первое плато ускоряет снижение интенсивности резким уменьшением числа инвертируемых частиц, в то время как второе быстро приводит их значения к равновесному, соответствующему «0». В случае использования СИН уменьшается время переключения лазера и полностью подавляются переходные релаксационные колебания [3].

3. Спектр излучения полупроводникового лазера с СИН

Спектр излучения полупроводникового лазера с СИН моделировался с использованием последовательности импульсов, имитирующей передачу 40 бит информации NRZ (non-return to zero — без возврата к нулю) кодом со скоростью 2.5 Гбит/с (рис. 1). Основным шагом квантования, использующийся в модели, равен $5 \cdot 10^{-13}$ с. Как показал численный анализ, подавление релаксационных колебаний в ЛПМ с СИН существенно уменьшает ширину спектра излучения лазера, уменьшая таким образом чирп сигнала. Параметры импульсов тока накачки при включении и выключении лазера приведены в табл. 2.

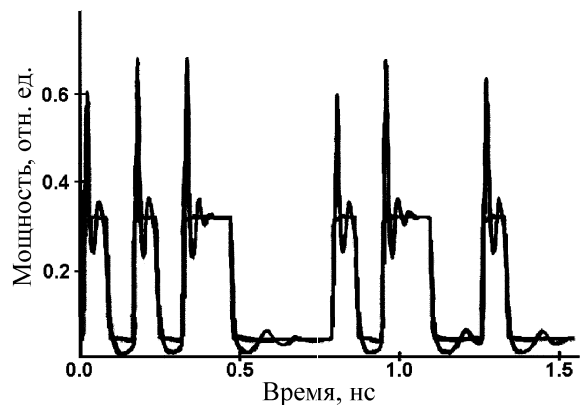


Рис. 1. Динамика генерации лазера с прямой модуляцией

Таблица 2

Параметр	Величина	Значение
I_{off}	уровень накачки, соответствующий «0»	0.0205 А
I_{on}	уровень накачки, соответствующий «1»	0.0425 А
I_{on1}	высота первого импульса включения	0.0665 А
I_{on2}	высота второго импульса включения	0.002 А
I_{off1}	высота первого импульса выключения	0.0035 А
I_{off2}	высота второго импульса выключения	0.0634 А
t_{on1}	длительность первого импульса включения	$3 \cdot 10^{-11}$ с
t_{on2}	длительность второго импульса включения	$2.75 \cdot 10^{-11}$ с
t_{off1}	длительность первого импульса выключения	$4.15 \cdot 10^{-11}$ с
t_{off2}	длительность второго импульса выключения	$2.2 \cdot 10^{-11}$ с

4. Распространение импульса по оптическому волокну

Хроматическая дисперсия возникает в оптическом волокне из-за того, что групповая скорость распространения фундаментальной моды в волокне

зависит от длины волны, поэтому различные составляющие спектра импульса распространяются с незначительно отличающимися групповыми скоростями. Результатом действия хроматической дисперсии является уширение импульса на выходе из волокна.

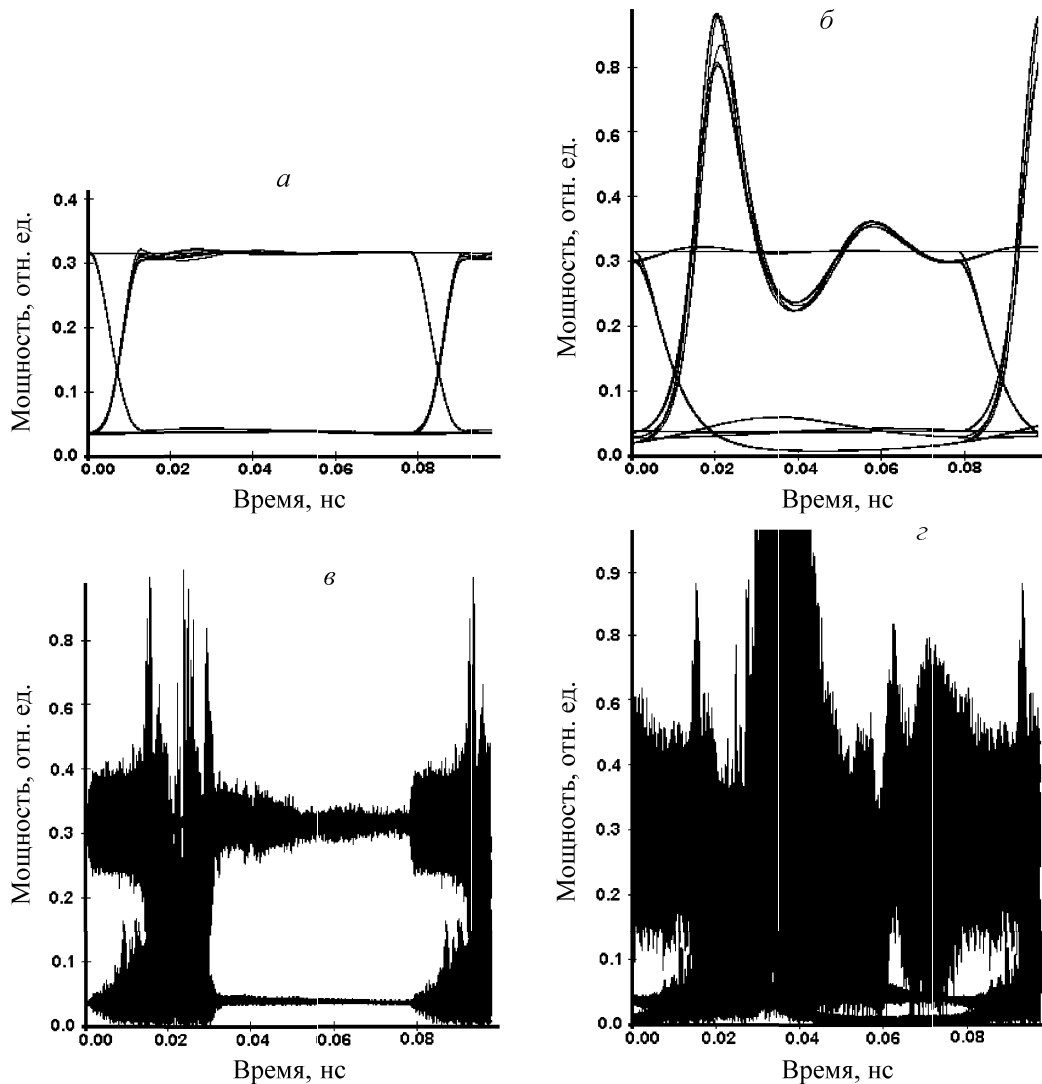


Рис. 2. Ай-диаграммы информационной последовательности сигналов: *а, в* — соответственно до и после прохождения оптического волокна при использовании ЛПМ с СИН; *б, г* — соответственно до и после прохождения оптического волокна при использовании стандартного ЛПМ

Поскольку хроматическая дисперсия связана с различием групповых скоростей разных спектральных компонент оптического импульса, то искажение его формы существенно зависит от характера частотной модуляции [6]. Чем уже спектр, тем меньше искажается импульс при прохождении через волокно. Таким образом, в линии связи он сможет распространяться на большие расстояния без применения устройств компенсации дисперсии.

Одним из критериев качества цифрового сигнала в линии связи является ай-диаграмма (от англ. *eye* — глаз), которая фактически является осциллограммой, получаемой наложением сигналов от ряда битовых периодов друг на друга. Чем шире «зрачок» у ай-диаграммы, тем выше качество линии связи.

Полученные на основе численного расчета ай-диаграммы исследованной последовательности импульсов приведены на рис. 2. Показаны ай-диаграммы исследуемых сигналов, полученных от двух типов лазеров на входе (рис. 2, а) и выходе (рис. 2, б) оптического волокна, имеющего положительную дисперсию. Из рисунка видно, что сигнал стандартного лазера с прямой модуляцией становится на выходе неразличимым, а «глаз» сигнала ЛПМ с СИН открыт достаточно широко. Оценка увеличения дальности передачи производилась путем анализа ай-диаграммы: выбрав минимальный уровень сигнала «1» и максимальный уровень сигнала «0» (т. е. определив насколько широко должен быть открыт «зрачок» ай-диаграммы), при которых они будут уверенно различаться приемником ВОСП, были найдены длины волокна, на которых эти уровни достигаются при использовании стандартного ЛПМ и ЛПМ с СИН.

Проведенные исследования показали возможность увеличения дальности передачи информации в ВОСП с ЛПМ по волокну типа SMF-28 на 30–35% по сравнению со стандартным ЛПМ.

Также стоит заметить, что шум спонтанного излучения наиболее существенно влияет на время включения полупроводникового лазера, порождая неопределенность во времени включения (джиттер). Однако при использовании СИН он практически не оказывает влияния на время переключения, что видно на ай-диаграмме сигнала лазера с СИН (рис. 2, а и б).

Заключение

Подавление релаксационных колебаний при использовании структурированной накачки обеспечивает увеличение дальности передачи информации и позволяет повысить скорость передачи за счет уменьшения длины импульса. Все это делает перспективным применение лазеров с прямой модуляцией и структурированной накачкой в качестве трансмиттеров в волоконно-оптических системах передачи данных. Однако для практической реализации предложенного метода необходимо решить ряд проблем. Главная трудность заключается в очень малой длительности первого импульса включения — $3 \cdot 10^{-11}$ с. Следовательно, ширина полосы модуляции тока накачки должна быть порядка нескольких десятков ГГц, что при современном уровне развития полупроводниковых технологий является весьма сложной задачей. Однако в июле 2003 г. корпорация Infineon продемонстрировала прототип кремний-германиевого (Si-Ge) чипа, способного работать на тактовых частотах до 110 ГГц, а в конце августа того же года NTT (Nippon Telegraph and Telephone) сообщила о разработке первого полупроводникового чипа на алмазной подложке, который способен работать на частоте до 81 ГГц. Чип будет использован в усилителях СВЧ в диапазонах от 30 до 300 ГГц.

Таким образом, использование лазеров с прямой модуляцией в качестве трансмиттеров волоконно-оптических систем передачи представляется не только технически возможным, но и весьма перспективным с коммерческой точки зрения.

Литература

1. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. New York, 1992.
2. Barry E., Gilmore M. Fiber Optic Cabling. Oxford, 2002.
3. Dokhane N., Lippi G.L. // Appl. Phys. Lett. 2001. **78**. P. 25.
4. Donal M.B. // J. Lightwave Technol. 1992. **10**, N 8. P. 1086.
5. Petermann K. Laser Diode Modulation and Noise. Dordrecht, 1988.
6. Наний О.Е., Гладышевский М.А., Щербаткин Д.Д. Методы компенсации хроматической дисперсии // Сб.: Волоконная оптика. М., 2001. С. 52.

Поступила в редакцию
07.06.04