



Наноматериалы и оптоэлектроника в скоростных системах СВЯЗИ



Любовь ЖУРАВЛЁВА
Lyubov M. ZHURAVLEVA

Алексей МАЛЫХ
Alexey N. MALYKH



Александр МАЛЫХ
Alexander N. MALYKH

Журавлёва Любовь Михайловна – кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.
Малых Алексей Николаевич – студент 3-го курса МИИТ, Москва, Россия.
Малых Александр Николаевич – студент 3-го курса МИИТ, Москва, Россия.

Nanomaterials and Optoelectronics in High-Speed Communication Systems

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 78)

В статье рассмотрены вопросы повышения пропускной способности волоконно-оптических систем, используемых на железных дорогах. Проанализированы основные направления увеличения скорости передачи информации, главным из которых является быстродействие оптических модуляторов и фотоприёмников за счёт совершенствования функциональной среды оптоэлектронных устройств и снижения инерционности материала. Для этой цели предложены новые материалы в виде многослойных наноструктур, технология изготовления и методика оценки их качественных характеристик, необходимая при проектировании оптоэлектронных приборов.

Ключевые слова: железные дороги, каналы связи, информационная сеть, изотопический эффект, пропускная способность, наноструктуры, волоконно-оптическая система, оптоэлектронные приборы.

С постоянным увеличением скоростей и объёмов железнодорожных перевозок возрастают требования к качеству и скорости передачи информации. Поэтому одной из главных задач является создание высокоскоростной системы связи. Решение ее позволит повысить оперативность управления движением поездов, организовать видеонаблюдение на переездах, в тоннелях и на других особо важных объектах железнодорожного транспорта. В настоящее время отмечается устойчивый рост пропускной способности волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), в конце второго десятилетия нашего века она, как ожидается, должна будет достигнуть величины петабит/с. Добиться такой пропускной способности удастся за счёт совершенствования базовых элементов ВОСП, волноводов, освоения новых оптических диапазонов. Основные направления в этой сфере отмечены на рис. 1.

Первый путь – это увеличение скорости передачи сигналов (расширение возможностей оптоэлектронных устройств), второй –

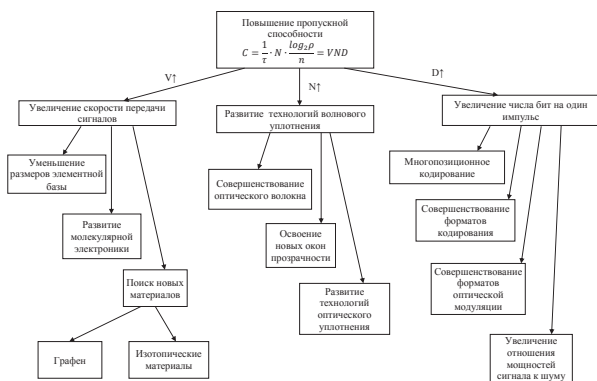


Рис. 1. Пути повышения пропускной способности ВОСП.

развитие технологий волнового уплотнения (освоение частотного ресурса оптического волокна), третий — рост числа бит информации, приходящихся на один импульс. В первом случае главную роль играют уменьшение геометрических размеров и повышение качества материала базовых элементов ВОСП, а также технологии производства. Во втором — совершенствование оптического волокна, в третьем случае — развитие информационных технологий (сжатие сигналов, многопозиционное кодирование, улучшение форматов оптической модуляции, снижение шумов квантования и т.д.).

Наиболее эффективным способом повышения пропускной способности стало увеличение скорости передачи сигналов, которое зависит от быстродействия базовых элементов ВОСП, прежде всего оптических модуляторов, фотоприёмников. Технические возможности ВОСП ограничиваются пока возможностями базовых элементов, они не позволяют увеличить скорость передачи информации выше 40 Гбит/с. Однако оптическое волокно пропускает сигналы со скоростью более 10 Тбит/с.

Увеличение скорости можно достичь путем уменьшения геометрических размеров, совершенствования оптоэлектронных характеристик материалов и технологий изготовления с переходом в области нанотехнологий. Существующие физические и технологические пределы уменьшения размеров базовых элементов ВОСП свидетельствуют о том, что в будущем для форсирования быстродействия потребуются новые поколения материалов на базе наноструктур из кремния и графена, а также инновационные технологии производства. Поэтому необходимо создание методики

проектирования новых материалов с участием наноструктур (функциональных сред), обеспечивающих требуемое быстродействие, и оценки оптоэлектронных параметров обновляющейся элементной основы.

Главной характеристикой функциональной среды (основы модуляторов, фотоприёмников), определяющей быстродействие оптоэлектронных устройств, является инерционность или продолжительность отклика материала. Это время можно представить в виде длительности нарастания переднего и заднего фронтов импульса $t_{\text{отк}}$, переносащего при двоичном кодировании один бит информации (рис. 2).

Расчётная модель максимально допустимого времени отклика материала для достижения требуемой скорости передачи сигналов может быть представлена в виде формулы для оценки Q -фактора [1]:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{2\sigma}, \quad (1)$$

где μ_1 и μ_0 — величины сигналов (оптических для модулятора и электрических для фотоприёмника), соответствующие единице и нулю; σ — среднеквадратическое отклонение теплового шума фотоприёмника.

Значения μ_1 и μ_0 (1) можно найти путем расчёта площади отдельных частей импульса (рис. 2). В результате получится выражение:

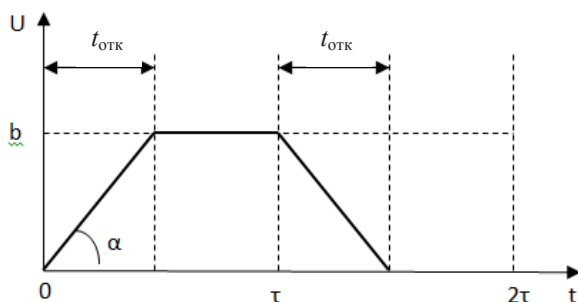
$$t_{\text{отк}} = \tau \left(1 - \frac{2Q\sigma}{b} \right), \quad (2)$$

где τ — длительность элементарного импульса, или величина, обратная скорости передачи сигналов и полосы частот f , ГГц;

b — величина амплитуды электрического импульса, равная произведению амплитуды оптического импульса (A) и чувствительности фотоприёмника (R).



Рис. 2. Упрощенная модель импульса, переносящего один бит информации ($t_{\text{отк}}$ – время отклика материала).



Минимальное значение Q -фактора, при котором вероятность ошибки составляет величину 10^{-5} , а качество связи становится критическим: $Q = 4$. Подставив в формулу (2) параметры фотоприёмника (Σ , b) и требуемое значение скорости передачи ($1/\tau$), можно получить оценку времени $t_{\text{отк}}$ материала, т.е. инерционность, которой должна обладать функциональная среда. Превышение этой величины приведет к тому, что крутизна фронтов импульса будет недостаточна для обеспечения заданного (минимального) качества связи фотоприёмником. Так, для значений $A = 40$ В, $\Sigma = 2$ мкВ, $R = 0,5$ А/Вт, $\tau = 25$ пс (40 Гбит/с) величина $t_{\text{отк}} = 5$ пс. Для разных значений чувствительности фотоприёмника на рис. 3 представлены кривые зависимости времени отклика $t_{\text{пер}}$ от заданной скорости передачи сигналов.

Как видно из рис. 3, зависимости имеют нелинейный (пороговый) характер, который свидетельствует о том, что существуют критические значения $t_{\text{отк}}$; выше них инерционность не является определяющей для увеличения скорости передачи сигналов. Кроме того, требования к качеству материала модулятора или фотоприёмника по инерционности в значительной степени зависят от конструкции фотоприёмника (величины теплового шума, квантовой эффективности, чувствительности и т.д.). Рассмотренная ранее

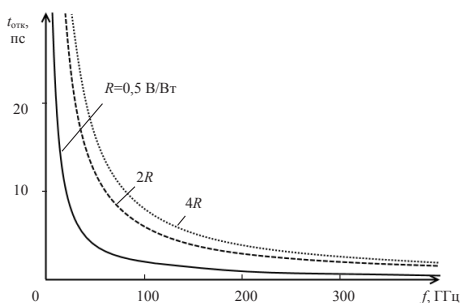


Рис. 3. Зависимость времени отклика материала от скорости передачи сигналов.

расчётная модель инерционности материала пригодна для оценки $t_{\text{пер}}$ модулятора и фотоприёмника.

Известно, что оптические модуляторы отличаются разными принципами работы. Поэтому точные цифры допустимой инерционности материала можно получить путем анализа работы конкретного типа модулятора. Так, в модуляторах Маха-Цендера, в основе которых лежит явление электропреломления, скорость модуляции зависит, главным образом, от электронной поляризации. Она определяется величиной дипольного момента p , равного произведению заряда электрона на плечо. В объёмных материалах, например, на основе ниобата лития, плечо имеет порядок постоянной кристаллической решетки $a_{\text{кр}}$. В квантовых структурах (квантовых ямах) величина плеча гораздо больше (равна ширине ямы). Отношение плеч определяет степень инерционности материала, изменения коэффициента преломления и увеличения скорости модуляции. В многослойных квантовых структурах, допустим, сверхрешётках (рис. 4), представляющих собой чередование слоев из полупроводников с различной шириной запрещенной зоны, плечо еще больше, чем у квантовых ям.

В сверхрешётках (СВР) плечом в зависимости от приложенного напряжения может быть как один, так и несколько периодов решетки d (период – сумма ширины ямы и ширины барьера). Отсюда степень роста частоты модуляции равна отношению $\kappa_d/a_{\text{кр}}$, где κ_d – число периодов СВР, составляющих плечо.

Наибольшей эффективностью обладают изотопические сверхрешётки.

В таких наноструктурах пространственное ограничение носителей заряда осуществляется соединением слоев из разных изотопов одного и того же вещества. Получаемые при этом «гомопереходы» не будут вызывать

механических напряжений в кристаллической решетке и влиять на волновые функции свободных носителей заряда. Возможность получения изотопических наноструктур с требуемыми характеристиками основывается на изменениях физико-технических параметров (ширины запрещенной зоны, коэффициентов преломления, электросопротивления и т.д.) при различных концентрациях изотопов одного и того же химического элемента (изотопический эффект).

В изотопических сверхрешётках, где глубина проникновения электронов в соседние квантовые ямы больше за счёт меньшей высоты потенциального барьера, чем в СВР из разных полупроводников, плечо может возрасти в несколько раз, а частота модуляции увеличится на порядок, что значительно выше 100 ГГц [2].

Влияние изотопических сверхрешёток (ИСВР) на работу фотоприёмников (ФП) обусловлено уменьшением числа каналов рассеяния света из-за однородности кристаллической решетки и значительного уменьшения дефектов. Это сказывается на увеличении квантовой эффективности фотоприёмника $K_{эфф}$, которая непосредственно влияет на его чувствительность. В значительной степени чувствительность в фотоприёмнике на изотопических сверхрешётках повышается за счёт увеличения коэффициента усиления g . Это происходит из-за повышения времени жизни носителей заряда τ в ИСВР и уменьшения времени их транзита $t_{тр}$ через ФП.

Так, двукратное повышение скорости носителей заряда в изотопически чистых материалах из кремния приведет к такому же повышению времени жизни носителей и уменьшению времени движения их по фотоприёмнику [2]. При этом в четыре раза увеличатся коэффициент усиления, чувствительность и снизится мощность теплового шума фотоприёмника. Кроме того, использование изотопических сверхрешёток из кремния в полупроводниковых лазерах повышает и эффективность источников света благодаря повышению «времени жизни»

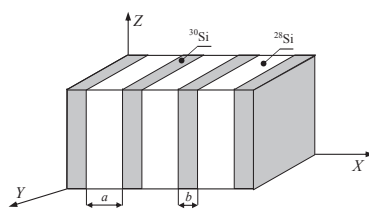


Рис. 4. Модель сверхрешетки на изотопах кремния (a – квантовая яма, b – барьер).

экситонов. Это уменьшает полосу излучения полупроводниковых лазеров в два раза, позволяет сократить межканальный интервал, организовать дополнительные волновые каналы в системе волнового уплотнения ВОСП и повысить спектральную эффективность [3].

Таким образом, пропускная способность ВОСП с базовыми элементами на изотопических сверхрешётках возрастает на порядок за счёт:

- 1) увеличения динамического диапазона фотоприёмника (повышения в четыре раза чувствительности и соответственно снижения в четыре раза мощности шумов);
- 2) повышения скорости модуляции оптических модуляторов минимум в два раза;
- 3) уменьшения полосы излучения полупроводниковых лазеров в два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сляков О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 261 с.
2. Журавлёва Л. М., Змеева А. А., Новожилов А. В., Кручинин А. С. Повышение эффективности волоконно-оптических систем передачи информации с помощью изотопических сверхрешёток // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – № 12. – С. 60–66.
3. Журавлёва Л. М., Потапов А. А. Развитие отрасли нанотехнологий в России: методология, концепция и практика / Монография. – М.: Научное обозрение, 2014. – 160 с.
4. Журавлёва Л. М., Змеева А. А., Логинов Д. А. Спектральная эффективность и изотопические сверхрешётки // Мир транспорта. – 2012. – № 6. – С. 10–15.
5. Журавлёва Л. М., Новожилов А. В., Кручинин А. С. Потенциальные возможности повышения пропускной способности оптического канала связи // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 7. – С. 11–16.
6. Журавлёва Л. М., Новожилов А. В., Кручинин А. С., Логинов Д. А. Проектирование изотопических сверхрешёток // Телекоммуникации. – 2013. – № 7. – С. 12–18.

Координаты авторов: **Журавлёва Л. М.** – zhlobov@mail.ru, **Малых А. Н.** – aleksey.malykh9@gmail.com, **Малых А. Н.** – aleksandr_malykh@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 01.06.2015, актуализирована 17.02.2016, принята к публикации 18.02.2016.

