

Теоретическое исследование влияния толщины барьера на оптические свойства полупроводникового устройства для замедления света на множественных квантовых ямах*

С.Абдолхосейни, Х.Каатузьян, Р.Кохандани, Б.Чупанзаде

Дано объяснение влияния толщины барьера на функционирование устройств для замедления света на множественных квантовых ямах (МКЯ) в GaAs/AlGaAs как следствие влияния когерентных осцилляций населенности на фактор замедления и ширину полосы таких устройств. Для анализа и моделирования устройств для замедления света использовались уравнения Блоха и аналитическая модель в пространстве дробной размерности. Показано, что другие физические параметры структур на МКЯ (ширина квантовой ямы и концентрация примеси в барьере) также оказывают заметное влияние на оптические свойства устройства. Предложенные подходы позволяют получить устройство с желаемыми значениями фактора замедления и центральной частоты путем подбора толщины барьера, ширины квантовой ямы и содержания алюминия. Максимальный диапазон перестройки частоты составил в наших расчетах ~ 1 ТГц, а фактор замедления достигал 8.5×10^4 .

Ключевые слова: толщина барьера, медленный свет, фактор замедления, осцилляции экситонной населенности, центральная частота.

1. Введение

В последние годы управление скоростью света привлекает внимание многих исследователей. Апробировано множество способов для уменьшения и увеличения скорости распространения светового импульса [1]. Потенциальные применения этих эффектов в нелинейной и квантовой оптике стимулировали попытки реализовать управление скоростью импульсов в различных оптических устройствах, включая оптические модуляторы, оптические затворы, синхронизаторы уровня бита и полностью оптические переключатели [2, 3].

Для уменьшения скорости светового импульса применяются несколько механизмов. Между методами существуют различия по используемым средам и структурам [2, 3]. Выбор метода возможен, исходя из свойств материала, желаемых значений скорости света и ширины полосы выходного сигнала. Применяемые механизмы включают в себя когерентные осцилляции населенности (КОН), волноводы в фотонных кристаллах, оптические волноводы из связанных резонаторов, вынужденное рассеяние Манделштама–Бриллюэна (ВРМБ) и вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) [4].

КОН – механизм, используемый для получения медленного света в полупроводниках при когерентном взаимодействии накачки и пробного излучения. Одна из выгодных сторон метода КОН заключается в том, что он требует большого времени релаксации [5]. Недавно были

выполнены разнообразные исследования по замедлению света в полупроводниках [3]. В пользу применения полупроводников для замедления света говорят такие их свойства, как температурная зависимость и совместимость с другими оптическими устройствами [3, 6]. Нужно отметить, что полупроводниковые структуры для использования их в системах замедления света должны иметь сильную материальную дисперсию [3].

Экситоны играют заметную роль при использовании метода КОН для изменения скорости света [5]. Существует много публикаций, посвященных влиянию экситонов на оптические характеристики систем для замедления света [7–9]. Например, изменение энергии связи экситонов приводит к изменению оптических характеристик и центральной частоты в таких системах. В некоторых публикациях рассматривается влияние физических параметров структур на энергию связи экситона и оптические свойства системы [8]. Существуют несколько физических параметров, обуславливающих модификацию экситонных характеристик в структурах с множественными квантовыми ямами (МКЯ), в том числе тип используемых материалов, ширина ямы и концентрация примеси в барьере. Более того, толщина барьера также может влиять на такие важные свойства экситона, как энергия связи, сила осцилятора экситона (СОЭ) и дробная размерность в структурах с МКЯ. Эти изменения, в свою очередь, вызывают изменения фактора замедления (ФЗ) и сдвиг центральной частоты для устройства замедления света. Структурные параметры, такие как радиус и высота квантовых точек (КТ), тоже являются значимыми факторами, определяющими оптические свойства устройств для замедления света на КТ [10,11].

В настоящей статье мы описываем и моделируем устройство для замедления света на МКЯ по методу КОН с использованием оптических уравнений Блоха и сравниваем наши теоретические результаты с экспериментальными. Кратко описаны отличия модели, основанной на уравнениях Блоха, от аналитической модели в простран-

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

S.Abdolhosseini, H.Kaatuzyan, R.Kohandani, B.Choupanzadeh. Photonics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), 424 Hafez Avenue, Tehran 159163-4311, Iran; e-mail: hsnkato@aut.ac.ir

Поступила в редакцию 24 апреля 2017 г., после доработки – 3 августа 2017 г.

стве дробной размерности. В разд.3 мы исследуем влияние толщины барьера на энергию связи экситона, СОЭ и параметр дробной размерности. Попутно на основе уравнений Блоха иллюстрируется влияние толщины барьера на показатель преломления, ФЗ и сдвиг центральной частоты в устройстве для замедления света. Наконец, на основе аналитической модели в пространстве дробной размерности рассматриваются изменения параметров замедлителя света, включая ФЗ и показатель преломления. Результаты расчетов показывают, что ФЗ и центральную частоту можно устанавливать путем подбора толщины барьера, концентрации примеси в барьере и ширины ямы.

2. Теория

В этом разделе обсуждается теория функционирования устройства для замедления света на структуре с МКЯ на основе механизма КОН и исследуется влияние толщины барьера на такие оптические параметры устройства, как энергия связи, СОЭ и дробная размерность. Анализ МКЯ-структур для замедления света за счет эффекта КОН проводится с помощью двух подходов. Один из них основан на уравнениях Блоха для полупроводника, а другой – на аналитической модели в пространстве дробной размерности [8, 9].

2.1. Описание КОН в системах для замедления света на полупроводниковой МКЯ-структуре с помощью уравнений Блоха

Целью каждого устройства для замедления света является снижение групповой скорости v_g . Для уменьшения групповой скорости требуется резкое изменение действительной части показателя преломления в узком частотном диапазоне. Это изменение влияет на оптические параметры устройств для замедления света. Групповая скорость определяется действительной частью показателя преломления $n(\omega)$ и ее производной $dn(\omega)/d\omega$ [1]:

$$v_g = \frac{c}{n_g} = \frac{c}{n(\omega) + \omega dn(\omega)/d\omega}. \quad (1)$$

В методе КОН резкое изменение действительной части показателя преломления создается с помощью двух сигналов. Этими сигналами являются излучение накачки и пробное излучение, действующие на структуру. Когда разность частот накачки и пробного излучения близка к обратному времени жизни экситона, в двухуровневой системе возникают осцилляции экситонной населенности. В полупроводниках двухуровневая система образована состоянием экситона квантовой ямы (КЯ) с тяжелой дыркой (ТД) и зоной проводимости. Осцилляции экситонной населенности приводят к образованию провала в спектре поглощения. Согласно соотношениям Крамерса–Кронига этот провал создает положительный градиент действительной части показателя преломления, что и требуется для устройств замедления света, поскольку групповая скорость света уменьшается. Для исследования двухуровневых систем обычно применяются уравнения Блоха. Поэтому и мы использовали эти уравнения для анализа устройств для замедления света, в основе которых лежит двухуровневая система. Эффективная полная разность населенностей и объемная плотность поляризации среды в реальном пространстве удовлетворяют уравнениям [12]

Табл.1.

| Параметр | Значение параметра |
|--|--|
| Постоянная переверота спина Γ_s | 50 пс |
| Скорость продольной релаксации Γ_1 | 2.5133 нс ⁻¹ |
| Скорость поперечной релаксации $\Gamma_2(N_{ex\sigma})$ | 0.4716 пс ⁻¹ |
| Экситонная частота ω_{ex} | 2.333×10^{15} с ⁻¹ |
| Дипольный момент перехода $ 1\rangle \rightarrow 2\rangle \mu_{12}$ | 1.04×10^{-18} Å |
| Равновесная разность населенностей $N_{ex\sigma}^{(0)}$ | -1 |

$$\frac{\partial N_{ex\sigma}}{\partial t} = -\Gamma_1(N_{ex\sigma} - N_{ex\sigma}^{(0)}) - \Gamma_s(N_{ex\sigma} - N_{ex\bar{\sigma}}) + 4 \operatorname{Im} \left[\frac{\mu_{12}\varepsilon(t)}{2\hbar} P_{ex\sigma} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_{ex\sigma}}{\partial t} = -i[\omega_{ex} - i\Gamma_2(N_{ex\sigma})]P_{ex\sigma} - i\frac{\mu_{12}\varepsilon(t)}{2\hbar}N_{ex\sigma}, \quad (3)$$

где нижний индекс σ обозначает спиновое состояние системы ($\sigma = \uparrow, \downarrow$); $\varepsilon(t)$ – напряженность электрического поля; $N_{ex\sigma}$ и $P_{ex\sigma}$ – эффективная полная разность населенностей и межзонная поляризация. В табл.1 приведены остальные параметры [5], входящие в уравнения (2) и (3).

Данные уравнения справедливы в режиме слабого возбуждения и не учитывают эффектов экранирования электронно-дырочной плазмой и заполнения фазового пространства [5].

Одним из важных параметров в уравнениях Блоха является тензор линейной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_s(\omega_s)$, который получается решением соответствующего оптического уравнения в стационарных условиях [8]. Показатель преломления, коэффициент поглощения и ФЗ даются выражениями [8]

$$n_s(\omega_s) = \sqrt{\varepsilon_s(\omega_s)}, \quad (4)$$

$$A_s(\omega_s) = 2\frac{\omega_s}{c} \operatorname{Im}[n_s(\omega_s)], \quad (5)$$

$$R_s(\omega_s) = \operatorname{Re}[n_s(\omega_s)] + \omega_s \frac{\partial \operatorname{Re}[n_s(\omega_s)]}{\partial \omega_s}. \quad (6)$$

На рис.1 показана структура устройства для замедления света на МКЯ в GaAs/AlGaAs, использованная в настоящей работе для теоретического исследования и моделирования КОН. Эта структура содержит 15 периодов

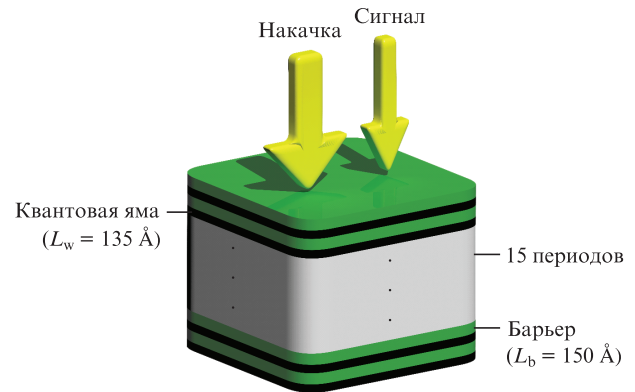


Рис.1. Структура устройства для замедления света на МКЯ в GaAs/AlGaAs, описанная в [5]; L_w – ширина КЯ, L_b – ширина барьера.

КЯ на основе GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As. Из рис.1 видно, что пучки сигнального излучения и накачки перпендикулярны слоям, образующим КЯ.

На рис.2 представлены результаты моделирования коэффициента поглощения, действительной части показателя преломления и ФЗ в зависимости от расстройки частот излучения накачки и пробного сигнала при осциллирующих экситонной населенности. Следует отметить, что экспериментальные результаты для устройства замедления света на МКЯ в GaAs/AlGaAs [5] превосходно подтверждают результаты, полученные в настоящей работе путем моделирования. Из рис.2 видно, что минимальное поглощение, максимальное значение ФЗ и резкое изменение действительной части показателя преломления имеют место при нулевой расстройке частот излучения накачки и пробного сигнала. Таким образом, наименьшая групповая скорость достигается при нулевой расстройке частот пробного сигнала и накачки, которые устанавливаются равными экситонной частоте (резонансной энергии экситона). Наша дальнейшая цель состоит в поиске путей

оптимизации устройства с целью улучшения его характеристик.

2.2. Описание КОИ в устройствах для замедления света на полупроводниковых МКЯ-структурах на основе аналитической модели с дробной размерностью

В ряде работ для анализа замедления света в МКЯ-структуре рассматривалась аналитическая модель с дробной размерностью [9]. В работе [9] исследовано влияние ширины ямы на оптические свойства устройств, соответствующих данной модели. Уравнения Блоха не учитывают изменений силы осциллятора экситона и параметра дробной размерности в ходе моделирования, поскольку эти уравнения справедливы при слабом возбуждении и не описывают эффектов экранирования электронно-дырочной плазмой и заполнения фазового пространства, как уже отмечалось выше. Следовательно, в данной модели вариация параметров МКЯ-структур изменяет только центральную частоту и не оказывает влияния на ФЗ. Поэтому в следующих разделах мы используем уравнения Блоха для моделирования влияния толщины барьера на центральную частоту. Аналитическая модель учитывает изменения силы осциллятора экситона и дробной размерности [13, 14]. Таким образом, в рамках данной модели появляется возможность наблюдать влияние толщины барьера на эти переменные. Более детальные сведения об обсуждаемом методе представлены в [9, 15].

2.3. Влияние толщины барьера

2.3.1. Зависимость энергии связи от толщины барьера. Влияние ширины ямы и концентрации примеси в барьере на энергию связи и оптические параметры устройств для замедления света было исследовано ранее [16]. Энергия связи для МКЯ на GaAs/AlGaAs находится из решения уравнения Шредингера для состояния экситона и имеет вид [17]

$$E_b(\gamma) = \begin{cases} (\gamma - 1)^{-1} \ln^2[\gamma^{1/2} + (\gamma - 1)^{1/2}], & \gamma > 1, \\ 1, & \gamma = 1, \\ (1 - \gamma)^{-1} \arcsin^2[(1 - \gamma)^{1/2}], & \gamma < 1, \end{cases} \quad (7)$$

где γ – параметр анизотропии, определяемый выражением [17]

$$\gamma = \frac{\mu_{\parallel}}{\mu_{\perp}}; \quad (8)$$

μ_{\parallel} и μ_{\perp} – значения эффективной массы экситона в плоскости слоев структуры в двух ортогональных направлениях [17]:

$$\frac{1}{\mu_{\parallel}} = \frac{1}{m_{e\parallel}} + \frac{1}{m_{h\parallel}}, \quad (9)$$

$$\mu_{\perp} = m_{e\perp} + m_{h\perp}. \quad (10)$$

В табл.2 содержатся параметры, входящие в уравнения (9) и (10), а также ширина запрещенной зоны [17]. Материальные параметры даны в единицах массы свободного электрона m_0 .

Для расчета энергии связи в МКЯ-структуре на GaAs/Al_xGa_{1-x}As с помощью уравнений (7)–(10) сначала из

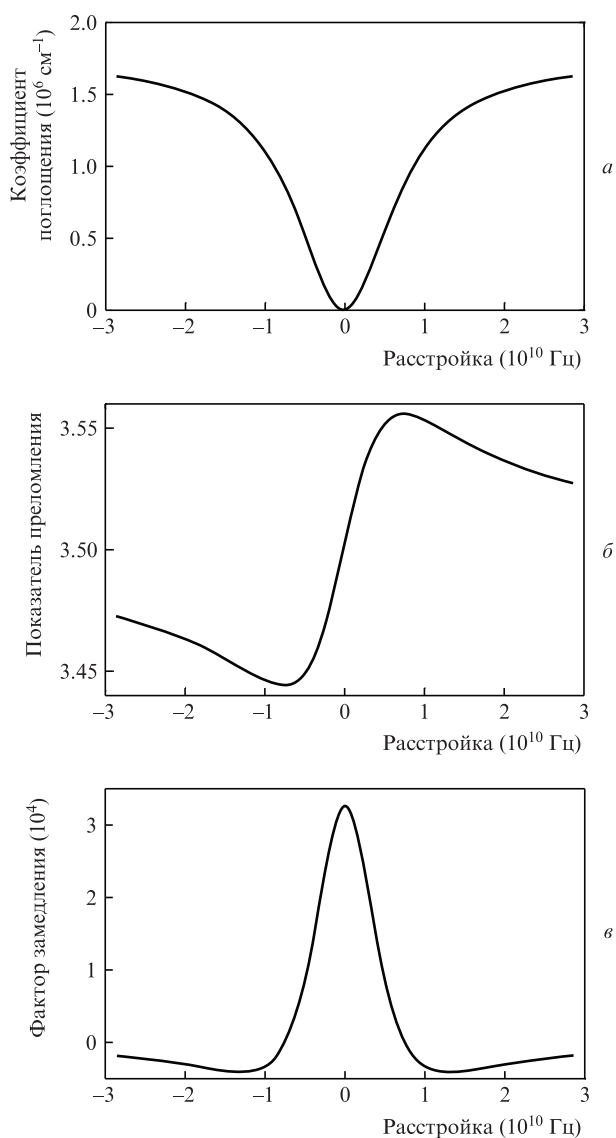


Рис.2. Коэффициент поглощения (а), действительная часть показателя преломления (б) и фактор замедления (в) в зависимости от частотной отстройки при использовании метода КОИ в МКЯ-структуре на GaAs/AlGaAs.

Табл.2.

| Параметр | Значение параметра | |
|--|--------------------|------------|
| | GaAs | AlAs |
| Эффективная масса электрона в плоскости слоев $m_{e\parallel}$ | $0.06m_0$ | $0.1m_0$ |
| Эффективная масса дырки в плоскости слоев $m_{h\parallel}$ | $0.11m_0$ | $0.2m_0$ |
| Эффективная масса электрона в направлении, перпендикулярном плоскости слоев $m_{e\perp}$ | $0.06m_0$ | $0.15m_0$ |
| Эффективная масса дырки в направлении, перпендикулярном плоскости слоев $m_{h\perp}$ | $0.34m_0$ | $0.752m_0$ |
| Ширина запрещенной зоны E_g | 1.514 эВ | 3.11 эВ |

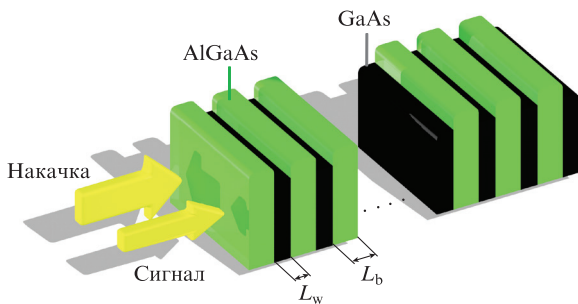
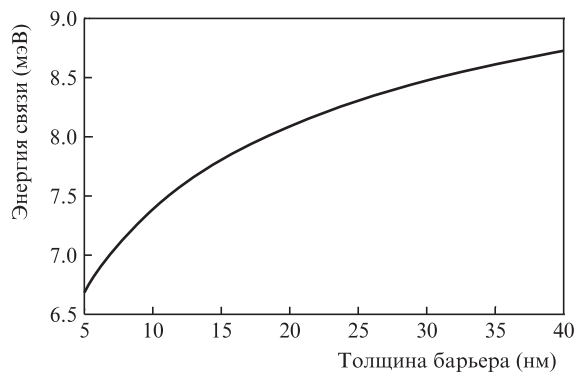


Рис.3. Пространственная зависимость энергии запрещенной зоны (по вертикали), а также ширина ям и толщина барьеров МКЯ-структуры замедлителя света на GaAs/AlGaAs.

табл.2 найдем значения эффективных масс и учтем сдвиг зоны, составляющий 0.67 эВ [17]. Необходимо иметь в виду, что во всех МКЯ-структурах на GaAs/Al_xGa_{1-x}As эффективные массы зависят от ширины ямы, толщины барьера, а также от концентрации примеси в барьерах структуры. Затем получаем параметр анизотропии (8). Изменения эффективных масс приводят к изменению параметра анизотропии [17]. Наконец, для найденных значений параметра анизотропии в соответствии с уравнением (7) вычисляем энергию связи. Другими словами, можно получить значения энергии связи экситонов с ТД на основе изменения структурных параметров: толщины барьера, ширины ямы и концентрации примеси в барьере [18].

Чтобы в дальнейшем лучше понять роль ширины ямы и толщины барьера, на рис.3 показана пространственная зависимость энергии запрещенной зоны, а также ширина ям и толщина барьеров структуры.

На рис.4 приведены результаты расчета энергии связи в зависимости от толщины барьера для МКЯ-структуры на

Рис.4. Зависимость энергии связи от толщины барьера в МКЯ-структуре на GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As с шириной квантовой ямы 135 Å.

GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As с шириной ямы 135 Å. Видно, что энергия связи увеличивается с увеличением толщины барьера. Эта тенденция противоположна той, которая имеет место при изменении ширины ямы, когда энергия связи с ростом ширины ямы уменьшается [8]. Полученный результат, показанный на рис.4, находится в удовлетворительном согласии с выводами работы [18].

2.3.2. *Влияние толщины барьера на дробную размерность.* Насколько нам известно, в пространстве дробной размерности существуют две важные переменные для моделирования систем замедления света: сила осциллятора экситона и параметр дробной размерности. Последний зависит от энергии связи, обсуждавшейся в предыдущей части работы. Таким образом, дробная размерность оказывается связанной с толщиной барьера. Корреляцию между этими переменными можно представить в виде [19]

$$E_b = \frac{4}{(D-1)^2} R^*, \quad (11)$$

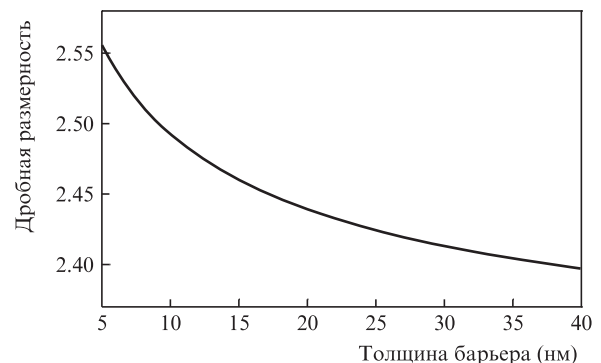
где R^* – эффективная постоянная Ридберга примеси; D – дробная размерность.

На рис.5 приведен результат расчета дробной размерности как функции толщины барьера при ширине ямы 135 Å в МКЯ-структуре на GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As. Видно, что утолщение барьера приводит к уменьшению дробной размерности. Отметим, что дальнейшие изменения этого параметра происходят при толщине барьера менее 5 нм и не рассматриваются в настоящей работе. Из рис.5 следует, что изменение дробной размерности вызвано изменением энергии связи, а значит, и толщины барьера. Этот результат согласуется с моделью, описанной в [19].

2.3.3. *Реакция СОЭ на изменение толщины барьера.* Как упоминалось выше, СОЭ играет значительную роль при моделировании устройств для замедления света в пространстве дробной размерности. Сила осциллятора экситона в структуре с КЯ может быть представлена в виде [20,21]

$$f = \frac{2K_s |Q|^2}{\pi m_0 E_s L_w |\phi_{ch}(0)|^2} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi_e \psi_h dz \right|^2, \quad (12)$$

где ψ_h и ψ_e – огибающие волновых функций дырки и электрона соответственно; L_w – ширина КЯ; коэффициент $K_s = 0.5$ для ТД; Q – матричный элемент перехода между валентной зоной и зоной проводимости; E_s – энергия экситонного перехода [20, 21];

Рис.5. Дробная размерность как функция толщины барьера в МКЯ-структуре на GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As с шириной КЯ 135 Å.

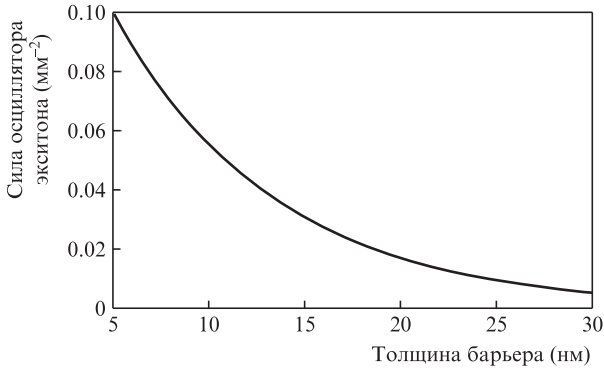


Рис.6. Влияние толщины барьера на силу осциллятора экситона в МКЯ-структуре на GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As при ширине КЯ 135 Å.

$$\phi_{eh}(0) = \frac{1}{\lambda} \sqrt{2/\pi} \quad (13)$$

– огибающая волновой функции экситона [20]; λ – вариационный параметр [20]. Упрощая уравнение (12) путем подстановки выражений для входящих в него величин, можно приближенно аппроксимировать СОЭ функцией $\exp(-2L_b\omega_s/c)$, где L_b – толщина барьера [22].

На рис.6 показано изменение СОЭ как функции толщины барьера. Наблюдается снижение СОЭ с ростом толщины барьера. В соответствии с изменениями СОЭ и дробной размерности мы можем определить параметры устройства для замедления света, а также рассмотреть влияние ширины ямы на эти параметры на основе результатов предыдущих исследований, описанных в [23, 24].

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Оценка влияния толщины барьера на оптические параметры с помощью уравнений Блоха

Экситонная энергия – существенная переменная в уравнениях Блоха, используемых для моделирования устройств для замедления света. С экситонной энергией E_{ex} связана центральная частота для таких устройств. Эта энергия определяется энергией запрещенной зоны и энергией связи:

$$E_{ex} = E_g - E_h. \quad (14)$$

Как отмечалось в п.2.2, в устройствах для замедления света на МКЯ энергия связи зависит от толщины барьера. Следовательно, толщина барьера оказывает непосредственное влияние на экситонную энергию в уравнениях Блоха.

На рис.7 показана зависимость действительной части показателя преломления и ФЗ от частоты при трех значениях толщины барьера. Видно, что изменение толщины барьера приводит к сдвигу центральной частоты. Частотный сдвиг положителен при толщине барьера менее 150 Å и отрицателен при толщине более 150 Å. Сплошные кривые соответствуют экспериментальному результату для устройства замедления света на МКЯ в GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As с толщиной барьера 150 Å [5]. Кривые на рис.7 построены при фиксированной ширине КЯ 135 Å и содержании алюминия 0.3. Хорошо видно, что изменение толщины барьера не влияет на величины n_s и $\partial \text{Re}n_s / \partial \omega_s$ (наклон показателя преломления), а просто сдвигает центральную частоту для устройства. В дополнение к этому, пиковое

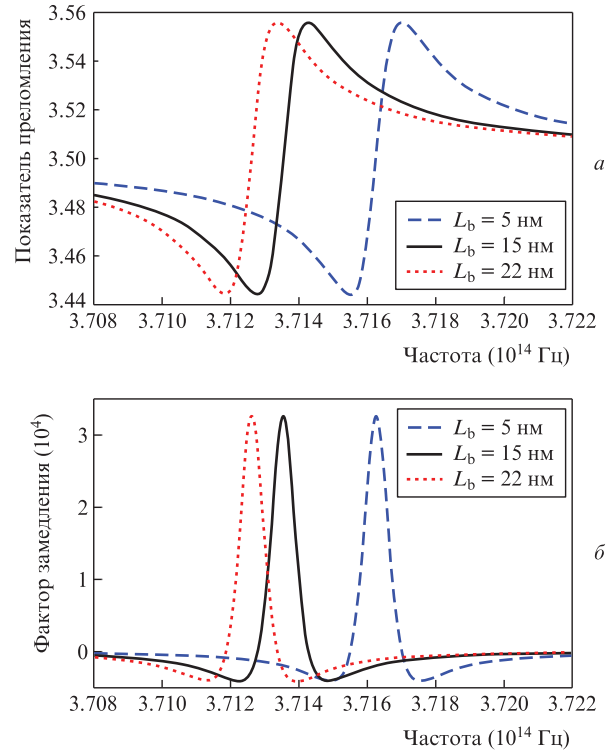


Рис.7. Действительная часть показателя преломления (а) и фактор замедления (б) МКЯ-структуры на GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As в зависимости от частоты для трех значений толщины барьера L_b при фиксированной ширине КЯ 135 Å.

значение ФЗ не зависит от толщины барьера, потому что изменения СОЭ в уравнениях Блоха не учитываются.

С физической точки зрения утолщение барьера увеличивает энергию связи. С ростом энергии связи экситонная энергия уменьшается. Следовательно, с утолщением барьера зона ТД-экситона полупроводника опускается. Это означает, что разность энергий зоны проводимости и состояния ТД-экситона с ростом толщины барьера увеличивается. Итак, уменьшение энергии состояния ТД-экситона в результате увеличения толщины барьера приводит к сдвигу центральной частоты (или энергии) системы. Центральная энергия равна энергии фотона накачки, который создает осцилляции населенности и провал в спектре поглощения устройства для замедления света на МКЯ. Следовательно, основной причиной сдвига центральной частоты является смещение зоны ТД-экситона из-за изменения толщины барьера.

На рис.8,а показано поведение действительной части показателя преломления при одновременном изменении толщины барьера и частоты. Видно, что изменения толщины барьера приводят к смещению центральной частоты, а именно: увеличение толщины барьера сдвигает центральную частоту в область меньших значений.

На рис.8,б приведена зависимость ФЗ от толщины барьера и частоты. Ширина КЯ и содержание примеси постоянны и равны 135 Å и 0.3 соответственно. Видно, что максимальное значение ФЗ не зависит от изменений толщины барьера вследствие того, что уравнения Блоха не учитывают изменений СОЭ. Как и на рис.7, изменение толщины барьера приводит только к смещению центральной частоты. Выше уже говорилось, что изменение толщины барьера изменяет энергию связи, что обуславливает

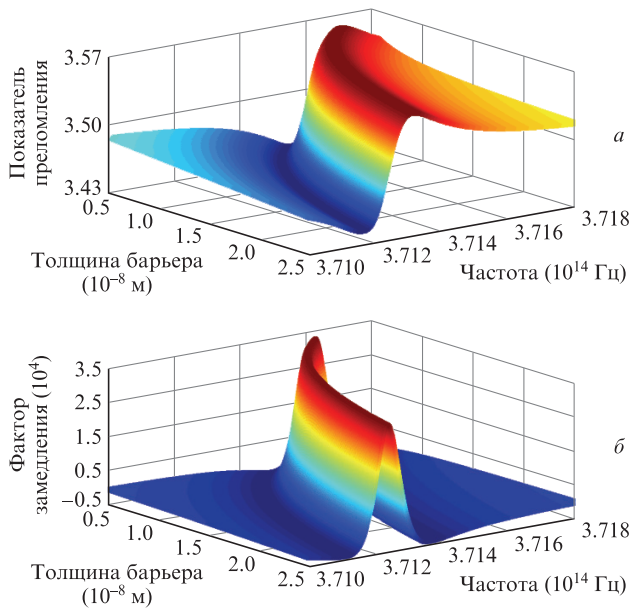


Рис.8. Поведение действительной части показателя преломления (а) и фактора замедления (б) в зависимости от толщины барьера и частоты при постоянной ширине ямы 135 Å и концентрации примеси в барьере 0.3.

частотный сдвиг оптических параметров устройств для замедления света на МКЯ.

В работе [16] исследовано, как одновременные изменения ширины ямы и концентрации примеси в барьере влияют на центральную частоту для устройства замедления света на МКЯ. Из результатов моделирования, описанного в [16], следует, что увеличение ширины ямы приводит к снижению энергии связи, что вызывает сдвиг центральной частоты для устройства замедления света в высокочастотную область. Увеличение концентрации примеси в барьере ведет к росту энергии связи, вызывая сдвиг центральной частоты вниз. Физический механизм заключается в том, что с ростом ширины ямы снижается энергия связи и энергия ТД-экситона смещается вверх. Таким образом, центральная частота (энергия) увеличивается по мере увеличения ширины ямы. С другой стороны, энергия связи экситона уменьшается с уменьшением концентрации примеси в барьере и повышает энергию зоны ТД-экситона. Это смещение состояния ТД-экситона сдвигает центральную частоту вниз.

На рис.9 показано изменение центральной частоты системы в зависимости от физических параметров устройства для замедления света. Из рис.9,а видно, что сдвиг центральной частоты зависит от толщины барьера и содержания алюминия. Ширина ямы составляет 135 Å. Уменьшение толщины барьера ведет к увеличению сдвига центральной частоты при постоянных значениях концентрации примеси в барьере. Также, в соответствии с [16], увеличение концентрации примеси в барьере уменьшает сдвиг частоты.

Влияние одновременного изменения ширины ямы и толщины барьера на сдвиг частоты демонстрирует рис.9,б. Он получен на основании уравнений Блоха при постоянном содержании алюминия 0.3. Видно, что сдвиг частоты при изменении ширины ямы противоположен сдвигу частоты при изменении толщины барьера в ту же сторону. При этом влияние толщины барьера на сдвиг частоты

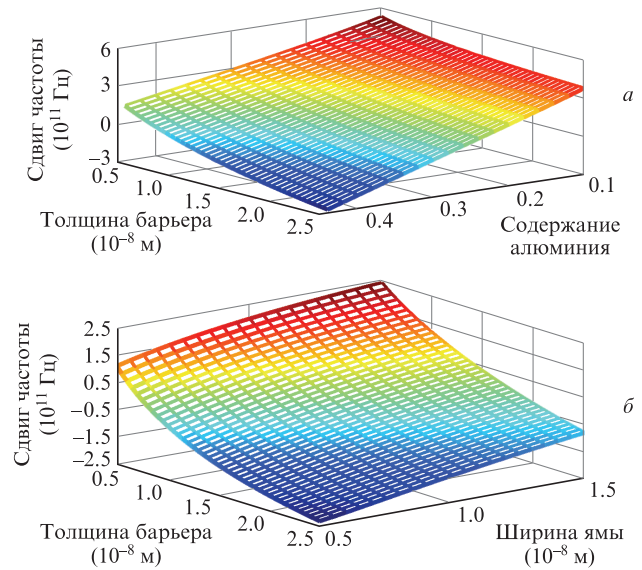


Рис.9. Поведение сдвига центральной частоты при одновременном изменении толщины барьера и содержания алюминия (а), а также толщины барьера и ширины ямы (б).

сильнее влияния ширины ямы. Центральную частоту для устройства можно устанавливать путем выбора таких физических параметров, как толщина барьера, ширина КЯ и содержание алюминия.

3.2. Влияние толщины барьера на оптические параметры в рамках аналитической модели в пространстве дробной размерности

Полученные в п.3.1 результаты показывают, что изменения толщины барьера приводят к сдвигу центральной частоты, а величина ФЗ и наклон показателя преломления постоянны для всех значений толщины барьера. Здесь влияние толщины барьера в устройствах для замедления света изучается в рамках аналитической модели в пространстве дробной размерности. Изменения СОЭ и параметра дробной размерности играют в этой модели фундаментальную роль.

На рис.10 показаны зависимости показателя преломления и ФЗ от энергии квантов. Кривые построены для трех значений толщины барьера. Видно, что для каждой толщины барьера существует своя центральная энергия. Действительно, изменение толщины барьера приводит к смещению центральной энергии. Кроме того, величина и наклон показателя преломления связаны с толщиной барьера. Изменения показателя преломления являются результатом изменений СОЭ и дробной размерности. С другой стороны, увеличение толщины барьера вызывает уменьшение СОЭ и параметра дробной размерности, так что уменьшение этих параметров увеличивает крутизну наклона показателя преломления. Уменьшение наклона показателя преломления с ростом толщины барьера снижает пиковое значение ФЗ, что хорошо видно из рис.10,б.

Причина изменений наклона и величины показателя преломления заключается в изменении коэффициента поглощения. Другими словами, когда толщина барьера становится больше, глубина провала в спектре поглощения уменьшается. Согласно соотношениям Крамерса–Кро-

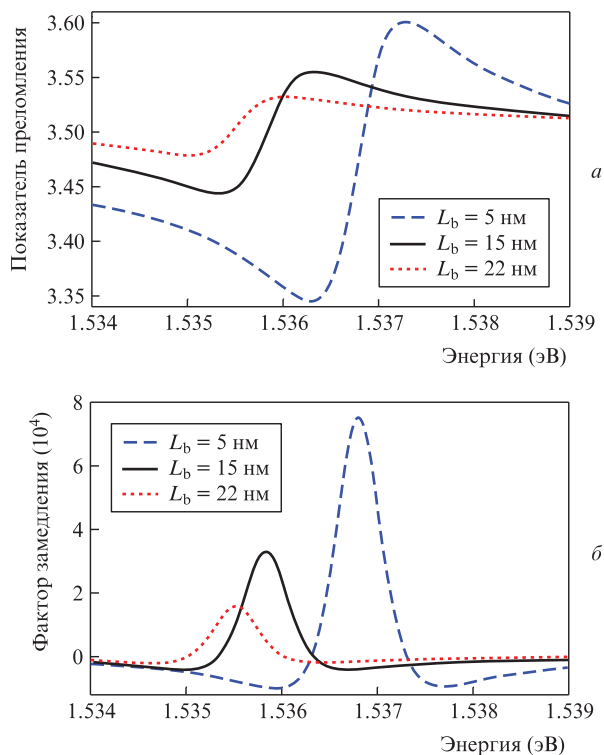


Рис.10. Действительная часть показателя преломления (а) и фактор замедления (б) для устройства на МКЯ в зависимости от энергии при трех значениях толщины барьера, фиксированном значении ширины ямы 135 Å и содержании алюминия 0,3.

нига это ведет к изменению величины и наклона показателя преломления.

Поведение действительной части показателя преломления при одновременном изменении толщины барьера и энергии квантов иллюстрирует рис.11,а.

На рис.11,б показана зависимость ФЗ от энергии и толщины барьера при ширине КЯ 135 Å в структуре на

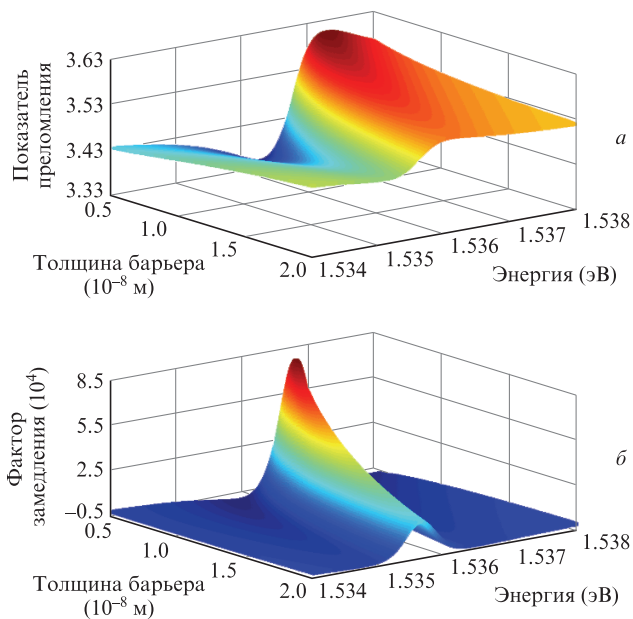


Рис.11. Поведение действительной части показателя преломления (а) и фактора замедления (б) в зависимости толщины барьера и энергии при ширине ямы 135 Å и концентрации примеси в барьере 0.3 для системы замедления света на МКЯ в GaAs/AlGaAs.

GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As. Видно, что изменение толщины барьера приводит к сдвигу энергии и изменению максимального значения ФЗ. При увеличении толщины барьера увеличивается энергия связи, что обуславливает снижение центральной энергии. Более того, при увеличении толщины барьера значения силы осциллятора экситона и дробной размерности уменьшаются, вследствие чего уменьшаются наклон показателя преломления и ФЗ. Уменьшение наклона показателя преломления непосредственно влияет на величину пика ФЗ, что наглядно демонстрирует рис.11,б.

На рис.12 представлены зависимости максимального значения ФЗ от физических параметров КЯ, включая толщину барьера, содержание алюминия и ширину ямы. Влияние концентрации примеси в барьере и толщины барьера на максимальное значение ФЗ иллюстрирует рис.12,а. Хорошо известно, что снижение содержания алюминия уменьшает ФЗ и увеличивает параметр дробной размерности. Таким образом, максимальное значение ФЗ уменьшается при уменьшении содержания алюминия. Этот рисунок построен по результатам расчета при постоянной ширине КЯ, равной 135 Å. На рис.12,б показаны изменения максимального значения ФЗ при одновременной вариации ширины ямы и толщины барьера в случае фиксированного содержания алюминия (0.3). Уменьшение как ширины ямы, так и толщины барьера вызывает рост максимума ФЗ. С другой стороны, уменьшение ширины ямы обуславливает увеличение ФЗ и снижение параметра дробной размерности [9]. Уменьшение толщины барьера приводит к увеличению СОЭ и дробной размерности. Эти изменения параметров вызывают увеличение ФЗ по мере уменьшения толщины барьера. На основе полученных результатов можно выбирать те значения физических параметров (концентрация примеси в барьере, его толщина и ширина КЯ), которые обеспечивают требуемое максимальное значение ФЗ.

Из рис.12 видно, что одновременное уменьшение ширины ямы и толщины барьера вызывает значительный рост пикового значения ФЗ, что создает определенные преимущества для системы замедления света.

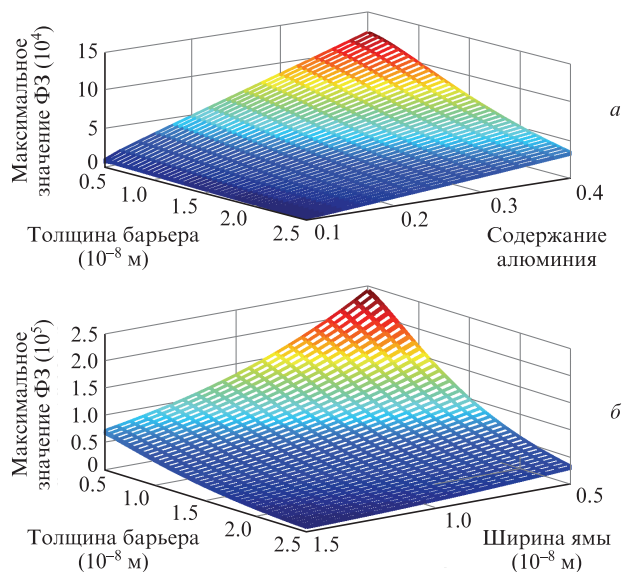


Рис.12. Зависимости максимального значения ФЗ от толщины барьера и концентрации алюминия (а), а также от толщины барьера и ширины ямы (б).

4. Заключение

Исследовано влияние толщины барьера на основные параметры устройства для замедления света на МКЯ в GaAs/AlGaAs. Применялись два подхода для анализа и моделирования структуры, замедляющей свет за счет КОН. Изменение энергии связи рассмотрено в рамках подхода, основанного на уравнениях Блоха. Использовалась также аналитическая модель в пространстве дробной размерности, позволяющая описать влияние СОЭ и параметра дробной размерности на оптические свойства устройства. Согласно полученным результатам, можно достичь больших значений сдвига центральной частоты путем уменьшения толщины барьера. Максимальное значение ФЗ также можно увеличить, уменьшая толщину барьера.

Показано, что можно подбирать ФЗ и значительно снижать групповую скорость, что является основной задачей для любой системы замедления света. Более того, можно перестраивать центральную частоту для устройства в диапазоне ~ 1 ТГц.

Толщина барьера, как и ширина ямы, и концентрация примеси в барьере, оказывает большое влияние на оптические характеристики замедлителей света на МКЯ-структурах GaAs/AlGaAs.

- Gauthier D.J., Gaeta A.L., Boyd R.W. *Photon. Spectra*, **40** (3), 44 (2006).
- Yan W., Wang T., Li X.M., Jin Y.J. *Appl. Phys. B*, **108** (3), 515 (2012).
- Khurgin J.B., Tucker R.S. *Slow Light Science and Applications* (London: CRC Press, 2009).
- Kaatzian H. *Photonics* (Tehran: AKU, 2017, Vol. 2).
- Chang S.W., Chuang S.L., Ku P.C., Chang-Hasnian C.J., Palinginis P., Wang H. *Phys. Rev. B*, **70** (23), 235333 (2004).
- Sun D., Ku P.C. *J. Lightwave Technol.*, **26** (23), 3811 (2008).
- Kaatzian H., Kojori H.S., Zandi A., Kohandani R. *Opt. Photonics J.*, **3** (2), 298 (2013).
- Kohandani R., Zandi A., Kaatzian H. *Appl. Opt.*, **53** (6), 1228 (2014).
- Кохандани Р., Каатузиан Х. *Квантовая электроника*, **45** (1), 89 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (1), 89 (2015)].
- Chang S.W., Chuang S.L. *Phys. Rev. B*, **72** (23), 235330 (2005).
- Choupanzadeh B., Kaatzian H., Kohandani R., Abdolhosseini S. *Opt. Photonics J.*, **6** (8), 114 (2016).
- Knox R.S. *Theory of Excitons* (New York: Academic Press, 1963, Vol. 5).
- Tanguy C., Lefebvre P., Mathieu H., Elliott R.J. *J. Appl. Phys.*, **82** (2), 798 (1997).
- Marquezini M.V., Tignon J., Hasche T., Chemla D.S. *Appl. Phys. Lett.*, **73** (16), 2313 (1998).
- He X.F. *Phys. Rev. B*, **43** (3), 2063 (1991).
- Kaatzian H., Kohandani R. *Proc. 23rd Iranian Conf. on Electrical Engineering* (Tehran, 2015, p. 1385).
- Pereira M.F., Galbraith I., Koch S.W., Duggan G. *Phys. Rev. B*, **42** (11), 7084 (1990).
- Chaudhuri S. *Phys. Rev. B*, **28** (8), 4480 (1993).
- Matos-Abiague A., Oliveira L.E., de Dios-Leyva M. *Physica B: Condensed Matter*, **296** (4), 342 (2001).
- Susa N. *J. Appl. Phys.*, **73** (2), 932 (1993).
- Susa N., Nakahara T. *Solid-State Electron.*, **36** (9), 1277 (1993).
- Faist J. *Quantum Cascade Lasers* (Oxford: Oxford University Press, 2013).
- Andreani L.C., Pasquarello A. *Phys. Rev. B*, **42** (14), 8928 (1990).
- Zhang B., Kano S.S., Shiraki Y. *Phys. Rev. B*, **50** (11), 7499 (1994).