

УДК 535:621.373.826:539

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ, СВЯЗАННЫХ ТУННЕЛИРОВАНИЕМ

© Н. Н. Рубцова, А. А. Ковалёв, Д. В. Ледовских,  
В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин

*Институт физики полупроводников СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13  
E-mail: rubtsova@isp.nsc.ru*

Кинетика сигналов отражения наноструктур, состоящих из одинакового количества квантовых ям одинакового состава  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,32$ ) с барьерами из GaAs толщиной в 2, 4, 6 и 8 монослоёв, выращенных на полупроводниковом отражателе в одинаковых условиях, исследована методом накачки-зондирования. Обнаружена тенденция к укорочению времени релаксации для более тонких барьеров. Обсуждаются перспективы дальнейших исследований и практического применения квантовых ям, связанных туннелированием носителей заряда.

*Ключевые слова:* квантовые ямы, электронно-дырочная рекомбинация, туннелирование носителей заряда между квантовыми ямами.

DOI: 10.15372/AUT20220605

**Введение.** Для полупроводниковых затворов, использующих явление насыщенного поглощения слоем квантовых ям для получения устойчивого режима синхронизации мод лазеров [1], одной из ключевых характеристик является быстроедействие затвора, которое становится особенно значимым в случае его использования для синхронизации мод компактных лазеров с высокой частотой следования фемтосекундных импульсов.

Способы повышения быстрогодействия таких оптических затворов разнообразны: известен метод постростовой обработки полупроводниковых затворов путём облучения пучком тяжёлых ионов [2], метод введения посторонних атомов в структуру квантовых ям [3], выращивание полупроводниковой структуры с рассогласованием периодов кристаллических решёток разных слоёв [4]. Все эти подходы способствуют введению точечных дефектов в выращиваемую структуру, что обеспечивает ускорение электронно-дырочной рекомбинации. В [5] была исследована генерация точечных дефектов ультрафиолетовым лазерным излучением. Во всех вышеперечисленных работах удавалось существенно увеличить быстроедействие оптических затворов на основе полупроводниковых квантовых ям за счёт повышения концентрации точечных дефектов. Однако некоторая потеря кристаллического качества структуры неизбежно должна приводить к уменьшению легко насыщаемой экситонной компоненты спектра поглощения.

Альтернативный подход к ускорению релаксации в квантовых ямах может использовать туннелирование носителей заряда в специально сконструированную соседнюю квантовую яму. Так, в работе [6] методом разрешённой во времени люминесценции исследовали туннелирование электронов из узкой ямы в более широкую через тонкий барьер и обнаружили экспоненциальное уменьшение времени релаксации по мере уменьшения толщины барьера (экспериментально наблюдалось уменьшение времён релаксации до 2 пс). Аналогичный подход в [7] позволил изготовить насыщающийся поглотитель на область спектра 1,55 микрона, состоящий из квантовых ям GaInNAsSb, окружённых более тонкими квантовыми ямами из GaAsN с высокой концентрацией азота; было достигнуто время

релаксации затвора 12 пс. В [8] затвор был выполнен с применением наноструктурированных барьеров из GaAs, включавших узкие вставки из материала InGaAs, который был использован в квантовых ямах; получено время релаксации около 8 пс. Интерпретация механизма сокращения времени релаксации включала туннелирование носителей заряда в соседние квантовые ямы. Однако конструкция таких затворов содержала повышенное число гетерограниц и нельзя было исключать вклад шероховатости гетерограниц в ускорение электронно-дырочной рекомбинации.

В представленной работе усилен вклад туннелирования в ускорение процесса восстановления ненасыщенного поглощения слоя квантовых ям. Для этого исследовались слои одинакового количества квантовых ям одного и того же состава ( $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,32$ )) с барьерами из GaAs, выращенных на полупроводниковом отражателе в идентичных условиях. Таким образом, количество и качество гетерограниц были одинаковыми для образцов, отличавшихся только толщиной барьеров.

**Образцы и техника изготовления.** Образцы выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на epi-ready подложке GaAs(001) диаметром 50 мм при постоянном вращении подложки и с контролем кристалличности каждого слоя квантовых ям по картине дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Общий вид выращенной структуры со стороны квантовых ям показан на рис. 1 (вверху и слева видны кристаллографические срезы). Сначала на целой подложке были выращены 24 пары четвертьволновых слоёв GaAs и AlAs для формирования полупроводникового отражателя. После роста отражателя на всю поверхность был нанесён пассивирующий слой As и пластина была разрезана на 4 части (разрезы показаны штриховыми линиями). На каждой четвертинке подложки с зеркалом после удаления легколетучего слоя арсенида выращены по 10 квантовых ям  $\text{In}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}$  с определённым значением толщин барьеров (2, 4, 6 и 8 монослоёв (МС) GaAs (см. рис. 1)).

**Исследование кинетики отражения.** На рис. 1 кружками отмечены области, в которых были зарегистрированы кинетические кривые отражения. Для регистрации использовалась техника накачки–зондирования с двойной модуляцией излучения (пучки возбуждающего и пробного излучений модулированы на некратных частотах) и с регистрацией

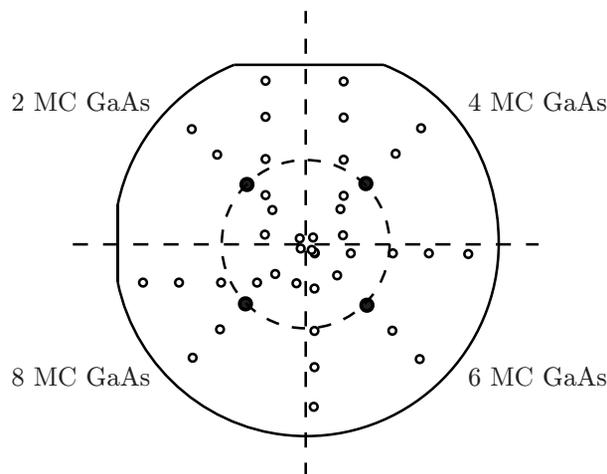


Рис. 1. Расположение на подложке образцов с квантовыми ямами  $\text{In}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}$ , отличающихся толщиной барьеров GaAs; кружками показаны точки, в которых проводились измерения кинетики отражения. Чёрными точками отмечен центр вращения каждого образца в процессе МЛЭ роста квантовых ям

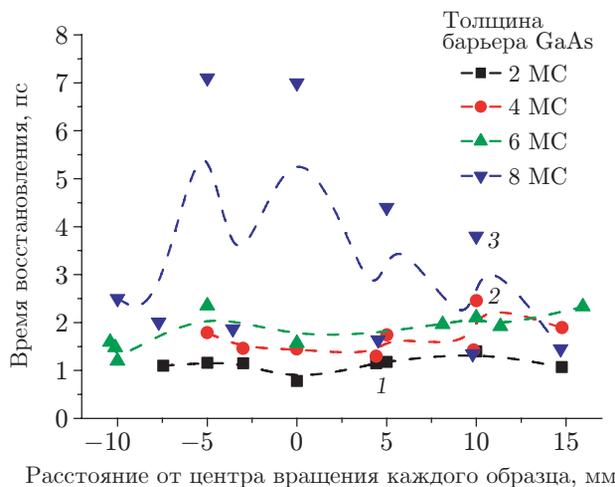


Рис. 2. Времена восстановления линейного отражения для областей внутри круга (отрицательные расстояния) и вне круга (положительные расстояния) показаны на рис. 1

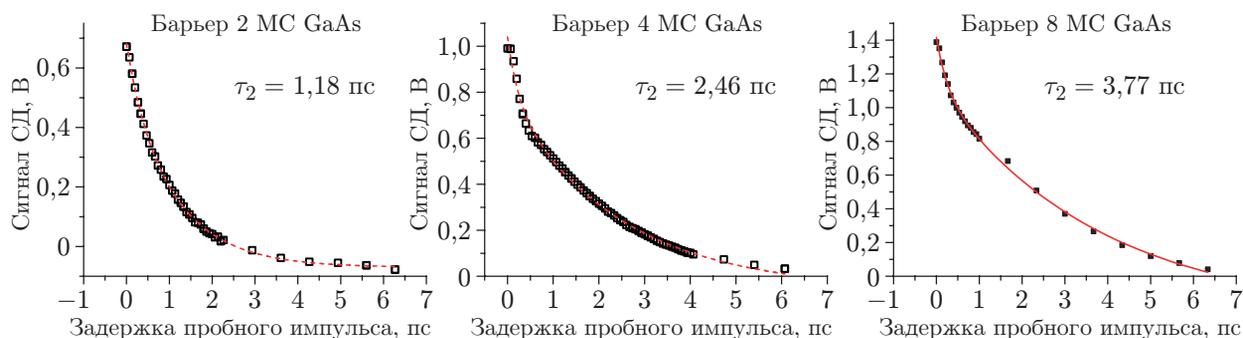


Рис. 3. Кинетика восстановления линейного отражения для некоторых образцов, отличающихся толщиной барьеров; время восстановления нарастает с толщиной барьера. СД — синхронный детектор

нелинейного отклика на суммарной частоте, что позволило исключить из регистрируемого сигнала рассеянное излучение мощного пучка возбуждающего излучения. Метод накачки-зондирования был реализован на базе лазера FL-1000 с центральной длиной волны излучения 1036 нм, длительностью импульсов 130 фс и с частотой их следования 70 МГц (фирма «СОЛАР», Беларусь). Предельная чувствительность по относительному изменению отражения составила  $5 \cdot 10^{-6}$  [9]. Пучок возбуждающего излучения фокусировался на поверхности образца в пятно радиусом 30 мкм.

Рис. 2 представляет зависимость времён восстановления линейного отражения слоёв из 10 квантовых ям  $\text{In}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}$  с определёнными значениями толщин барьеров (2 MC GaAs — квадраты, 4 MC GaAs — светлые круги, 6 MC GaAs — треугольники остриём вверх, 8 MC GaAs — треугольники остриём вниз) от положения области регистрации. Области внутри штрихового круга на рис. 1 соответствуют отрицательным расстояниям от центра вращения каждого образца до исследуемой области на рис. 2; области вне круга — положительным значениям расстояния от центра вращения образца до исследуемой области. Несмотря на большой разброс значений времён релаксации, видна тенденция к сокращению времени релаксации для более тонких барьеров. Цифры 1, 2, 3 у трёх экспериментальных точек относятся к кривым восстановления линейного отражения на рис. 3.

Все кинетические кривые, в том числе показанные на рис. 3, обрабатывались по упрощённой биэкспоненциальной зависимости с учётом положительного или отрицательного стационарного сигнала, возникающего из-за неидеальности полупроводникового отражателя.

**Обсуждение.** Как видно из экспериментальных результатов, представленных на рис. 2 и 3, более тонкие барьеры, разделяющие квантовые ямы, способны увеличить быстродействие оптических затворов. Это согласуется с предварительными выводами работы [10].

В данной работе ставилась цель подчеркнуть роль туннелирования носителей заряда между квантовыми ямами поглощающего слоя. Для этого все образцы были выращены на едином полупроводниковом зеркале и в процессе МЛЭ каждого из образцов контролировалась кристалличность слоёв квантовых ям и барьеров по картинам ДБЭО, а также выдерживались одинаковые условия роста по температуре и потокам веществ, формирующих наноструктуру. Несмотря на латеральную неоднородность, характерную для наноструктур, которые выращены в процессе МЛЭ, в экспериментах видна тенденция к увеличению быстродействия слоёв квантовых ям с уменьшением толщины барьеров. Проблема, связанная с латеральной неоднородностью полупроводникового отражателя, может быть, в принципе, преодолена переносом слоя квантовых ям на диэлектрический отражатель, как это было сделано в [11].

Изменение энергетического спектра квантовых ям по мере уменьшения толщины барьеров было продемонстрировано на примере модельных квантовых ям [12], разделённых барьерами той же толщины, что и сами ямы. С уменьшением толщины барьеров уровни квантовых ям переходят в минизоны, которые становятся всё более широкими по мере сужения барьеров. Работа [13] посвящена моделированию эволюции уровней размерного квантования глубокой одиночной квантовой ямы при существовании внутри ямы более низких барьеров. Показано, что с увеличением количества добавочных барьеров исходные уровни квантования расщепляются и формируют минизоны. Ширины минизон и энергетических зазоров между ними существенно изменяются в зависимости от высоты барьеров и их толщины. Для определения минизон в нашем случае (10 квантовых ям  $\text{In}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}$ , связанных туннелированием через тонкие барьеры GaAs) необходимо провести расчёты, учитывающие все параметры квантовых ям и барьеров.

Возвращаясь к экспериментальным результатам данной работы, необходимо отметить разброс относительных вкладов в сигнал отражения экситонной составляющей (короткое время релаксации в кинетических кривых, отвечающее процессу ионизации экситонов за счёт взаимодействия с фононами кристаллической решётки) и составляющей от нескоррелированных электронов и дырок (длинное время релаксации  $\tau_2$ , соответствующее электронно-дырочной рекомбинации). Для всех использованных значений барьеров (от 2 до 8 МС) для каждого из образцов на периферии, расположенной в центральной части исходной подложки GaAs, относительный вклад экситонной компоненты изменялся от единиц до десятков. Для такой напряжённой структуры, как  $\text{In}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}/\text{GaAs}$ , это демонстрирует высокое кристаллическое качество наноструктур. Более высокий относительный вклад экситонов (400–500) наблюдался для идеально согласованных слоёв ям и барьеров [10]. В пользу хорошего кристаллического качества исследованных в данной работе наноструктур свидетельствует также их механическая прочность.

Обсудим перспективу применения квантовых ям, связанных туннелированием, в качестве основы оптических затворов для пассивной синхронизации продольных мод компактных лазеров. В работе [11] показана возможность переноса слоёв квантовых ям с несколько меньшей концентрацией индия на диэлектрический отражатель. Насколько удачным окажется перенос слоёв квантовых ям типа  $\text{In}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}/\text{GaAs}$ , покажут дальнейшие исследования, которые представляют интерес как с экономической точки зрения, так и в

целях применения более широкополосного отражателя с высокой латеральной однородностью [14].

**Заключение.** В данной работе проведено систематическое исследование кинетики восстановления линейного отражения слоёв из десяти квантовых ям  $\text{In}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{As}/\text{GaAs}$ , отличающихся лишь толщинами барьеров из GaAs. Обнаружено укорочение времени восстановления с уменьшением толщины барьеров, очевидно, обусловленное туннелированием носителей заряда между квантовыми ямами и возможностью сброса энергии по мизонам. Дальнейшая работа с подобными наноструктурами перспективна для создания оптических затворов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keller U., Weingarten K. J., Kärtner F. X. et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers // IEEE Journ. Selected Topics in Quant. Electron. (JSTQE). 1996. **2**, Iss. 3. P. 435–453.
2. Mangeney J., Oudar J. L., Harmand J. C. et al. Ultrafast saturable absorption at 1.55  $\mu\text{m}$  in heavy-ion-irradiated quantum-well vertical cavity // Appl. Phys. Lett. 2000. **76**, Iss. 4. P. 1371–1373.
3. Okuno T., Masumoto Y. Femtosecond response time in berillium-doped low-temperature grown GaAs/AlGaAs multiple quantum wells // Appl. Phys. Lett. 2001. **79**, Iss. 11. P. 764–766.
4. Soumalainen S., Vainionpaa A., Tengvall O. et al. 1 $\mu\text{m}$  saturable absorber with recovery time reduced by lattice mismatch // Appl. Phys. Lett. 2005. **87**, Iss. 9. P. 121106.
5. Rubtsova N. N., Kuleshov N. V., Kisel' V. E. et al. Semiconductor nanostructures modified by UV laser radiation // Laser Phys. 2010. **20**, N 5. P. 1262–1265.
6. Deveaud B., Clerot F., Chomette A. et al. Tunneling and relaxation in coupled quantum wells // Europhys. Lett. 1990. **11**, N 4. P. 367–372.
7. Le Du M., Harmand J.-C., Mauguin O. et al. Quantum-well saturable absorber at 1.55  $\mu\text{m}$  on GaAs substrate with a fast recombination rate // Appl. Phys. Lett. 2006. **88**, Iss. 4. P. 201110.
8. Kovalyov A. A., Kuleshov N. V., Kisel' V. E. et al. Reflectivity kinetics of saturable absorbers for laser mirrors // Laser Phys. 2016. **26**, N 2. P. 025001.
9. Борисов Г. М., Гольдорт В. Г., Ковалёв А. А. и др. Техника регистрации субпикосекундной кинетики отражения или пропускания // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 1. С. 87–91.
10. Рубцова Н. Н., Ковалёв А. А., Ледовских Д. В. и др. Оптические затворы на основе полупроводниковых квантовых ям  $\text{A}_3\text{B}_5$  // Автометрия. 2021. **57**, № 5. С. 29–37. DOI: 10.15372/AUT20210504.
11. Rubtsova N. N., Kovalyov A. A., Ledovskikh D. V. et al. Optical shutters for a compact femtosecond Yb:KYW laser // Laser Phys. 2020. **30**, N 2. P. 025001.
12. Yu P. Y., Cardona M. Fundamentals of Semiconductors. Physics and Materials Properties. Berlin: Springer, 2002. 500 p.
13. Chen J., Zeng W. Coupling effect of quantum wells on band structure // Journ. Semiconductors. 2015. **36**, N 10. P. 102005.
14. Рубцова Н. Н., Борисов Г. М., Гольдорт В. Г. и др. Широкополосные с малым временем релаксации полупроводниковые зеркала для пассивной синхронизации мод лазеров ближнего ИК-диапазона // Автометрия. 2019. **55**, № 5. С. 20–23. DOI: 10.15372/AUT20190503.

Поступила в редакцию 25.09.2022

После доработки 04.10.2022

Принята к публикации 21.10.2022