

Спектры фотолюминесценции квантовых ям InAs/GaInSb/InAs в среднем ИК диапазоне

© В.В. Уточкин^{1,2}, М.А. Фадеев¹, С.С. Криштопенко³, В.В. Румянцев^{1,2}, В.Я. Алешкин^{1,2}, А.А. Дубинов^{1,2}, С.В. Морозов^{1,2}, Б.Р. Семягин⁴, М.А. Путьято⁴, Е.А. Емельянов⁴, В.В. Преображенский⁴, В.И. Гавриленко^{1,2,¶}

¹Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603087 Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

³Laboratoire Charles Coulomb, CNRS & Universite Montpellier, 34095 Montpellier, France

⁴Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

¶ E-mail: gavr@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 15 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 21 апреля 2020 г.

Принята к публикации 21 апреля 2020 г.

Исследованы спектры фотолюминесценции волноводных гетероструктур с квантовыми ямами AlSb/InAs/GaInSb/InAs/AlSb, предназначенных для генерации излучения на межзонных переходах в среднем инфракрасном диапазоне. Обнаруженные спектральные линии сопоставляются с расчетами зонной структуры.

Ключевые слова: квантовая яма, InAs/GaInSb, фотолюминесценция, волноводная гетероструктура.

DOI: 10.21883/FTP.2020.09.49834.26

1. Введение

Край валентной зоны GaSb лежит выше по энергии, чем край зоны проводимости InAs, что позволяет в квантово-размерных структурах InAs/GaSb управлять (при изменении толщин слоев) шириной запрещенной зоны. В симметричных квантовых ямах (КЯ) InAs/Ga(In)Sb/InAs с W-образным профилем потенциала экстремумы зон находятся в Γ -точке зоны Бриллюэна [1]. Такие структуры используются за рубежом для создания лазеров среднего ИК диапазона (см., например, [2]). В настоящей работе предпринята первая попытка получения стимулированного излучения в структурах, сконструированных и выращенных в России.

2. Исследуемая структура

Исследуемый образец был выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs(001) в ИФП СО РАН [3]. Активная часть структуры выращивалась на композитном буфере, состоящем из метаморфного буферного слоя GaSb толщиной 2.4 мкм (ср. с [4]), 10-периодной „сглаживающей“ сверхрешетки AlSb(2.5 нм)/GaSb(2.5 нм) и слоя GaSb толщиной 0.6 мкм. Далее выращивались 10 КЯ AlSb(10 нм)–InAs(3.63 нм)–Ga_{0.65}In_{0.35}Sb(3.05 нм)–InAs(3.63 нм)–AlSb(10 нм). Толщины слоев InAs и Ga_{0.65}In_{0.35}Sb выбирались равными

целому числу монослоев (МС) — 12 и 10 МС соответственно. Поверх выращивался покрывающий слой GaSb толщиной 6 нм. Зонная структура, волновые функции (ВФ) электронов и дырок и матричные элементы операторов скорости для межзонных переходов рассчитывались в рамках 4-зонной модели Кейна [5]. При расчете для лучшего согласия с измеренными спектрами фотолюминесценции толщина слоев InAs была

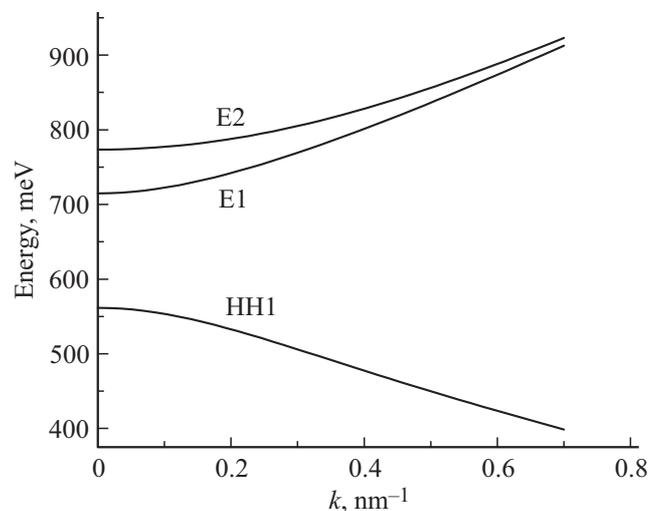


Рис. 1. Зонная структура КЯ в исследуемом образце, рассчитанная в рамках модели Кейна 8×8 [5].

уменьшена до 11 МС. Рассчитанная зонная структура КЯ представлена на рис. 1, а на рис. 2 представлено распределение модулей компонент ВФ в подзонах в КЯ

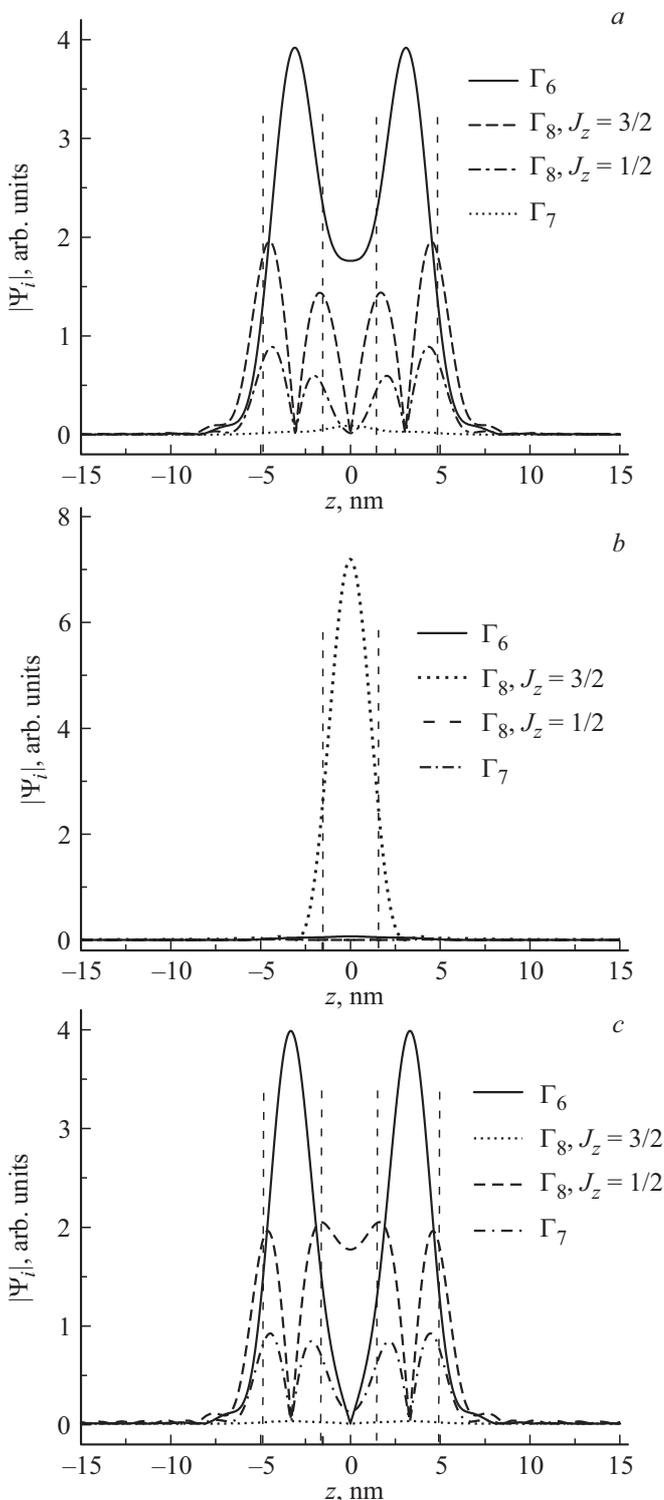


Рис. 2. Распределение модулей компонент ВФ в подзонах в КЯ в исследуемой структуре, соответствующих электронам (Γ_6), легким дыркам ($\Gamma_8, J_z = 1/2$), тяжелым дыркам ($\Gamma_8, J_z = 3/2$), спин-отщепленным дыркам (Γ_7): *a* — E_1 , *b* — HH_1 , *c* — E_2 . Вертикальными линиями показаны границы слоев структуры.

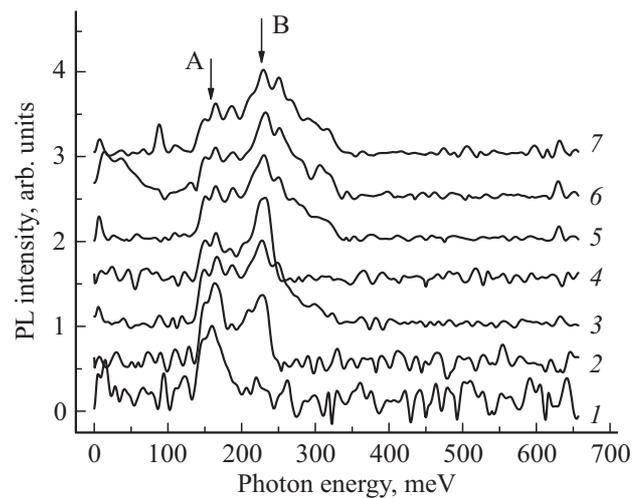


Рис. 3. Нормированные спектры ФЛ, измеренные при $T = 10$ К при различной средней мощности возбуждения, мВт: 1 — 3.5, 2 — 14, 3 — 35, 4 — 44, 5 — 51, 6 — 65, 7 — 80.

в исследуемой структуре, соответствующих электронам (сплошные линии), легким дыркам (штриховые линии), тяжелым дыркам (пунктир), спин-отщепленным дыркам (штрихпунктир). Видно, что ВФ дырок (подзона HH_1 , рис. 2, *b*) практически полностью представлена состояниями $\Gamma_8, J_z = 3/2$ (состояния тяжелых дырок) и локализована в центре КЯ, т.е. фактически в слое GaInSb и слабо проникает в слой InAs. 4-компонентные ВФ в подзонах E_1 и E_2 зоны проводимости представлены состояниями Γ_6 (электроны), $\Gamma_8, J_z = 1/2$ (состояния легких дырок) и Γ_7 (состояния спин-отщепленной дырочной подзоны). Они локализованы соответственно в слоях InAs, но заметно проникают в слой GaInSb (вследствие малой эффективной массы электронов), что достигнуто за счет 35%-й доли In в составе твердого раствора.

3. Обсуждение результатов

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измерялись с помощью фурье-спектрометра Bruker 80v в режиме пошагового сканирования при возбуждении излучением оптического параметрического осциллятора СОЛАР ($\lambda = 2$ мкм, $\tau_{\text{pulse}} = 10$ нс, $f_{\text{rep}} = 10$ Гц). Образец размером 5×5 мм располагался на холодном пальце в криостате замкнутого цикла. На рис. 3 представлены спектры ФЛ, измеренные при $T = 10$ К. При минимальном уровне возбуждения в спектре наблюдается линия А, положение которой хорошо соответствует расстоянию между подзонами E_1 и HH_1 , с ростом интенсивности накачки возникает вторая линия В, положение которой соответствует расстоянию между второй электронной подзоной E_2 и HH_1 . Обе линии ФЛ наблюдались в спектрах вплоть до $T = 110$ К без заметного смещения по частоте при уменьшении интенсивности в несколько

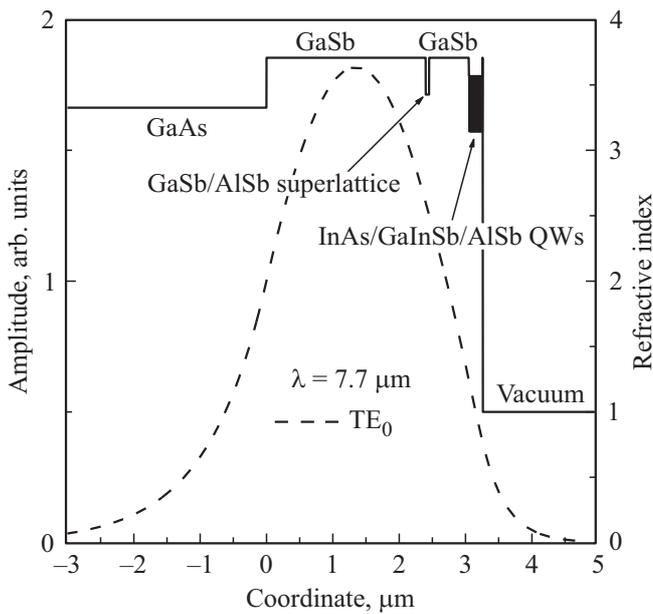


Рис. 4. Распределение показателя преломления и электрического поля TE_0 моды с длиной волны 7.7 мкм в исследуемой структуре.

раз, очевидно вследствие повышения вероятности безызлучательной рекомбинации.

Появление линии В спектрах люминесценции оказалось неожиданным. В „обычных“ КЯ оптические переходы из второй электронной подзоны E2 в первую дырочную HH1 запрещены вследствие различной четности ВФ. Как видно из рис. 2, действительно, основная „электронная“ (Γ_6) компонента ВФ в подзоне E2 является нечетной, обращаясь в нуль в центре слоя GaInSb, где максимальна ВФ тяжелых дырок в подзоне HH1. В то же время в подзоне E2 четной является компонента ВФ, соответствующая легким дыркам (Γ_8 , $J_z = 1/2$). Однако известно, что переходы между подзонами легких и тяжелых дырок возможны лишь при конечном значении квазиимпульса (запрещены при $k = 0$). Применительно к исследуемой структуре этот качественный вывод подтверждается расчетами квадратов матричных элементов оператора скорости для межзонных переходов. Так, для переходов $k = 0$ эта величина составляет $\sim 5 \cdot 10^{30} \text{ \AA}^2/c^2$, в то время как для перехода E2–HH1 при $k = 0$ — $\sim 4 \cdot 10^{25} \text{ \AA}^2/c^2$, т.е. на 5 порядков величины меньше. Оценка величины квадрата матричного элемента оператора скорости для перехода E2–HH1 при конечном $k = 0.26 \text{ нм}^{-1}$ дает величину $\sim 6 \cdot 10^{27} \text{ \AA}^2/c^2$, т.е. все равно на 3 порядка величины меньше, чем для перехода E1–HH1. При этом, чтобы состояния с таким волновым вектором в подзоне E2 были заселены, подзона E1 должна быть „залита“, как видно из рис. 1, до энергий $\sim 70 \text{ мэВ}$, что привело бы к широкой полосе ФЛ на переходах E1–HH1, сливающейся с линией В, в то время, как

видно из рис. 3 (кривая 2), при уровне возбуждения, когда линии А и В близки по интенсивности, они достаточно хорошо разрешены. По мнению авторов, это свидетельствует о том, что линиям А и В соответствуют оптические переходы с состояний дефектов, „привязанных“ к каждой из подзон E1 и E2. Возбуждаемые межзонной подсветкой носители заряда захватываются на эти локализованные состояния, где их время жизни существенно превышает время рекомбинации зона-зона.

Как видно из рис. 3, повышение уровня накачки (до 1.6 МВт/см^2) не приводило к возникновению стимулированного излучения, несмотря на то что общая толщина структуры обеспечивала поддержание в ней волноводной моды TE_0 (рис. 4). Как видно из рисунка, максимум волноводной моды находится в стороне от активной части структуры — области КЯ InAs/GaInSb/InAs. Для лучшей связи активной среды с волноводной модой в дальнейшем при „конструировании“ структур следует увеличить толщину слоя GaSb и „передвинуть“ КЯ в глубину волноводного слоя.

4. Заключение

В работе исследованы низкотемпературные спектры фотolumинесценции в среднем инфракрасном диапазоне гетероструктуры с „трехслойными“ квантовыми ямами InAs/GaInSb/InAs, ограниченными широкозонным полупроводником AlSb, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs(001). Выполнены расчеты энергетических спектров, волновых функций электронов и дырок и матричных элементов межзонных оптических переходов. В спектрах фотolumинесценции обнаружены две линии, положение которых соответствует расстояниям между первой (E1) и второй (E2) электронными подзонами и первой подзоной тяжелых дырок (HH1), при этом интенсивность высокочастотной линии растет с увеличением уровня оптического возбуждения. Появление высокочастотной линии связывается с захватом фотовозбужденных носителей на долгоживущие состояния дефектов, связанных с подзоной E2, поскольку, как показывают проведенные расчеты, матричные элементы межзонных оптических переходов E2–HH1 на несколько порядков меньше, чем для переходов E1–HH1. Электродинамические расчеты показывают наличие в структуре диэлектрического волновода, однако стимулированное излучение не наблюдалось вплоть до максимальных уровней накачки, поскольку квантовые ямы в исследуемой структуре оказались расположенными далеко от пучности волноводной моды TE_0 .

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики микроструктур РАН (№ 0035-2019-0020) и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-42-520040_поволжье).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.S. Krishtopenko, F. Terpe. *Sci. Adv.*, **4**, eaar7529 (2018).
- [2] A.P. Ongstad, R. Kaspi, G.C. Dente, M.L. Tilton, R. Barresi, J.R. Chavez. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 141106 (2008).
- [3] Е.А. Емельянов, Д.Ф. Феклин, А.В. Васев, М.А. Пулято, Б.Р. Семягин, А.П. Василенко, О.П. Пчеляков, В.В. Преображенский. *Автометрия*, **47**, 43 (2011).
- [4] Yu.G. Sadofyev, A. Ramamoorthy, B. Naser, J.P. Bird, S.R. Johnson, Y.-H. Zhang. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 1833 (2002).
- [5] С.С. Криштопенко, А.В. Иконников, К.В. Маремьянин, Л.С. Бовкун, К.Е. Спирип, А.М. Кадыков, М. Marcinkiewicz, S. Ruffenach, C. Consejo, F. Terpe, W. Knap, Б.Р. Семягин, М.А. Пулято, Е.А. Емельянов, В.В. Преображенский, В.И. Гавриленко. *ФТП*, **51**, 40 (2017).

Редактор Г.А. Оганесян

Photoluminescence spectra of InAs/GaInSb/InAs quantum wells in mid infrared range

V.V. Utochkin^{1,2}, M.A. Fadeev¹, S.S. Krishtopenko³,
V.V. Romyantsev^{1,2}, V.Ya. Aleshkin^{1,2}, A.A. Dubinov^{1,2},
S.V. Morozov^{1,2}, B.R. Semyagin⁴, M.A. Putyato⁴,
E.A. Emelyanov⁴, V.V. Preobrazhenskii⁴,
V.I. Gavrilenko^{1,2}

¹ Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603087 Nizhny Novgorod, Russia

² Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

³ Laboratoire Charles Coulomb,
CNRS & Universite Montpellier,
34095 Montpellier, France

⁴ Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Photoluminescence spectra of waveguide AlSb/InAs/GaInSb/InAs/AlSb quantum well heterostructures, intended for the radiation generation at interband transitions in mid infrared range, have been investigated. The observed spectral lines are compared with band structure calculations.