

Структурные и оптические свойства гетероструктур на основе GaAs с квантовыми ямами Ge и Ge/InGaAs

© В.Я. Алешкин*, А.А. Дубинов*[¶], М.Н. Дроздов*, Б.Н. Звонков⁺, К.Е. Кудрявцев*, А.А. Тонких*^о, А.Н. Яблонский*, Р. Werner^о

* Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁺ Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

^о Max Planck Institute of Microstructure Physics, D-06120 Halle (Saale), Germany

(Получена 9 июля 2012 г. Принята к печати 20 июля 2012 г.)

С использованием метода лазерного распыления были выращены гетероструктуры на основе GaAs с квантовыми ямами Ge и Ge/InGaAs. Проведены структурные и оптические исследования полученных гетероструктур. Обнаружена широкая линия фотолуминесценции в диапазоне длин волн 1300–1650 нм, соответствующая непрямым переходам в импульсном пространстве Ge квантовой ямы и непрямым в координатном, но прямым в импульсном пространстве переходам между слоями $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ и Ge.

1. Введение

В настоящее время для волоконных линий связи требуются полупроводниковые лазеры, генерирующие излучение на длине волны 1.5 мкм, что обусловлено минимумом поглощения в кварцевом волокне на этой длине волны. Однако такой возможностью обладают только лазеры с квантовыми ямами на основе четверных соединений InGaAsP, выращенными на подложке InP [1]. Использование более дешевых подложек GaAs для лазеров на требуемой длине волны невозможно при использовании традиционных напряженных квантовых ям InGaAs, из-за большого несоответствия постоянных решетки GaAs и InGaAs с высоким содержанием In, необходимым для сдвига длины волны излучения в такую длинноволновую область. Требуемого диапазона излучения можно добиться использованием в качестве активной среды лазера нескольких слоев самоформирующихся квантовых точек InAs [2], выращенных на подложке GaAs. Основной проблемой при внедрении квантово-точечных технологий является достижение воспроизводимости их параметров, требующее трудоемкого технологического контроля, что при массовом производстве на сегодняшний день себя не оправдывает.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию структур Ge/GaAs и Ge/InGaAs/GaAs с целью оценки возможности создания на их основе светоизлучающих устройств, работающих в области длины волны 1.5 мкм.

В качестве аргументов привлекательности таких структур следует отметить, что Ge решеточно согласован с GaAs, а также имеет близкий к GaAs коэффициент температурного расширения, поэтому возможно получение достаточно совершенных гетеропереходов Ge/GaAs [3]. И хотя Ge — непрямозонный в простран-

стве импульсов полупроводник (нижней долиной в зоне проводимости является L-долина), разница между энергиями L-долины и Г-долины составляет всего 136 мэВ, а энергия прямого оптического перехода при комнатной температуре соответствует длине волны 1.55 мкм. Разница в энергиях между долинами может быть скомпенсирована растяжением слоя Ge (однако при этом увеличивается длина волны перехода) и/или его сильным легированием донорами до концентрации 10^{20} см^{-3} для того, чтобы уровень Ферми оказался в верхней Г-долине и концентрация электронов в ней была существенной. Так как время излучательной рекомбинации при прямом оптическом переходе на несколько порядков ниже, чем аналогичное время для непрямого оптического перехода, прямые оптические переходы могут давать более значительный вклад в излучение по сравнению с непрямыми, несмотря на существенно большее число электронов в L-долине по сравнению с Г-долиной. Использование этих эффектов привело недавно к созданию лазера с токовой накачкой, в котором в качестве активной среды выступал слой растянутого и сильно легированного объемного германия, выращенного на кремниевой подложке [4]. Однако пороговая плотность тока в этом лазере при комнатной температуре превышала 280 кА/см^2 .

Кроме того, как показывают расчеты [5], в достаточно тонкой квантовой яме Ge, заключенной между слоями GaAs, дно Г-долины может располагаться ниже дна L-долин, т.е. квантовая яма Ge становится прямозонной. Это связано с тем, что для узких квантовых ям положение по энергии нижней подзоны размерного квантования стремится к положению дна зоны проводимости в окружающих квантовую яму барьерах (в данном случае GaAs) в соответствующей точке пространства импульсов. Так как в GaAs нижней долиной в зоне проводимости является Г-долина, а вышележащая L-долина отнесена примерно на 0.3 эВ, то в узкой квантовой

[¶] E-mail: sanya@ipm.sci-nnov.ru

Состав, толщина, температура роста и метод нанесения слоев в структурах

№ структуры	Буфер GaAs	In _{0,28} Ga _{0,72} As	GaAs	Ge	GaAs	GaAs
6561	—	—	—	60 нм, ЛР, 550°C	—	—
6211	300 нм, МОС, 650°C	—	7 нм, ЛР, 550°C	2 нм ЛР, 550°C	7 нм, ЛР, 550°C	1000 нм, МОС, 550°C
6418	600 нм, МОС, 650°C	—	—	6 нм ЛР, 645°C	—	330 нм, МОС, 550°C
6468	600 нм, МОС, 650°C	10 нм, МОС, 650°C	3 нм, МОС, 650°C	6 нм, ЛР, 650°C	40 нм, ЛР, 650°C	—

Примечание. МОС — МОС-гидридная эпитаксия, ЛР — лазерное распыление.

яме Ge нижний уровень L -долины находится выше нижнего уровня Γ -долины.

Существуют определенные трудности в создании светоизлучающих структур на основе Ge/GaAs. Они состоят, прежде всего, в том, что диффузия атомов Ge, Ga и As через гетерограницу приводит к легированию (т.е. к образованию точечных дефектов) в непосредственной близости от гетерограницы. Эти точечные дефекты могут служить центрами безызлучательной рекомбинации, которые существенно ухудшают светоизлучающие свойства гетероструктуры. Кроме того, в GaAs, выращенном поверх Ge-квантовой ямы, возможно возникновение плоскостей двойникования [6], на которых также могут образовываться центры безызлучательной рекомбинации. Однако следует отметить, что трудности, связанные с образованием плоскостей двойникования (антифазных дефектов), могут быть преодолены [7].

2. Структуры Ge/GaAs и Ge/InGaAs/GaAs

Серия структур с слоями Ge и Ge/InGaAs была выращена при различных температурах на полупроводящей подложке [001], отклоненной к направлению [111] на 3° (см. таблицу). Для роста структур использовался метод МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. Слой германия (в некоторых случаях также покровный слой GaAs) выращивался с помощью лазерного распыления в реакторе МOCVD. Детали технологии роста приведены в работе [8].

Для исследования диффузии Ge, Ga и As через гетерограницу Ge/GaAs были выращены три гетероструктуры, в которых на подложку GaAs осаждались слои германия толщиной более 60 нм при трех температурах роста: 500, 550 и 650°C. На этих структурах с помощью метода вторичной ионной масс-спектрометрии на установке TOF.SIMS-5 были измерены профили распределения ато-

мов Ge, Ga и As по толщине структуры. Оказалось, что зависимость концентрации этих атомов от глубины вблизи гетероперехода практически не зависит от температуры роста. Профиль распределения атомов для структуры 6561, выращенной при 550°C, показан на рис. 1. Из рисунка видно, что спад концентрации Ga и As в глубь Ge (а также Ge в глубь GaAs) описывается показательной функцией. Концентрации Ga и As спадают в десять раз примерно на 5 нм (ширина перехода на уровне 0.2–0.8 от максимума составляет 3.5 нм), а Ge — примерно на 8 нм (ширина перехода на уровне 0.2–0.8 от максимума составляет 5 нм).

Для изучения кристаллического совершенства гетероперехода были проведены исследования двух гетероструктур с Ge квантовыми ямами с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа JEM 4010. В структуре 6211 слой Ge был выращен при температуре 550°C, в структуре 6418 слой Ge был выращен при температуре 645°C. На

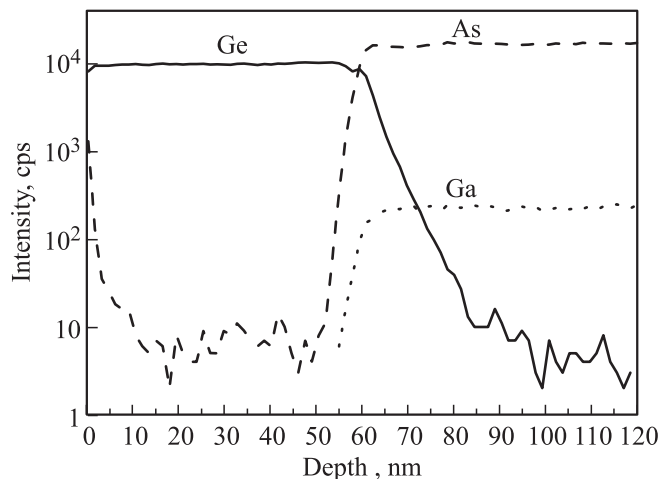


Рис. 1. Профиль распределения атомов для структуры 6561, полученный методом ВИМС.

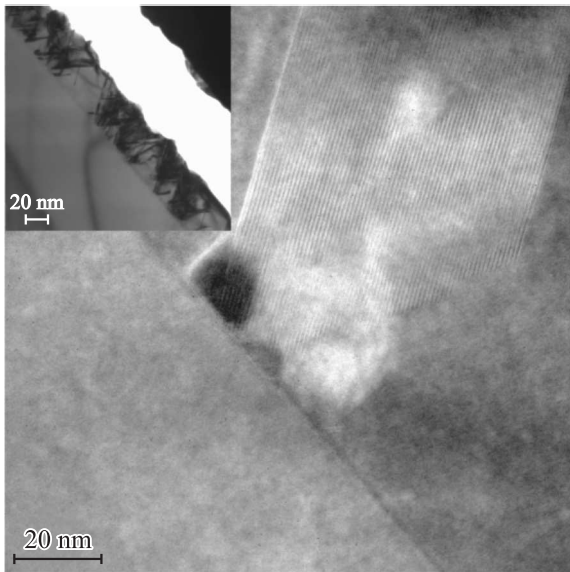


Рис. 2. Фотография ПЭМ высокого разрешения структуры 6211. На вставке в левом верхнем углу показана фотография ПЭМ этой структуры меньшего разрешения.

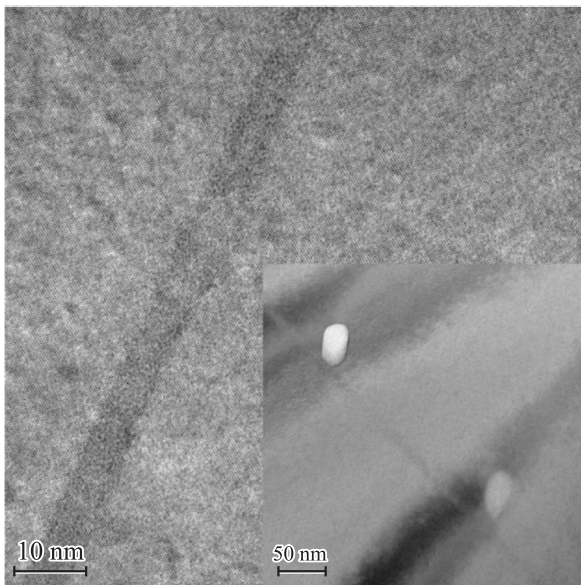


Рис. 3. Фотография ПЭМ высокого разрешения структуры 6418. На вставке в правом нижнем углу показана фотография ПЭМ этой структуры меньшего разрешения.

рис. 2. показана фотография ПЭМ высокого разрешения структуры 6211. На рис. 2 хорошо видна квантовая яма Ge толщиной около 2 нм, область антифазных дефектов (почти вертикальные полосы) над ней, а также дефект в виде светлого пятна. Возможно, эти дефекты образованы островками Ge или пустотами. На вставке к рис. 2 показана фотография ПЭМ той же структуры, полученная с меньшим пространственным разрешением. Из рисунка видно образование дислокаций над кванто-

вой ямой, которые выходят на поверхность. Причиной возникновения дислокаций являются дефекты упаковки.

На рис. 3 показана фотография ПЭМ высокого разрешения структуры 6418. На рисунке хорошо видна Ge квантовая яма. На этой структуре антифазных дефектов и дислокаций не обнаружено, однако обнаружены дефекты в виде светлых пятен, которые показаны на вставке к рис. 3. Возможно это микрочастицы германия, которые образуются в результате лазерного распыления.

Таким образом, электронно-микроскопические исследования показали, что в структуре, выращенной при 645°C, антифазные дефекты и связанные с ними дислокации отсутствуют, что означает пригодность данного режима для роста качественных структур.

3. Фотолюминесценция

Измерения фотолюминесценции (ФЛ) проводились на структурах, содержащих одну германиевую квантовую яму, и на структурах с комбинированной квантовой ямой, в которых слой Ge был выращен на слое InGaAs (см. таблицу). Для возбуждения ФЛ в качестве накачки использовалось излучение непрерывного лазера Nd:YAG с удвоением частоты (длина волны 532 нм) и излучение параметрического генератора света MPO-SL („Spectra-Physics“) с оптической накачкой третьей гармоникой (355 нм) импульсного лазера Nd:YAG (Quanta-Ray PRO-230-10, „Spectra-Physics“; длительность импульса ~ 10 нс, энергия в импульсе ~ 50 мДж, длина волны 1.064 мкм, ширина линии излучения 0.002 см^{-1} , частота повторения импульсов составляла 10 Гц). В качестве приемников излучения из структур использовались диодная линейка (диапазон работы 0.62–2.2 мкм) и более чувствительный приемник — фотоэлектронный умножитель (ФЭУ, диапазон работы 0.93–1.7 мкм). Измерения проводились при температуре жидкого азота.

На рис. 4 изображены спектры ФЛ структуры 6418, полученные при возбуждении непрерывным лазером при различной мощности накачки. Расчет, выполненный для данной структуры (в модели, описанной в работе [5]), дает следующие величины длин волн излучательных переходов: переход с нижнего состояния Γ -долины в верхнее состояние тяжелых дырок — 1267 нм, переход с нижнего состояния L -долины в верхнее состояние тяжелых дырок — 1496 нм, переход с нижнего состояния L -долины в верхнее состояние тяжелых дырок с испусканием междолинного TO-фонона — 1550 нм. На рис. 4 видны 2 характерных пика на длинах волн 1070 и 1270 нм и узкий провал в спектре на длине волны 1317 нм, который соответствует артефакту аппаратной функции измерительной системы. Наблюдаемая ширина двух коротковолновых линий велика, что, по-видимому, означает наличие большого числа дефектов и наличие неоднородности в структуре. Из

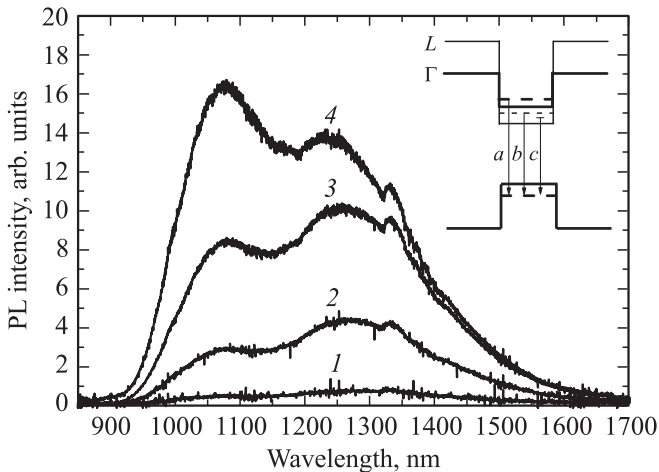


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции структуры 6418 при четырех уровнях мощности непрерывного оптического возбуждения, мВт: 1 — 0.01, 2 — 0.26, 3 — 1.3, 4 — 7.5. На вставке изображена вычисленная схема оптических переходов с длинами волн: 1267 (a), 1496 (b), 1550 (c) нм.

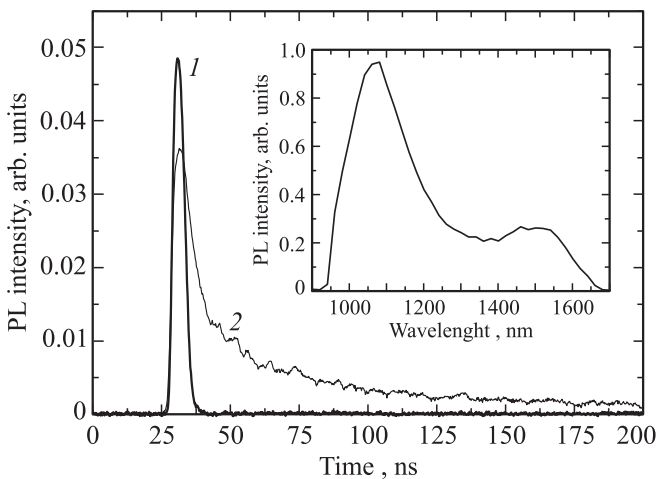


Рис. 5. Временная зависимость фотолюминесценции структуры 6418 для двух длин волн: 1 — 1476 и 2 — 1070 нм. На вставке изображен спектр фотолюминесценции структуры 6418 в условиях интенсивного импульсного оптического возбуждения.

рис. 4 видно, что с ростом мощности накачки наблюдается более быстрый рост интенсивности линии на длине волны 1070 нм по сравнению с интенсивностью на длине волны 1270 нм. При мощной импульсной накачке структуры 6418 хорошо видны только два пика (рис. 5) на длинах волн 1070 и 1476 нм. Из рис. 5 хорошо видно, что время спада длинноволновой линии ФЛ составляет менее 10 нс (временное разрешение системы). Отметим, что данная длина волны соответствует переходу с нижнего состояния L -долины в верхнее состояние тяжелых дырок. Малое время жизни означает большую роль безызлучательной рекомбинации, которая появляется, по-видимому, из-за присутствия большого

количества дефектов в слое германия. Коротковолновую линию ФЛ можно связать с рекомбинацией на дефектах, находящихся в покровном слое GaAs. Такие дефекты появляются благодаря диффузии германия в GaAs во время роста и находятся на достаточно большом расстоянии от квантовой ямы. Время спада коротковолнового пика ФЛ (~ 30 нс) заметно превышает время спада длинноволнового пика. Следует отметить, что один из пиков, наблюдаемых в спектре ФЛ при непрерывной накачке (1270 нм), хорошо согласуется с рассчитанной длиной волны прямого перехода в германиевой квантовой яме. В то же время данный пик не наблюдается при интенсивной импульсной накачке, что не может происходить для прямых переходов. Вероятно, этот пик обусловлен рекомбинацией с дефектных состояний, концентрация которых невелика. И поэтому при мощной накачке этого пика не видно на фоне наблюдаемых линий. Качественно картина ФЛ всех исследованных структур с Ge-квантовыми ямами подобна той, которая наблюдалась в структуре 6418.

На рис. 6 изображены спектры ФЛ при непрерывной и мощной импульсной накачке для структуры 6468, которая содержала комбинированную квантовую яму Ge/GaAs/InGaAs и была выращена при температуре 650°C . В этой структуре между слоями Ge и InGaAs выращен 3 нм слой GaAs. На спектре ФЛ при непрерывной накачке видны 4 особенности на длинах волн: 990, 1070, 1220, 1317 нм. Длины волн и ширины линий трех длинноволновых наблюдаемых особенностей хорошо совпадают с особенностями спектра ФЛ из структуры 6418 и, по-видимому, соответствуют ФЛ дефектов и артефакту аппаратной функции измерительной системы. Наиболее коротковолновая линия обладает заметно меньшей шириной, и ее положение хорошо соответствует основному переходу в квантовой яме $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ толщиной 10 нм. При мощной импульсной накачке вырастает коротковолновое крыло

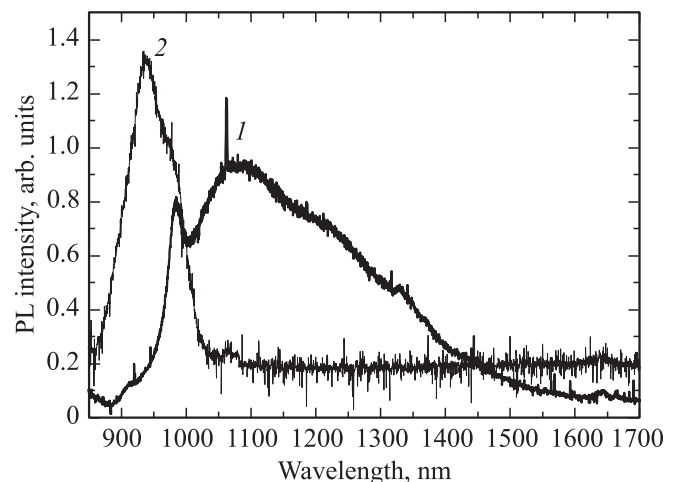


Рис. 6. Спектры фотолюминесценции структуры 6468 при непрерывной (1) и более мощной импульсной (2) накачке.

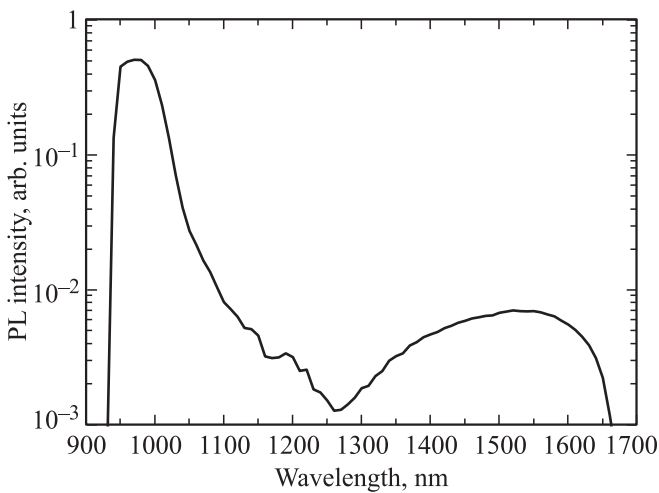


Рис. 7. Спектр фотолюминесценции структуры 6468 при мощной импульсной накачке, снятый более чувствительным детектором (ФЭУ).

этой линии, что, по-видимому, обусловлено заполнением высокоэнергетических состояний в квантовой яме $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$. При использовании более чувствительного детектора (ФЭУ) при мощной импульсной накачке дополнительно наблюдается широкая линия люминесценции в диапазоне длин волн 1300–1650 нм (рис. 7), которую, по-видимому, можно связать с непрямым переходом в импульсном пространстве Ge квантовой ямы (расчетное значение перехода 1498 нм) и непрямым в координатном, но прямым в импульсном пространстве переходом между слоями $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ и Ge (расчетное значение перехода 1386 нм). При не прямых пространственных переходах в начальном состоянии электрон находится в зоне проводимости квантовой ямы InGaAs , а дырка в валентной зоне Ge-квантовой ямы. Отметим, что времена спада ФЛ в обеих линиях меньше 10 нс. Структуры с комбинированными квантовыми ямами Ge/ InGaAs , в которых отсутствовал слой GaAs между слоями InGaAs и Ge, обладали похожими закономерностями в фотолюминесценции, однако фотолюминесценция из InGaAs -квантовой ямы была значительно менее выражена.

Таким образом, исследование спектров ФЛ в структурах с Ge квантовыми ямами позволило сделать вывод о преимущественном вкладе дефектов в сигнал ФЛ таких гетероструктур. Значительный вклад дефектной ФЛ был выявлен также для структур с комбинированными квантовыми ямами Ge/ InGaAs , однако для таких структур удалось пронаблюдать не прямые в координатном пространстве переходы в области 1.5 мкм, предсказанные в работе [5].

Авторы выражают благодарность S. Norfe за подготовку образцов для ПЭМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (11-02-00488), РФФИ-Поволжье (11-02-97020), Мини-

стерства образования и науки РФ (ГК 16.552.11.7007, ГК 16.518.11.7018 (УСУ „Фемтоспектр“)), Совета по грантам президента РФ (МК-678.2012.2).

Список литературы

- [1] S.J. Caracci, M.R. Krames, N. Holonyak, M.J. Ludowise, A. Fischer-Colbrie. *J. Appl. Phys.*, **75**, 2706 (1994).
- [2] М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.Г. Мусихин, Н.Н. Леденцов, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семёнова, Н.А. Малеев, Е.В. Никитина, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **38**, 763 (2004).
- [3] H. Kroemer. *Rev. Mod. Phys.*, **73**, 783 (2001).
- [4] R.E. Camacho-Aguilera, Y. Cai, N. Patel, J.T. Bessete, M. Romagnoli, L.C. Kimerling, J. Michel. *Opt. Exp.*, **20**, 11316 (2012).
- [5] V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov. *J. Appl. Phys.*, **109**, 123 107 (2011).
- [6] S.K. Agarwal, R. Tyagi, M. Singh, R.K. Jain. *Sol. Energy Mater. Solsar Cells*, **59**, 19 (1999).
- [7] C.K. Chia, G.K. Dalapati, Y. Chai, S.L. Lu, W. He, J.R. Dong, D.H.L. Seng, H.K. Hui, A.S.W. Wong, A.J.Y. Lau, Y.B. Cheng, D.Z. Chi, Z. Zhu, Y.C. Yeo, Z. Xu, S.F. Yoon. *J. Appl. Phys.*, **109**, 066 106 (2011).
- [8] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, В.В. Подольский, М.В. Сапожников. *Оптич. журн.*, **75**, 56 (2008).

Редактор Т.А. Полянская

Structural and optical properties of GaAs-based heterostructures with Ge and Ge/ InGaAs quantum wells

V.Ya. Aleshkin*, A.A. Dubinov*, M.N. Drozdov*, B.N. Zvonkov⁺, K.E. Kudryavtsev*, A.A. Tonkikh*^o, A.N. Yablonskiy*, P. Werner^o

* Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

⁺ Research Physical-Technical Institute of the Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

^o Max Planck Institute of Microstructure Physics, D-06120 Halle (Saale), Germany

Abstract The GaAs-based heterostructures with Ge and Ge/ InGaAs quantum wells were grown with using the method of laser sputtering. The structural and optical studies of such heterostructures were carried out. A broad photoluminescence line in the 1300–1650 nm wavelength range was detected. This line corresponds to the indirect transitions in momentum space of Ge quantum well and indirect transitions in coordinate space, but direct in momentum space, between $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ and Ge layers.