

07:09

Стимулированное излучение на длине волны $1.3\ \mu\text{m}$ в метаморфной структуре InGaAs/InGaAsP с квантовыми ямами, выращенной на подложке Ge/Si (001)

© В.Я. Алёшкин^{1,2}, Н.В. Байдусь², О.В. Вихрова²,
А.А. Дубинов^{1,2,¶}, Б.Н. Звонков², З.Ф. Красильник^{1,2},
К.Е. Кудрявцев^{1,2}, С.М. Некоркин², А.В. Новиков^{1,2},
А.В. Рыков², И.В. Самарцев², Д.В. Юрасов^{1,2}

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

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

¶ E-mail: sanya@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 7 марта 2018 г.

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений получена лазерная структура с метаморфным слоем InGaAsP и квантовыми ямами InGaAs на неотклоненной подложке Si(001) с релаксированным Ge-буфером, излучающая при оптической накачке на длине волны $1.3\ \mu\text{m}$. Пороговая плотность мощности при температуре жидкого азота при накачке излучением с длиной волны $0.8\ \mu\text{m}$ составила $250\ \text{kW/cm}^2$.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.16.46478.17282

В настоящее время для реализации „оптоэлектроники на кремнии“ [1] наметился прогресс в создании гибридных лазерных структур на точно ориентированных подложках Si(001). Так, были продемонстрированы лазеры диапазона $1\text{--}1.1\ \mu\text{m}$ на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs [2–5]. В то же время гибридные гетеролазеры A_3B_5 для оптических межсоединений в кремниевой микроэлектронике должны излучать в области прозрачности объемного Si ($\lambda > 1.2\ \mu\text{m}$). Реализация столь длинноволновых лазеров на основе традиционных напряженных КЯ InGaAs в гетероструктурах GaAs/AlGaAs требует роста КЯ InGaAs

с высоким содержанием In, сильно рассогласованных по постоянной решетки с GaAs, что создает серьезные трудности на пути формирования подобных структур. С другой стороны, недавно были реализованы лазерные структуры на квантовых точках InAs [6], излучающие вблизи $1.3\ \mu\text{m}$. Однако наибольшие успехи в этом направлении достигнуты с применением метода молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), который является малопроизводительным по сравнению с методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ). Метод МОГФЭ используется для формирования большинства промышленно выпускаемых полупроводниковых лазеров, и для создания гибридных лазеров для массовой кремниевой интегральной электроники необходимо решить задачу получения лазеров на кремниевой подложке именно этим методом.

Одним из подходов, позволяющих реализовать „длинноволновые“ ($\sim 1.3\ \mu\text{m}$) лазеры с КЯ InGaAs, является выращивание структур на метаморфных буферных слоях InGaAs, сформированных на GaAs. Уже достаточно давно удалось создать такой лазер с относительно низкой пороговой плотностью тока [7].

В настоящей работе представлены результаты получения методом МОГФЭ на неотклоненной кремниевой подложке лазерной структуры, излучающей в области длин волн $1.3\ \mu\text{m}$. Данная длина волны достигнута за счет использования метаморфного буфера InGaAsP и КЯ InGaAs с высоким (58%) содержанием In в качестве активной среды.

Лазерная структура была выращена на неотклоненной (разориентация менее 0.5°) подложке Si(001) в три этапа. На первом этапе в установке МПЭ Riber SIVA-21 формировалась „виртуальная подложка“ Ge/Si(001): выращивался слой релаксированного германия толщиной $\sim 1\ \mu\text{m}$. Далее на полученной „виртуальной подложке“ Ge/Si(001) в установке МОГФЭ AIX 200RF при пониженном давлении выращивалась буферная структура GaAs/AlAs (подробности приведены в [8]). Наконец, на третьем этапе в установке МОГФЭ при атмосферном давлении осаждались градиентный метаморфный буфер $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P} \rightarrow \text{InGaAsP}$ и непосредственно лазерная структура. Градиентный слой InGaAsP выращивался при линейном увеличении потоков In и As; постоянная решетки в этом слое линейно менялась от соответствующей GaAs до величины, согласованной с постоянной

Параметры роста структуры

Слой	Толщина, nm	Температура роста, °C	Скорость роста, nm/s
AlAs	25	700	0.3
GaAs	50	700	0.3
AlAs	25	700	0.3
GaAs	100	700	0.3–1
In _{0.1} Ga _{0.9} As	10	700	1
GaAs	80	700	1
GaAs	2000	700	1
GaAs	550	650	0.6
In _{0.49} Ga _{0.51} P	180	650	0.6
Градиент In _{0.49} Ga _{0.51} P → InGaAsP	630	650	0.6
In _{0.28} Ga _{0.72} As	180	650	0.6
In _{0.28} Ga _{0.72} As	1420	600	0.6
КЯ InGaAs	12	600	0.6
In _{0.28} Ga _{0.72} As	120	600	0.6
In _{0.28} Ga _{0.72} As	720	600	0.6

решетки твердого раствора In_{0.28}Ga_{0.72}As. Далее формировалась лазерная структура с барьерными слоями In_{0.28}Ga_{0.72}As и КЯ InGaAs с большей долей In. Описание ростовой процедуры приведено в таблице.

Возбуждение фотолюминесценции (ФЛ) осуществлялось с помощью непрерывного лазера с $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ либо параметрического генератора света ($\lambda = 0.8 \mu\text{m}$, длительность импульса 10 ns, частота повторения импульсов 10 Hz). Сигнал ФЛ собирался с поверхности образца при регистрации спектров стационарной ФЛ в условиях слабой накачки и с торца структуры в условиях импульсного возбуждения. Для регистрации сигнала ФЛ использовались решеточный монохроматор Acton 2300i и многоканальный фотоприемник на основе линейки фотодиодов InGaAs (спектральный диапазон 0.6–2.2 μm).

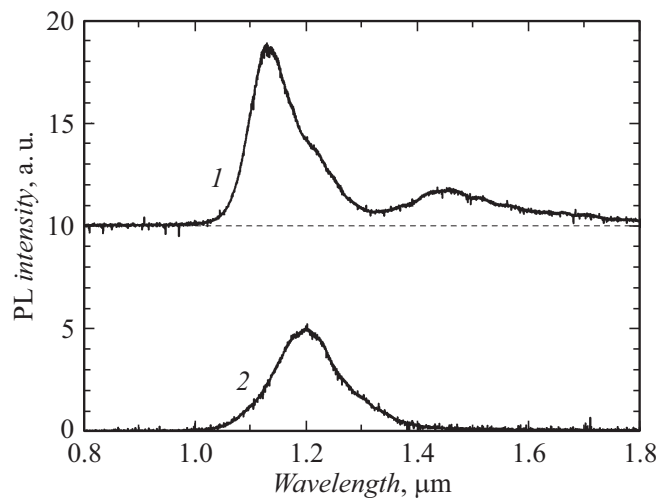


Рис. 1. Спектры ФЛ структуры при накачке излучением непрерывного лазера при температуре жидкого азота (1) и комнатной температуре (2).

На рис. 1 представлены спектры стационарной ФЛ исследуемого образца в условиях слабого возбуждения при двух температурах регистрации. При низкой температуре в спектре ФЛ наблюдаются два широких ($\Delta\lambda > 100$ nm) пики; более длинноволновый пик ($\lambda_{\max} \sim 1.45$ μm) соответствует излучению КЯ InGaAs, а более коротковолновый ($\lambda_{\max} \sim 1.13$ μm) — излучению барьерных слоев $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$, причем интенсивность ФЛ из барьерных слоев значительно превышает интенсивность ФЛ КЯ. При комнатной температуре наблюдается лишь один широкий пик ($\lambda \sim 1.2$ μm), отвечающий излучению из барьерных слоев. Относительно малый вклад КЯ InGaAs в общий сигнал ФЛ образца при температуре жидкого азота и отсутствие ФЛ от КЯ при комнатной температуре связаны, вероятно, с малой энергетической глубиной КЯ для дырок, что приводит к выбросу (делокализации) дырок из КЯ в барьерные слои.

В условиях импульсной накачки при температуре жидкого азота в спектре излучения образца начиная с определенной интенсивности накачки возникает узкая ($\Delta\lambda < 17$ nm) интенсивная линия излучения на

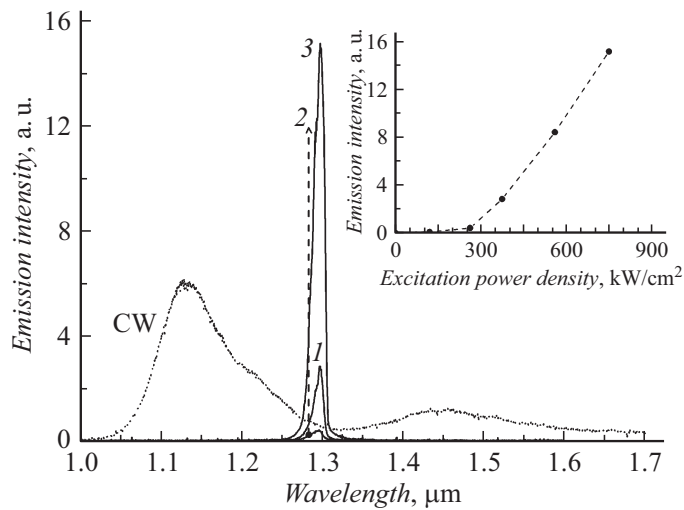


Рис. 2. Спектры излучения образца при импульсной накачке для значений плотности мощности 260 (1), 380 (2) и 750 kW/cm^2 (3) в сравнении со спектром ФЛ, измеренным в условиях слабой непрерывной накачки (CW). $T = 77\text{ K}$. На вставке — зависимость интенсивности излучения образца от плотности мощности импульсной накачки.

длине волны $\lambda \sim 1.3\mu\text{m}$ (рис. 2). Указанная линия эмиссии наблюдается при сборе излучения с торца структуры и не выражена при наблюдении ФЛ с поверхности образца; таким образом, она имеет все признаки стимулированного излучения (СИ). В то же время спектральное положение наблюдаемой линии СИ не соответствует положению линий излучения КЯ ($\lambda \sim 1.45\mu\text{m}$) либо барьерных слоев ($\lambda \sim 1.13\mu\text{m}$) в спектрах стационарной ФЛ. Проведенные поляризационные измерения показали, что излучение на длине волны $\lambda \sim 1.3\mu\text{m}$ практически полностью поляризовано, при этом вектор электрического поля лежит в плоскости роста образца. Это позволяет соотнести наблюдаемое излучение с оптическими переходами именно в КЯ [9], а не в барьерных слоях.

Расхождение в длинах волн, на которых наблюдаются ФЛ и СИ, объясняется следующим образом. Можно предположить, что коэффи-

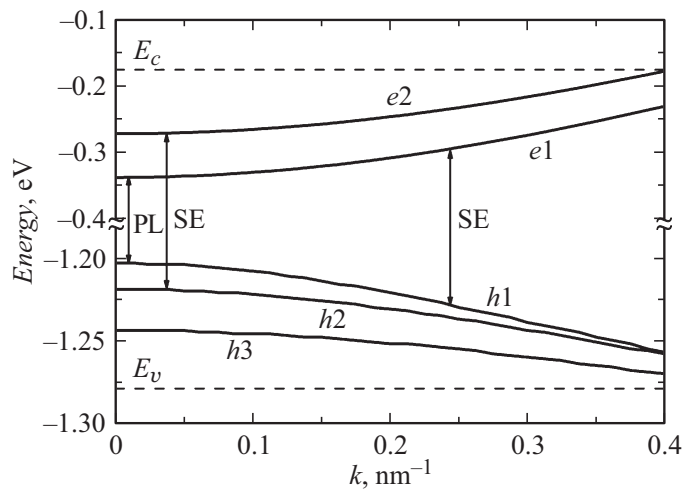


Рис. 3. Рассчитанный от дна зоны проводимости GaAs спектр подзон размерного квантования в КЯ $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}/\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$ шириной 12 nm. $T = 77$ K. E_c и E_v — дно зоны проводимости и потолок валентной зоны в барьерных слоях $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$; $e1$, $e2$ и $h1$, $h2$, $h3$ — электронные и дырочные подзоны в КЯ. Стрелками показаны рабочие переходы в режимах спонтанной ФЛ (PL, $\lambda = 1.45 \mu\text{m}$) и стимулированного излучения (SE, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$).

коэффициент усиления на основном переходе в КЯ недостаточен для компенсации оптических потерь в исследуемом образце. На это косвенно указывает, в том числе, и весьма высокий порог возникновения СИ ($\sim 250 \text{ kW/cm}^2$), обусловленный, по-видимому, большой дефектностью выращенной структуры. В то же время СИ может достигаться на длине волны, соответствующей переходам с участием возбужденных состояний электронов и дырок в КЯ, поскольку при „заливке“ этих состояний коэффициент усиления больше, чем в случае основного перехода в КЯ. Для проверки этого предположения были проведены расчеты энергетического спектра электронов и дырок в КЯ $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в зависимости от состава твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в КЯ. Расчеты проводились в рамках трехзонной модели Кейна 8×8 с учетом деформационных эффектов [10]. Ширина КЯ задавалась равной 12 nm исходя из ростовых данных, состав

барьерных слоев ($x_b = 0.28$) определялся по данным ФЛ. Расчеты показали, что соответствие энергии перехода между основными состояниями электронов и дырок в КЯ на длине волны излучения, регистрируемой в спектрах стационарной ФЛ ($\lambda \sim 1.45 \mu\text{m}$), достигается при доле In в КЯ $x \sim 0.58$ (зонная диаграмма, рассчитанная для этого состава КЯ, приведена на рис. 3). В этом случае длина волны $\lambda \sim 1.3 \mu\text{m}$, на которой наблюдается СИ, действительно соответствует оптическому переходу между вторыми подзонами электронов и дырок в КЯ.

Таким образом, в работе впервые методом МОГФЭ создана лазерная структура с метаморфным слоем InGaAsP и КЯ InGaAs на неотклоненной подложке Si(001) и продемонстрировано стимулированное излучение на длине волны 1.3 мкм при температуре жидкого азота.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-00644).

Список литературы

- [1] Sun C., Wade M.T., Lee Y., Orcutt J.S., Alloatti L., Georgas M.S., Waterman A.S., Shainline J.M., Avizienis R.R., Lin S., Moss B.R., Kumar R., Pavanello F., Atabaki A.H., Cook H.M., Ou A.J., Leu J.C., Chen Y.-H., Asanović K., Ram R.J., Popović M.A., Stojanović V.M. // *Nature*. 2015. V. 528. P. 534–538.
- [2] Huang X., Song Y., Masuda T., Jung D., Lee M. // *Electron. Lett.* 2014. V. 50. P. 1226–1227.
- [3] Aleshkin V.Ya., Baidus N.V., Dubinov A.A., Fefelov A.G., Krasilnik Z.F., Kudryavtsev K.E., Nekorkin S.M., Novikov A.V., Pavlov D.A., Samartsev I.V., Skorokhodov E.V., Shaleev M.V., Sushkov A.A., Yablonskiy A.N., Yunin P.A., Yurasov D.V. // *Appl. Phys. Lett.* 2016. V. 109. P. 061111 (1–5).
- [4] Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Polubavkina Yu.S., Maximov M.V., Kulagina M.M., Troshkov S.I., Zadiranov Yu.M., Lipovskii A.A., Baidus N.V., Dubinov A.A., Krasilnik Z.F., Novikov A.V., Pavlov D.A., Rykov A.V., Sushkov A.A., Yurasov D.V., Zhukov A.E. // *Opt. Express*. 2017. V. 25. P. 16754–16760.
- [5] Аleshкин В.Я., Байдуш Н.В., Дубинов А.А., Кудрявцев К.Е., Некоркин С.М., Новиков А.В., Рыков А.В., Самарцев И.В., Фефелов А.Г., Юрасов Д.В., Красильник З.Ф. // *ФТП*. 2017. Т. 51. В. 11. С. 1530–1533.
- [6] Liu A.Y., Peters J., Huang X., Jung D., Norman J., Lee M.L., Gossard A.C., Bowers J.E. // *Opt. Lett.* 2017. V. 42. P. 338–341.

- [7] *Uchida T., Kurakake H., Soda H., Yamazaki S.* // *Electron. Lett.* 1994. V. 30. P. 563–565.
- [8] *Байдусь Н.В., Алешкин В.Я., Дубинов А.А., Кудрявцев К.Е., Некоркин С.М., Новиков А.В., Павлов Д.А., Рыков А.В., Сушков А.А., Шалеев М.В., Юнин П.А., Фефелов А.Г., Юрасов Д.В., Яблонский А.Н., Красильник З.Ф.* // *ФТП.* 2017. Т. 51. В. 11. С. 1579–1582.
- [9] *Chow W.W., Koch S.W.* *Semiconductor-laser fundamentals. Physics of the gain materials.* Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 245 p.
- [10] *Aleshkin V.Ya., Dubinov A.A.* // *Physica B.* 2016. V. 503. P. 32–37.