

Стимулированное излучение в гетероструктурах с двойными квантовыми ямами InGaAs/GaAsSb/GaAs, выращенных на подложках GaAs и Ge/Si(001)

© А.Н. Яблонский^{+,*}, С.В. Морозов^{+,*}, Д.М. Гапонова^{+,*}, В.Я. Алешкин^{+,*}, В.Г. Шенгуров^{*},
Б.Н. Звонков^{*}, О.В. Вихрова^{*}, Н.В. Байдусь^{*}, З.Ф. Красильник⁺

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

^{*} Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603960 Нижний Новгород, Россия

E-mail: yablonsk@ipm.sci-nnov.ru

(Получена 27 апреля 2016 г. Принята к печати 10 мая 2016 г.)

Сообщается о наблюдении стимулированного излучения в структурах с двойными квантовыми ямами InGaAs/GaAsSb/GaAs, выращенных на подложке Si(001) с использованием релаксированного Ge-буфера. Стимулированное излучение наблюдалось при температуре 77 К на длине волны 1.11 мкм, т. е. в области прозрачности объемного Si. В аналогичных гетероструктурах, выращенных на подложке GaAs, стимулированное излучение наблюдалось при комнатной температуре на длине волны 1.17 мкм, что открывает перспективы интеграции таких структур в кремниевую оптоэлектронику.

1. Введение

В настоящее время активно развиваются исследования светоизлучающих устройств, выращенных на кремниевой подложке [1]. Одно из направлений этих исследований связано с так называемыми гибридными системами на основе интеграции на кристалле элементов кремниевой фотоники со светоизлучающими элементами на основе соединений A^{III}B^V, позволяющими использовать преимущества прямозонных полупроводников для достижения лазерной генерации в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне [2–5]. На данный момент существуют два основных подхода к интеграции светоизлучающих A^{III}B^V-устройств на кремнии, а именно сращивание уже изготовленных лазерных A^{III}B^V-структур с кремниевой подложкой [2–4] и непосредственный эпитаксиальный рост A^{III}B^V-структур на кремниевой подложке [2,5]. В каждом из этих направлений сохраняется потенциал для дальнейшего совершенствования, однако более перспективным для формирования множественных оптических коммуникационных каналов на чипе следует признать второй подход. Необходимо отметить, что качество A^{III}B^V-структур, например, на основе GaAs, выращенных на Si-подложках, заметно уступает качеству эпитаксиальных слоев GaAs, выращенных на GaAs-подложках, что связано со значительным (~ 4%) рассогласованием параметров кристаллической решетки GaAs и Si, а также с разницей в коэффициентах температурного расширения этих материалов. Для решения данной проблемы при росте соединений A^{III}B^V на Si-подложке используют буферные слои, например GaP, Ge или SiGe, параметры решетки которых лучше согласованы с GaAs [1,5,6], что позволяет существенно улучшить качество слоев GaAs, выращиваемых на Si. На сегодняшний день достигнутый уровень качества таких эпитаксиальных слоев позволяет создавать лазерные структуры [1,6], в частности

структуры с квантовыми ямами (длина волны излучения 0.8–1.1 мкм) и квантовыми точками (1.3 мкм).

Одним из основных требований к гибридным лазерным A^{III}B^V-структурам на кремнии является излучение в области прозрачности объемного кремния, т. е. на длине волны, превышающей 1.06 мкм. В указанном спектральном диапазоне предпочтительными являются длины волн излучения 1.3 и 1.5 мкм, поскольку они соответствуют максимумам прозрачности волоконно-оптических линий связи. Таким образом, создание лазерных A^{III}B^V-структур на кремнии, излучающих вблизи длины волны 1.3 мкм, является на сегодняшний день актуальной задачей. Одним из путей решения данной задачи является формирование лазерных гетероструктур с активной областью, содержащей квантовые ямы (КЯ), GaAsSb/GaAs и InGaAs/GaAsSb/GaAs. Известно, что в гетероструктурах GaAsSb/GaAs указанная длина волны излучательного перехода достигается при содержании сурьмы ~ 35%, при этом разрыв зоны проводимости на гетерогранице GaAsSb/GaAs близок к нулю, и электроны в таких структурах оказываются слабо локализованными [7–9], что приводит к существенному температурному гашению фотолюминесценции (ФЛ). В гетероструктурах с двойными КЯ InGaAs/GaAsSb/GaAs электроны оказываются эффективно локализованными в слоях InGaAs, а дырки — в слоях GaAsSb. Как было показано в наших предыдущих работах [10], это приводит как к повышению эффективности излучательной рекомбинации при комнатной температуре, так и к увеличению длины волны основного излучательного перехода. В настоящей работе были получены и исследованы гетероструктуры с двойными КЯ InGaAs/GaAsSb/GaAs, выращенные на подложках Si(001) с использованием релаксированного Ge-буфера, а также проведено сравнение с аналогичными структурами, выращенными на подложках GaAs.

Таблица 1. Структура с двойной квантовой ямой на подложке Si

Название слоя	Состав слоя	Толщина слоя, нм
Подложка Si	Si(001)	
Слой Ge	Ge	500
Буферный слой	GaAs	100
Ограничительный слой	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	1000
Волноводный слой	GaAs	600
Двухслойная КЯ	GaAs _{0.75} Sb _{0.25}	7
	In _{0.2} Ga _{0.8} As	7
Волноводный слой	GaAs	400
Ограничительный слой	InGaP	250
Покровный слой	GaAs	300

Таблица 2. Структура с двойной квантовой ямой на подложке GaAs

Название слоя	Состав слоя	Толщина слоя, нм
Подложка GaAs	GaAs	
Буферный слой	GaAs	500
Ограничительный слой	InGaP	500
Волноводный слой	GaAs	300
Двухслойная КЯ	GaAs _{0.75} Sb _{0.25}	7
	In _{0.2} Ga _{0.8} As	7
Волноводный слой	GaAs	300
Ограничительный слой	InGaP	500

2. Описание структур и методика эксперимента

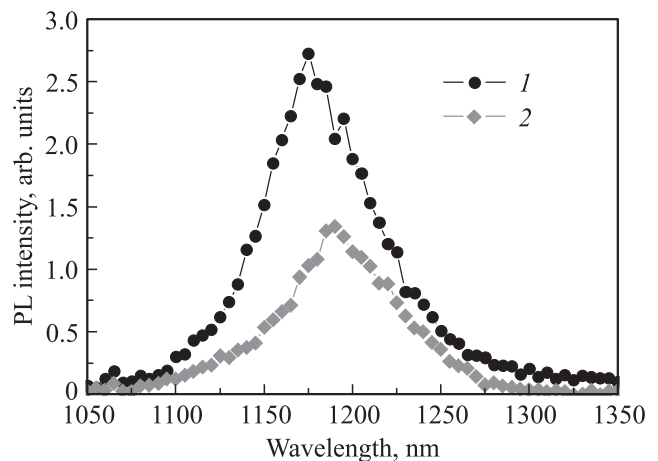
Структуры GaAsSb/GaAs и InGaAs/GaAsSb/GaAs выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии). В качестве подложек для роста гибридных структур использовались пластины Si(001) с удельным сопротивлением 10 Ом·см. На Si-подложке методом „горячей проволоки“ (HW CVD) в установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) выращивался слой Ge толщиной 500 нм. Далее в установке МОС-гидридной эпитаксии проводился рост гетероструктуры на основе A^{III}B^V, включающей в себя буферный слой GaAs, лазерную структуру, содержащую двойную КЯ GaAs_{0.75}Sb_{0.25}/In_{0.2}Ga_{0.8}As, расположенную в волноведущем слое GaAs, и ограничительные слои Al_{0.3}Ga_{0.7}As, InGaP. Более подробно процесс роста описан в [11]. Для сравнения аналогичные структуры с двойной КЯ GaAs_{0.75}Sb_{0.25}/In_{0.2}Ga_{0.8}As были выращены на подложке GaAs. Подробное описание структур приведено в табл. 1, 2.

Спектры спонтанного и стимулированного излучения в полученных структурах исследовались при температурах $T = 77$ и 300 К. Для оптического возбуждения структур использовалось импульсное лазерное излучение

с длиной волны 0.65 мкм и длительностью импульса ~ 5 нс. Средняя мощность возбуждения варьировалась в диапазоне 0.5–100 мВт. Для регистрации излучения структур использовался решеточный монохроматор Acton-2300 и многоканальный фотоприемник на основе линейки InGaAs-диодов или фотоумножителя ИК диапазона Hamamatsu (время отклика ~ 2 нс). Временное разрешение системы регистрации ФЛ определялось длительностью возбуждающих лазерных импульсов и составляло ~ 5 нс. Возбуждение лазерных структур осуществлялось с лицевой поверхности образцов несфокусированным пучком диаметром 5 мм (при исследовании спонтанного излучения) или лучом, сфокусированным на образце в горизонтальную полосу размером 0.2×10 мм, перпендикулярную боковой грани структуры (при исследовании стимулированного излучения). Излучение структур в обоих случаях регистрировалось с боковой грани исследуемого образца.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры спонтанного излучения гетероструктур GaAsSb/InGaAs/GaAs, выращенных на подложках GaAs(001) и Ge/Si(001), полученные при комнатной температуре. Проведенные ранее исследования [10] показали, что наблюдаемая линия ФЛ соответствует пространственно непрямоугольному переходу в двойной КЯ GaAsSb/InGaAs между основными состояниями электронов в слое GaAsSb и дырок в слое InGaAs. В то же время, как следует из полученных спектрокинетических зависимостей ФЛ (рис. 2), характерное время спада люминесценции исследованных структур не превышает временного разрешения системы регистрации ФЛ, т.е. 5 нс, что свидетельствует о значительном перекрытии волновых функций электронов и дырок в двойной КЯ GaAsSb/InGaAs [10]. Отметим, что, несмотря на более низкое кристаллическое качество, что харак-

**Рис. 1.** Спектры спонтанного излучения (PL) гетероструктур GaAsSb/InGaAs/GaAs, выращенных на подложках GaAs(001) (1) и Ge/Si(001) (2). $T = 300$ К.

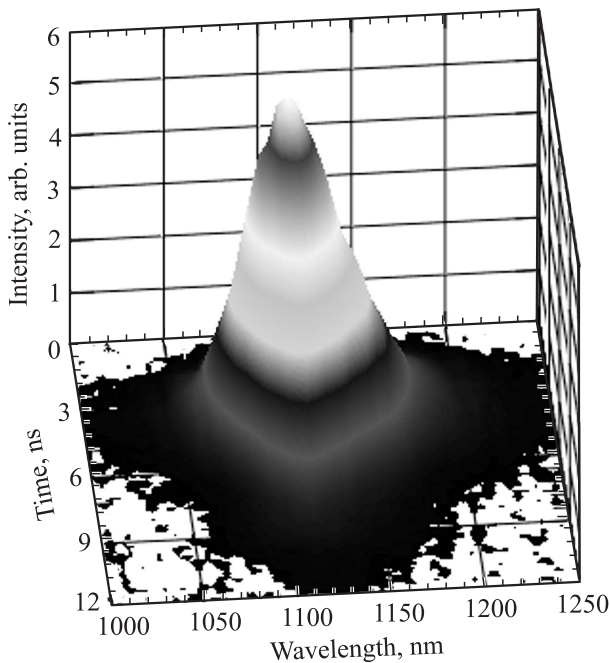


Рис. 2. Спектрокинетическая зависимость спонтанного излучения структуры GaAs/InGaAs/GaAs, выращенной на подложке Ge/Si(001). $T = 77$ К.

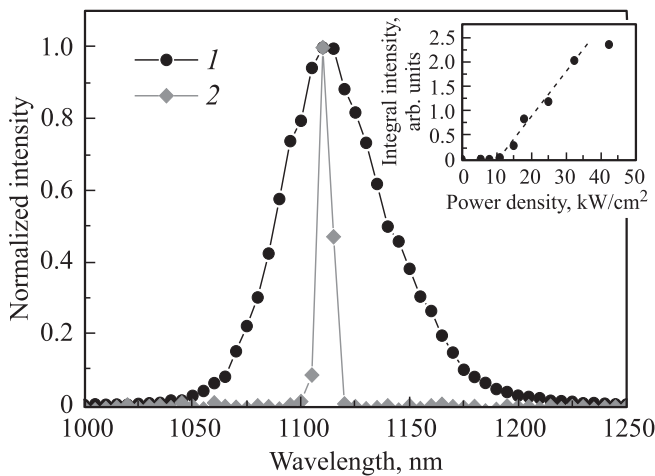


Рис. 3. Нормированные спектры спонтанного (1) и стимулированного (2) излучения структуры GaAs/InGaAs/GaAs, выращенной на подложке Ge/Si(001). $T = 77$ К. На вставке — зависимость интегральной интенсивности излучения от средней мощности накачки

терно, как правило, для A^{III}B^V-структур, выращенных на Ge/Si-подложках, падение интенсивности ФЛ такой структуры при 300 К составило менее, чем в 2 раза, по сравнению со структурой, выращенной на подложке GaAs. Причиной небольшого увеличения длины волны ФЛ, наблюдаемого для структуры, выращенной на подложке Ge/Si(001), является, по-видимому, влияние остаточных упругих напряжений, возникающих вследствие неполного согласования параметров кристаллических

решеток GaAs и Ge-буфера, на параметры двойной КЯ GaAsSb/InGaAs, в частности состава твердых растворов GaAsSb и InGaAs.

На рис. 3 представлены спектры спонтанного и стимулированного излучения структуры GaAsSb/InGaAs/GaAs, выращенной на подложке Ge/Si(001), измеренные при 77 К. Максимум ФЛ наблюдается на длине волны 1.11 мкм при $T = 77$ К и 1.17 мкм при 300 К, т.е. находится в области прозрачности объемного кремния. На вставке к рис. 3 показана зависимость интегральной интенсивности излучения от плотности мощности импульсной накачки в геометрии, соответствующей исследованию стимулированного излучения (фокусировка лазерного луча в горизонтальную полосу 0.2×10 мм). Пороговая плотность мощности накачки, соответствующая возникновению стимулированного излучения, составила ~ 0.5 мВт/см² (средняя плотность мощности), или 10 кВт/см² в импульсе. При комнатной температуре стимулированное излучение в структуре, выращенной на подложке Ge/Si(001), не наблюдалось, однако в аналогичной структуре, выращенной на подложке GaAs, стимулированное излучение было получено как при 77, так и при 300 К. Положение линии стимулированного излучения в структуре, выращенной на подложке GaAs, при 77 К составило, как и в структуре, полученной на подложке Ge/Si, 1.11 мкм, а при 300 К — 1.167 мкм (рис. 4). Пороговая плотность мощности накачки, соответствующая возникновению стимулированного излучения, составила 10 кВт/см² при 77 К и 120 кВт/см² при 300 К. Таким образом, показана возможность создания на основе гетероструктур с двойными КЯ GaAsSb/InGaAs гибридных лазерных A^{III}B^V-структур на Si-подложках, излучающих в области прозрачности объемного кремния. Дальнейшая оптимизация структур будет направлена на достижение стимулированного излучения при комнатной температуре и увеличение длины волны излучательного перехода до значения 1.3 мкм.

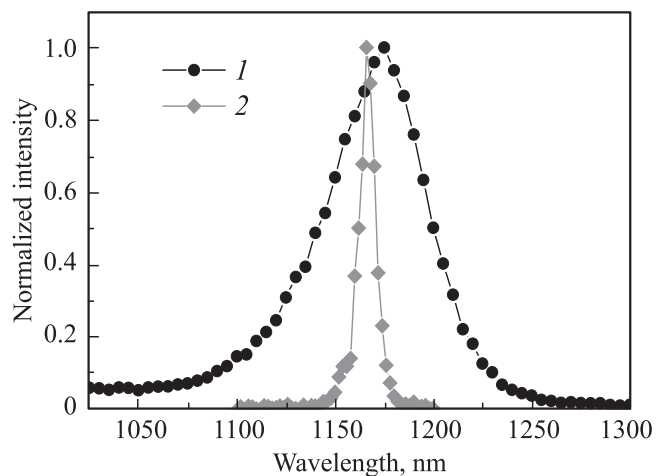


Рис. 4. Нормированные спектры спонтанного (1) и стимулированного (2) излучения структуры GaAs/InGaAs/GaAs, выращенной на подложке GaAs. $T = 300$ К.

4. Заключение

В работе сообщается о наблюдении стимулированного излучения в структурах с двойными квантовыми ямами InGaAs/GaAsSb/GaAs, выращенных на подложке Si(001) с использованием релаксированного Ge-буфера. Стимулированное излучение наблюдалось при температуре 77 К на длине волны 1.11 мкм, т.е. в области прозрачности объемного кремния. В аналогичных гетероструктурах, выращенных на подложке GaAs, стимулированное излучение наблюдалось при комнатной температуре на длине волны 1.17 мкм, что открывает перспективы интеграции таких структур в кремниевую оптоэлектронику.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-00644).

Список литературы

- [1] A.Y. Liu, C. Zhang, J. Norman, A. Snyder, D. Lubishev, J.M. Fastenau, A.W.K. Liu, A.C. Gossard, J.E. Bowers. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 041 104 (2014).
- [2] D. Liang, G. Roelkens, R. Baets, J.E. Bowers. *Materials*, **3**, 1782 (2010).
- [3] H. Wada, T. Kamijoh. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **3**, 937 (1997).
- [4] H. Wada T. Kamijoh. *Jpn. J. Appl. Phys. 1, Regul. Rap. Short Notes*, **37**, 1383 (1998).
- [5] Ю.Б. Болховитянов, О.П. Пчеляков. *УФН*, **178**, 459 (2008).
- [6] A. Lee, H. Liu, A. Seeds. *Semicond. Sci. Technol.*, **28**, 015 027 (2013).
- [7] J.R. Pesetto, G.B. Stringfellow. *J. Cryst. Growth*, **62**, 1 (1983).
- [8] Yu.G. Sadofyev, N. Samal, B.A. Andreev, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, A.G. Spivakov, A.N. Yablonskiy. *Semiconductors*, **44**, 405 (2010).
- [9] S.V. Morozov, D.I. Kryzhkov, A.N. Yablonsky, A.V. Antonov, D.I. Kuritsin, D.M. Gaponova, Yu.G. Sadofyev, N. Samal, V.I. Gavrilenko, Z.F. Krasilnik. *J. Appl. Phys.*, **113**, 163 107 (2013).
- [10] D.I. Kryzhkov, A.N. Yablonsky, S.V. Morozov, V.Ya. Aleshkin, B.N. Zvonkov, O.V. Vikhrova, Z.F. Krasilnik. *J. Appl. Phys.*, **116**, 203 102 (2014).
- [11] Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, О.В. Вихрова, Н.В. Дикарева. *ФТП*, **47**, 1231 (2013).

Редактор Л.В. Шаронова

Stimulated emission in heterostructures with double InGaAs/GaAsSb/GaAs quantum wells grown on GaAs and Ge/Si(001) substrates

A.N. Yablonsky^{+,*}, S.V. Morozov^{+,*}, D.M. Gaponova^{+,*}, V.Ya. Aleshkin^{+,*}, V.G. Shengurov^{*}, B.N. Zvonkov^{*}, O.V. Vikhrova^{+,*}, N.V. Baidus^{*,*}, Z.F. Krasil'nik⁺

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

^{*} Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract We report on the first observation of stimulated emission in heterostructures with double InGaAs/GaAsSb/GaAs quantum wells monolithically grown on silicon substrates. The stimulated emission was observed at 77 K under pulsed optical pumping at the wavelength of 1.11 μm , i.e. in the transparency range of the bulk silicon. At room temperature the photoluminescence peak was observed at 1.19 μm . In the similar InGaAs/GaAsSb/GaAs structures grown on GaAs substrates the room temperature stimulated emission was observed at 1.17 μm . The obtained results are promising for the integration of such structures in the silicon-based optoelectronics.