

Фотолюминесценция ($\lambda = 1.3$ мкм) при комнатной температуре квантовых точек InGaAs на подложке Si(100)

© Т.М. Бурбаев, И.П. Казаков[¶], В.А. Курбатов, М.М. Рзаев, В.А. Цветков, В.И. Цехош

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

(Получена 18 октября 2001 г. Принята к печати 30 октября 2001 г.)

На кремниевой подложке с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ выращены структуры GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с квантовыми точками, обладающие интенсивной фотолюминесценцией в области 1.3 мкм при комнатной температуре. Процесс выращивания осуществлялся последовательно в двух установках молекулярно-лучевой эпитаксии с перегрузкой структуры через атмосферу. Приводятся результаты исследования процесса роста структуры методом дифракции быстрых электронов.

1. Введение

Прогресс в области информационных технологий во многом определяется развитием оптоэлектроники, где пропускная способность линий передачи информации возрастает на порядки за счет более высокой несущей частоты сигнала. В настоящее время широко применяется оптическое волокно на основе SiO_2 , в котором при длине волны 1.3 мкм отсутствует дисперсия, а при 1.55 мкм потери минимальны. В настоящее время ведется интенсивная разработка светоизлучающих приборов на эти длины волн.

Интегрирование оптических устройств обработки информации в кремниевые интегральные схемы — наиболее естественный путь развития в данном направлении, однако технологические трудности здесь весьма велики. Не удается создать светоизлучающие приборы на основе самого кремния из-за его „непрямозонной“ природы. Попытки использования nanoостровков Si-Ge, пористого кремния, легирования кремния редкоземельными элементами пока не привели к созданию приборов, так как оптические характеристики этих структур при комнатной температуре неудовлетворительны.

Возможное решение проблемы заключается в использовании прямозонных материалов $A^{III}B^V$ в качестве светоизлучающих элементов, интегрированных на кремниевой подложке. Несмотря на очевидные успехи в технологии гибридных интегральных схем, где готовые приборы, например лазеры, „приклеиваются“ на кремниевую подложку, структуры, получаемые в процессе эпитаксиального роста, более перспективны хотя бы потому, что они технологичны при групповых методах изготовления интегральных схем. Получение совершенных эпитаксиальных слоев GaAs на кремнии сталкивается с рядом проблем, таких как высокая плотность дислокаций и возникновение антифазных доменов. Вместе с тем nanoостровковые структуры из прямозонного материала на кремниевой подложке практически не исследовались. В работе [1] nanoостровки InAs выращивались непосредственно на кремниевой подложке. Структуры обладали люминесценцией в области 1.55 мкм при комнатной температуре.

В данной работе предложен новый подход: квантовые точки (КТ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ формировались в матрице GaAs, эпитаксиально выращенной на подложке Si(001) с буферными слоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

2. Подготовка образцов

Выращивание структуры проводилось последовательно на двух установках молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). На установке „Катунь“ с электронно-лучевыми испарителями выращивался буферный слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, на установке „ЦНА-25“ с тигельными молекулярными источниками — активная область структуры GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (КТ). Структура выращивалась на

GaAs, 200 Å, 650°C
InGaAs quantum dots, 650°C
GaAs, 2000 Å, 700°C
Cap Si, 50 Å, 500°C
Ge, 1500 Å, 500°C
$\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$, 500 Å, 250°C
$\text{Si}_{0.38}\text{Ge}_{0.62}$, 1500 Å, 500°C
$\text{Si}_{0.38}\text{Ge}_{0.62}$, 500 Å, 250°C
$\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$, 1500 Å, 500°C
$\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$, 500 Å, 250°C
Si, 500 Å, 400°C
Si, 1000 Å, 750°C
Substrate Si (001)

Рис. 1. Схематический разрез структуры, содержащей квантовые точки InGaAs, на подложке Si(001) с многослойным буфером $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Указаны толщины слоев d и температуры T_s , при которых слои выращивались.

[¶] E-mail: kazakov@sci.lebedev.ru
Fax: (095)1357880

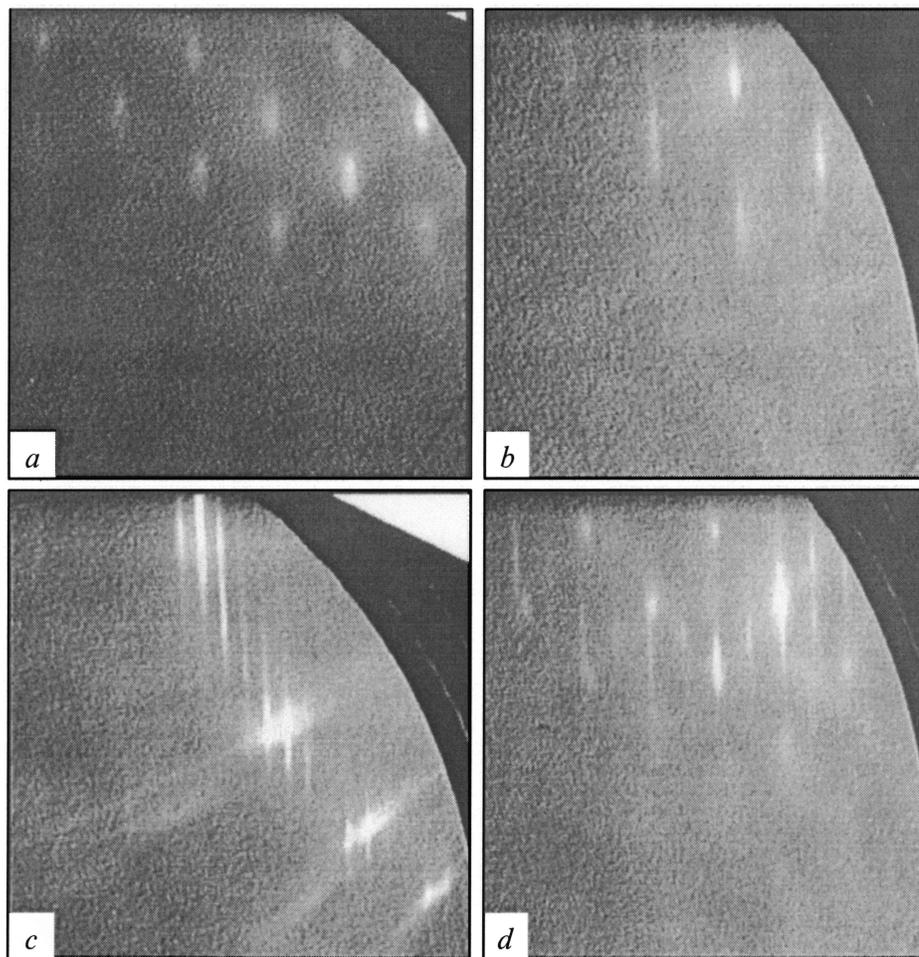


Рис. 2. Картины дифракции быстрых электронов на отражение на различных стадиях выращивания гетероструктуры (энергия электронов 15 кэВ, азимут $\langle 110 \rangle$): *a* — поверхность подложки Si (001) с выращенными буферными слоями Si/SiGe/Ge/Si после перегрузки через атмосферу из установки „Катунь“ в ростовую камеру „ЦНА-25“; *b* — та же поверхность после очистки в потоке Ga; *c* — поверхность буферного слоя GaAs (001) толщиной 2000 Å; *d* — изменение картины дифракции после выращивания слоя квантовых точек InGaAs.

подложке кремния марки КЭФ-4.5 с ориентацией (001) диаметром 76 мм.

Предэпитаксиальная подготовка подложки в установке „Катунь“ заключалась в удалении окисного слоя в потоке паров Si при температуре $T_s = 1000^\circ\text{C}$ (здесь и далее в качестве значения T_s приводятся показания термопары нагревателя подложки). Затем выращивался буферный слой Si толщиной 1000 Å ($T_s = 750^\circ\text{C}$) и многослойный буфер $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ со ступенчатым увеличением содержания Ge. Для достижения более полной релаксации напряжений несоответствия и снижения плотности дислокаций в буферном слое со ступенчатым изменением состава использовался метод, предложенный авторами работ [2,3]. Схематический разрез структуры с указанием состава, толщины слоя и температуры T_s приведен на рис. 1. Каждый слой с определенным содержанием Ge включал подслой толщиной $d = 500$ Å, выращенный при пониженной температуре, $T_s = 250^\circ\text{C}$. Затем температура поднималась до $T_s = 500^\circ\text{C}$ и наращивалось еще 1500 Å материала того же состава. После паузы,

необходимой для увеличения потока Ge, таким же образом выращивался следующий слой и т.д. Как видно из приведенной схемы, многослойный буфер $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ состоял из трех слоев с содержанием Ge $x = 0.3, 0.62, 1.0$. Для защиты верхнего слоя чистого Ge на поверхность структуры был нанесен тонкий ($d = 50$ Å) слой Si. Затем структура была перенесена через атмосферу в шлюзовую камеру установки МЛЭ „ЦНА-25“, в которой в течение 1 ч был достигнут вакуум выше 10^{-6} Па.

Удаление окисного слоя SiO_2 с поверхности структуры в установке „ЦНА-25“ проводилось путем прогрева при $T_s = 800^\circ\text{C}$ в потоке Ga. Затем выращивалась следующая структура: слой GaAs толщиной $d = 2000$ Å при $T_s = 700^\circ\text{C}$, слой КТ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.5$) при $T_s = 650^\circ\text{C}$, защитный слой GaAs толщиной $d = 200$ Å при $T_s = 650^\circ\text{C}$. Слой КТ выращивался в процессе циклического осаждения пар слоев InAs/GaAs, продолжительность осаждения каждого слоя 2 с. Эффективная толщина слоя КТ составила 30 Å.

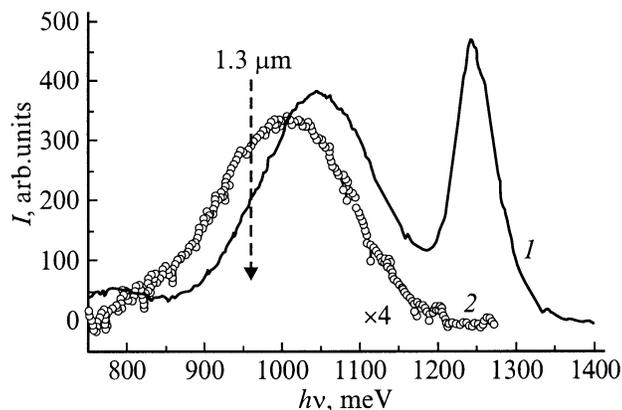


Рис. 3. Спектры фотолуминесценции гетероструктуры с квантовыми точками InGaAs, выращенной на подложке Si(001)/Si_{0.7}Ge_{0.3}/Si_{0.38}Ge_{0.62}/Si_{0.1}Ge_{0.9}/Ge/GaAs, при 77 (1) и 300 К (2).

Процессы очистки поверхности подложки и выращивания гетероструктуры контролировались методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭ) и записывались на жесткий диск персонального компьютера системой регистрации и обработки изображений ДБЭ. На рис. 2 приведены картины ДБЭ на различных стадиях выращивания гетероструктуры. После перегрузки кремниевой подложки с буферными слоями Si_{1-x}Ge_x в ростовую камеру установки „ЦНА-25“ поверхность была покрыта слоем естественного окисла (рис. 2, a). Очистка в слабом потоке Ga с одновременным нагревом до $T_s = 800^\circ\text{C}$ приводила к удалению окисного слоя, что подтверждается возникновением реконструкции (2×1), характерной для чистой поверхности кремния (рис. 2, b). Практически сразу после начала роста слоя GaAs на поверхности структуры установилась реконструкция (2×4). На рис. 2, c представлена картина ДБЭ от поверхности буферного слоя GaAs(001) толщиной 2000 Å, выращенного при $T_s = 700^\circ\text{C}$. Наличие вытянутых тяжей в азимуте $\langle 110 \rangle$ свидетельствует о достаточно высоком качестве слоя GaAs. После выращивания слоя квантовых точек In_{0.5}Ga_{0.5}As на картине ДБЭ помимо тяжей присутствуют точечные рефлексы, характерные для кристаллических поверхностей с трехмерными островками (рис. 2, d). Анализ положения максимумов интенсивности стержней и точек дает соотношение между постоянными решеток InGaAs и GaAs $a_{\text{InGaAs}}/a_{\text{GaAs}} = 1.034$. Это позволяет оценить состав твердого раствора In_xGa_{1-x}As как $x \approx 0.5$, без учета напряжений, возникающих из-за несоответствия параметров решетки КТ и матрицы GaAs.

Спектры фотолуминесценции (ФЛ) измерялись при температурах 77 и 300 К с использованием монохроматора МДР-2. Источником возбуждения служил полупроводниковый лазер с длиной волны излучения $\lambda = 0.66$ мкм (энергия кванта $h\nu = 1.87$ эВ). Максимальная мощность излучения была равна 70 мВт,

плотность мощности излучения на образце составляла не более 4 Вт/см². Излучение от образцов регистрировалось с помощью охлаждаемого жидким азотом германиевого *p-i-n*-фотодиода.

3. Результаты и обсуждение

При азотной температуре в спектрах фотолуминесценции $I(h\nu)$ (рис. 3) наблюдаются линии как от квазидвумерного (2D) смачивающего слоя (при энергии $h\nu = 1235$ мэВ), так и от трехмерных (3D) квантовых точек InGaAs (максимум линии при энергии $h\nu = 1045$ мэВ). При повышении температуры до комнатной интенсивность излучения КТ падает примерно в 4 раза. Вследствие температурного изменения ширины запрещенной зоны GaAs положение линии при этом смещается в красную область спектра. Большую ширину линий излучения КТ (~ 200 мэВ на полувысоте) в спектрах ФЛ можно объяснить неоднородностями островков InGaAs как по размеру, так и по составу. Как показали исследования, проведенные на атомно-силовом микроскопе, буферный слой Ge и защитный слой GaAs имеют рельефную поверхность. Это дает основания предполагать, что выращивание КТ InGaAs проводилось так же на рельефной поверхности GaAs. В работах [4,5] подобный спектр ФЛ наблюдался на образцах со смешанной (2D–3D)-структурой слоя InAs в матрице GaAs. (2D–3D)-структура слоя InGaAs весьма вероятна и в наших образцах, учитывая неоднородность толщины слоя из-за различного наклона отдельных участков рельефной поверхности подложки к направлению падения молекулярных пучков. Известно также, что сегрегация в твердых растворах, и в частности InGaAs, на рельефной поверхности приводит к латеральной неоднородности по составу в результате различной скорости поверхностной диффузии компонентов — адатомов к ступеням, концентрация которых больше на наклонных к сингулярным плоскостям участках поверхности [6]. Наличие подобной смешанной (2D–3D)-структуры слоя InGaAs подтверждается также наблюдаемыми *in situ* картинами ДБЭ (рис. 2, d).

4. Заключение

В настоящей работе предложен и реализован способ выращивания ансамбля квантовых точек InGaAs на кремниевой подложке путем создания переходного буферного слоя Si/Si_{1-x}Ge_x/Ge/GaAs. Получены структуры с интенсивной фотолуминесценцией при комнатной температуре в важной для практических применений области спектра 1.3 мкм.

Показана возможность использования в качестве подложки для эпитаксии GaAs структуры Si/Si_{1-x}Ge_x, выращенной в другой установке, после ее перегрузки через атмосферу.

В отличие от формирования КТ $A^{III}B^V$ непосредственно в кремниевой матрице предлагаемый способ обладает следующими преимуществами.

1) Имеется возможность гибкого управления процессом формирования КТ путем изменения напряжения несоответствия, зависящего от конструкции буферного слоя $Si/Si_{1-x}Ge_x/Ge/GaAs$.

2) Подавляется неконтролируемое легирование КТ примесью Si из окружающей матрицы.

3) Изготовление структур осуществляется на обычных установках МЛЭ и не требует разработки специальных ростовых камер, имеющих молекулярные источники как для выращивания слоев соединений $A^{III}B^V$, так и слоев $Si_{1-x}Ge_x$.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 01-02-17732, № 00-02-16470), Научно-технических программ „Физика твердотельных наноструктур“ (проекты № 97-1050, № 2000-2Ф) и „Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники“ (проект № 1), а также Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант № 00-15-96568).

Список литературы

- [1] G.E. Cirlin, V.N. Petrov, V.G. Dubrovsky, S.A. Masalov, A.O. Golubok, N.I. Komyak, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *Techn. Phys. Lett.*, **24**, 10 (1998).
- [2] H. Chen, L.W. Guo, Q. Cui, Q. Hu, Q. Huang, J.M. Zhou. *J. Appl. Phys.*, **79**, 1167 (1996).
- [3] C.S. Peng, Z.Y. Zhao, H. Chen, J.H. Li, Y.K. Li, L.W. Guo, D.Y. Dai, Q. Huang, J.M. Zhou, Y.H. Zhang, T.T. Sheng, C.H. Tung. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3160 (1998).
- [4] J.M. Gerard, J.B. Genin, J. Lefebvre, J.M. Moison, N. Lebouche, F. Barthe. *J. Cryst. Growth*, **150**, 351 (1995).
- [5] D.I. Lubyshchev, P.P. Gonzalez-Borrero, E. Marega, jr., E. Petitprez, P. Basmaji. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 2212 (1996).
- [6] K. Kamath, J. Phillips, J. Singh, P. Bhattacharya. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 2312 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

Room temperature photoluminescence ($\lambda = 1.3 \mu m$) of InGaAs quantum dots on Si(001) substrate

T.M. Burbaev, I.P. Kazakov, V.A. Kurbatov, M.M. Rzaev, V.A. Tsvetkov, V.I. Tsekhosh

P.N. Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract A heterostructure with GaAs/ $In_xGa_{1-x}As$ quantum dots has exhibited intense photoluminescence in the range of $1.3 \mu m$ at room temperature. It was grown on Si(001) substrate with $Si_{1-x}Ge_x$ buffer layer. The growth process was performed consecutively in two molecular beam epitaxy systems with overloading through out the atmosphere. High energy electron diffraction investigations are presented.