ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

С учетом особенностей, рассмотренных выше, на языке C++ разработана программа конструирования молекул и программа моделирования с визуализацией (рис. 1), использующая специально созданный класс. Этот класс, наряду отмеченными возможностями, может быть расширен введением потенциала электромагнитного взаимодействия и заряда атома, а также добавлением возможности задать внешнее потенциальное поле путем введения различных вариантов граничных условий.

Литература

- 1. Гулд Х., Табочник Я., Компьютерное моделирование в физике. М., 1990.
- 2. Rapaport D.C., The art of molecular dynamics simulation. Cambridge, 2004.
- Лисица Е.В. Особенности реализации метода молекулярной динамики //Тез. докл. XVI Респ. науч. конф. асп., маг. и студ. «Физика конденсированного состояния», 23 – 25 апреля 2008 г. Гродно, Республика Беларусь. С 69 – 70.
- 4. *Лисица Е.В.* Моделирование идеальной жидкости методом молекулярной динамики // Сб. работ 65-й науч. конф. студ. и асп. БГУ. В 3 ч. Ч. 1. Минск: Изд. Цент БГУ, 2008. С176–179.
- 5. Жишко Ю.П., Асташкин А.В., Лисица Е.В., Лутковский В.М. Программные средства для реализации метода молекулярной динамики // Сб. работ 66-й научной конференции студентов и аспирантов БГУ. В 3 ч. Ч. 1. Минск: Изд. Цент БГУ, 2010.С.202–205.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ InAs И GaSb В ИОННОИМПЛАНТИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Ф. Ф. Комаров, Л. А. Власукова, О. В. Мильчанин, М. В. Гребень, О. В. Бабаченок, М. А. Моховиков

введение

В настоящий момент наблюдается интенсивный рост спроса на рынке оборудования для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Преимущества использования в ВОЛС окон прозрачности вблизи длин волн 1.3 мкм и 1.55 мкм обусловливают необходимость создания эффективных и недорогих источников и усилителей когерентного излучения диапазона 1.3–1.55 мкм. Сейчас в качестве излучателей в этом диапазоне длин волн используются главным образом лазеры на основе InGaAsP/InP, которые имеют ряд существенных недостатков, такие как: трудности при создании вертикально-излучающих лазеров, высокая стоимость и др.. В данной работе предложен метод синтеза прямозонных полупроводников А³В⁵ в кристаллической матрице кремния [1]. Наблюдаемая полоса в спектрах фото-

люминесценции образцов в диапазоне длин волн 1,15–1,5 мкм с максимумом при 1,3 мкм позволяет говорить о потенциальной возможности создания светоизлучающего источника, работающего на квантовых точках, для систем оптоволоконной связи.

методика

Для создания слоев с нанокристаллами образцы, вырезанные из подложек Si (100) п-типа и Si (111) р-типа, имплантировались сначала ионами пятой (As или Sb), а затем ионами третьей (In или Ga) группы Периодической системы элементов при температурах 25°С и 500°С. Энергии и дозы ионов изменялись, соответственно, в диапазонах (170-350) кэВ и (2,8-5)×10¹⁶ см⁻². Затем проводился отжиг в инертной среде в интервале температур (600-1050)°С в печи сопротивления или в установке быстрого термического отжига (БТО) «jetFirst». Часть образцов после внедрения «кластерообразующих» примесей дополнительно имплантировалась ионами H_2^+ с энергией 100 кэВ дозой, составляющей $1,2 \times 10^{16}$ см⁻² в пересчете на атомарный водород. Эта процедура проводилась для создания на глубине около 500 нм внутреннего геттера во время последующего отжига. Распределение внедренных примесей в образцах контролировалось методом Резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия с энергиями E = 1,3 МэВ и E = 1,5 МэВ. Структурно-фазовые превращения исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе Hitachi H-800 с ускоряющим напряжением 200 кэВ в геометрии «plan-view». Оптические свойства имплантированных образцов исследовались методом низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены профили распределения примеси по глубине исследуемых образцов. Из рисунка можно заметить, что высокотемпературный отжиг приводит к существенному перераспределению примеси к поверхности и вглубь кристалла.

Для атомов In граница кристалл–вакуум является прозрачной, а для атомов As – полупрозрачной, что приводит к потере примеси. На рис. 1 можно заметить, что наличие геттера приводит к увеличению потерь атомов As и значительному уменьшению потерь атомов In.

На рис. 2 приведены результаты исследования структуры образцов кремния с (As+In) и (Ga+Sb), полученные методом ПЭМ. Можно отчетливо видеть сформированные преципитаты в матрице Si, распределение по

размерам которых приведены на соответствующих гистограммах в правом верхнем углу каждого снимка. На рис. 2,А в левом верхнем углу приведено изображение кластера в высоком разрешении. На нем виден муаровый контраст на кластерах, вызванный наложением двух кристаллических решеток с близкими параметрами, что свидетельствует об их кристаллической природе.



Рис. 1. Глубинные профили распределения примеси для образцов Si <100>, имлантированных ионами As (170 кэВ, $3,2\cdot10^{16}$ см⁻²) и In (250 кэВ, $2,8\cdot10^{16}$ см⁻²) при $T_{imp}=25$ °C (1 – As, 2 – In) и оттоженных сначала при 600 °C 20 мин, а затем при 1050 °C 3мин с геттерным слоем H⁺ (3 – As, 4 – In) и без него (5 – As, 6 – In)



Рис. 2. Сетлопольные ПЭМ микрофотографии поверхностных слоев кремния после имплантации: А – ионов As (170 кэВ, $3,2\cdot10^{16}$ см⁻²) и In (250 кэВ, $2,8\cdot10^{16}$ см⁻²) при $T_{imp}=25$ °C и последующего БТО при 950 °C 3 мин, Б – ионов Ga (250кэВ, 5×10^{16} см⁻²) и Sb (350кэВ, 5×10^{16} см⁻²) при $T_{imp}=500$ °C и последующего отжига при 900 °C 45 мин (фотография получена после удаления слоя 190 нм с поверхности от образца)



Рис. 3. Снятые при 4,2 К спектры ФЛ образцов Si, имплантированных ионами As (170 кэВ, $3,2\cdot10^{16}$ см⁻²) и In (250 кэВ, $2,8\cdot10^{16}$ см⁻²) при $T_{imp}=25^{\circ}$ C (2 и 4) и при $T_{imp}=500^{\circ}$ C (1 и 3) и отожженных в различных режимах БТО: 1,2 – при 950°C 3 мин; 3,4 – при 1050°C 3 мин

Для идентифицикации преципитатов в Si (As+In) были рассчитаны расстояния между полосами муара для кристаллитов In, As и InAs, формирование которых возможно в условиях нашего эксперимент. Была получена хорошая корреляция рассчитанного и экспериментально измеренного расстояния между полосами муара для InAs. Следовательно, наблюдаемые преципитаты являются включениями InAs в Si. Те же самые выводы справедливы и в случае нанокристаллов GaSb в Si.

На рисунках 3 и 4 приведены спектры ФЛ образцов, имплантированных при $T_{imp}=25^{\circ}$ С и $T_{imp}=500^{\circ}$ С ионами As + In и Ga + Sb и отожженных при различных температурах. Можно выделить общую тенденцию для спектров всех образцов, а именно – наличие узкой линии эмиссии экситонов в кремнии при $\lambda \sim 1,15$ мкм (~ 1,1 эВ на рис. 4) и широкой полосы в области $\lambda \sim 1,15 - 1,50$ мкм (~ 0,8 – 1,1 эВ на рис. 4), которую можно связать с системой формируемых кластеров.

Таким образом, в данной работе изучено влияние различных режимов имплантации и последующего отжига на процессы ионно-лучевого синтеза нанокристаллов InAs и GaSb в кремнии. Установлено, что дополнительная имплантация ионов водорода для формирования в процессе пост-имплантационного отжига геттерирующего слоя позволяет существенно сократить потери примеси атомов III группы Периодической системы. Для всех образцов в спектрах ФЛ регистрируется широкая полоса в спектральной области $\lambda \sim 1,15 - 1,50$ мкм (~ 0,8 – 1,1 эВ).



Рис. 4. Снятые при 4,2 К спектры ФЛ образцов Si, имплантированных ионами Ga (250кэВ, 5×10¹⁶ см⁻²) и Sb (350кэВ, 5×10¹⁶ см⁻²) при T_{imp}=500°C и отожженных при 700°C, 45 мин + 1100°C, 60 мин + 900°C, (30 с – 3, 45 мин – 4), а также при 900°C, (30 с – 1, 45 мин – 2)

Литература

1. Komarov F., Vlasukova L., Wesch W., Kamarov A., Milchanin O., Grechnyi S., Mudryi A., Ivaniukovich A. Nucl. Instrum. Meth. V.266 P.3557 (2008).

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Е. В. Лисица, Н. Н. Яцков

введение

В основе большинства методов исследований изображений срезов тканей и клеток лежит метод люминесцентной микроскопии. В структуре клетки, цитоплазме или ядре, находится люминесцирующий на определенной длине волны биомаркер – белок связанный с изучаемым биологическим процессом. После возбуждения биомаркера регистрируется его интенсивность в цитоплазме и ядрах. Существующее программное обеспечение (CellProfiler, ImageJ) основано на стандартных методах сегментации изображений биологических микрообъектов, что имеет ряд недостатков: требует навыков программирования; владение теоретическими знаниями о работе используемых методов – что значительно усложняет работу пользователя.