

Свойства нанокристаллов Ge, сформированных имплантацией ионов Ge^+ в пленки SiO_2 и последующим отжигом под гидростатическим давлением

© И.Е. Тыщенко[¶], А.Б. Талочкин, А.Г. Черков, К.С. Журавлев, А. Мисюк*, М. Фельсков⁺, В. Скорупа⁺

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

* Институт электронной технологии,
02-668 Варшава, Польша

⁺ Институт ионно-лучевой физики и материаловедения, Исследовательский центр Росседорф,
Д-01314 Дрезден, Германия

(Получена 22 июля 2002 г. Принята к печати 6 сентября 2002 г.)

Изучено влияние гидростатического сжатия на процессы ионного синтеза нанокристаллов германия в SiO_2 . Обнаружено замедление диффузии атомов Ge в SiO_2 при высокотемпературном отжиге под давлением. Показано, что при обычном отжиге формируются ненапряженные нанокристаллы Ge. Отжиг под давлением сопровождается формированием гидростатически напряженных нанокристаллов Ge. По сдвигу частоты оптических фононов в спектрах комбинационного рассеяния света определена величина деформации нанокристаллов Ge. Наблюдаемый в нанокристаллах сдвиг энергии резонанса комбинационного рассеяния света $E_1, E_1 + \Delta_1$ соответствует квантованию энергии основного состояния двумерного экситона критической точки германия M_1 . Установлено, что полоса фотолюминесценции 520 нм формируется лишь в спектрах пленок, содержащих напряженные нанокристаллы Ge.

1. Введение

Теоретические расчеты [1] предсказывают достаточно большие значения ширины запрещенной зоны нанокристаллов германия (nc-Ge). Кроме того, близость энергий минимумов прямых и непрямых переходов должна обеспечивать короткие времена излучательной рекомбинации электронов и дырок в nc-Ge [1,2]. Это явилось причиной повышенного интереса к созданию и изучению свойств nc-Ge, материала, излучающего в видимой области спектра эмиссии и способного конкурировать с прямозонными полупроводниками (например, GaAs, AlGaAs). Однако квантовые точки Ge, традиционно создаваемые методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [3], являются сильно напряженными. Причем напряжения в них распределены неоднородно. Неоднородные напряжения могут привести к сложным, трудно предсказуемым смещениям спектра электронных состояний nc-Ge [4]. Это может быть одной из причин отсутствия фотолюминесценции (ФЛ) в видимом спектральном диапазоне от квантовых точек Ge, выращенных МЛЭ. ФЛ в зелено-желтой (520–580 нм) области спектра наблюдали от пленок SiO_2 , содержащих нанокристаллы германия [5–9]. Однако до сих пор нет четких представлений в определении природы этой полосы ФЛ. Противоречия в определении механизма ФЛ в основном обусловлены отсутствием корреляций между размерами nc-Ge и положением максимума ФЛ. С другой стороны, достаточно противоречивы мнения и относительно роли границы раздела между nc-Ge и окружающей матрицей диоксида кремния в процессах

излучательной рекомбинации [2,8,9]. Одним из методов управления электронными и структурными свойствами nc-Ge может быть гидростатическое сжатие. В основном гидростатическое сжатие используется как эффективный инструмент исследования зонного спектра полупроводников, в том числе и nano-объектов Si и Ge. С другой стороны, в литературе есть указание на то, что использование гидростатического сжатия в процессе высокотемпературного отжига [10] сопровождается замедлением диффузионных процессов, что может приводить к формированию более высокой плотности объектов новой фазы с более мелкими размерами. В наших ранних исследованиях [11,12] было обнаружено усиление коротковолновой ФЛ после отжига под давлением пленок SiO_2 и SiO_xN_y , имплантированных ионами Si^+ и Ge^+ , которое связывалось с ускоренным формированием центров $\equiv \text{Si} - \text{Si} \equiv$, $\equiv \text{Ge} - \text{Si} \equiv$ и $\equiv \text{Ge} - \text{Ge} \equiv$. В данной работе мы впервые использовали гидростатическое давление как параметр ионного синтеза с целью создания однородно напряженных нанокристаллов Ge в матрице SiO_2 , стабильных при комнатной температуре. Цель данной работы — исследование свойств nc-Ge, формирующихся в имплантированных ионами Ge^+ пленках SiO_2 при отжиге в условиях гидростатического сжатия.

2. Методика эксперимента

Нанокристаллы Ge были сформированы в пленках SiO_2 толщиной 500 нм, термически выращенных на пластинах Si *n*-типа, с удельным сопротивлением 5–10 Ом·см, с ориентацией (100). Сначала пленки окисла были имплантированы ионами Ge^+ с энергией 450 кэВ, затем с энергией 200 кэВ, соответству-

[¶] E-mail: tys@isp.nsc.ru
Fax: (383) 233 27 71

ющими дозами $1.1 \cdot 10^{15}$ и $6.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (0.1 ат% Ge), $6.6 \cdot 10^{15}$ и $4.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (0.67 ат% Ge), $3.0 \cdot 10^{16}$ и $1.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (3 ат% Ge). Использованные энергии и дозы ионов позволяли сформировать профиль Ge на глубине $\sim 0.1\text{--}0.35$ мкм. В процессе имплантации плотность ионного тока составляла $0.5\text{--}1$ мкА/см², а температура мишени была около $120\text{--}130$ К. После имплантации образцы отжигались при температурах $T_a = 600$ и 1130°C в течение 5 ч в атмосфере Ar. Отжиг проводился в печи высокого давления при гидростатическом сжатии $P = 12$ кбар, а также в печи при атмосферном давлении. Исследование профилей распределения внедренного Ge исследовалось методом резерфордовского обратного рассеяния (RBS) ионов He^+ с энергией 1.5 МэВ. Идентификация сформированных нанокристаллов Ge проводилась методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), высокоразрешающей электронной микроскопии (HRTEM) и фотолюминесценции (ФЛ). Измерения КРС проводились с помощью спектрометра ДФС-52 и возбуждались линией Ar-лазера 488 нм в геометрии обратного рассеяния. Резонансные зависимости КРС исследовались при возбуждении излучением Ar-лазера с длинами волн 457, 476, 488, 496 и 514 нм. Исследования HRTEM проводились на микроскопе JEM-4000 EX с разрешением 0.2 нм при ускоряющем напряжении 250 кВ. ФЛ в интервале длин волн $\lambda_{\text{эм}} = 340\text{--}850$ нм возбуждалась излучением N_2 -лазера с длиной волны $\lambda_{\text{ex}} = 337$ нм и мощностью 10 мВт. Все измерения проводились при комнатной температуре.

3. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены профили распределения атомов Ge, полученные из анализа спектров RBS, для образцов, имплантированных большими дозами Ge^+ и отожженных при $T_a = 1130^\circ\text{C}$ как при атмосферном давлении, так и при $P = 12$ кбар. Отжиг в условиях гидростатического сжатия не приводил к перераспределению германия внутри пленки SiO_2 . В этом случае профили Ge от неотожженного и отожженного под давлением образцов совпадали. Обычный отжиг при $P = 1$ бар сопровождался стоком части Ge к поверхности SiO_2 . Часть имплантированного Ge оставалась в слое на глубине $\sim 150\text{--}300$ нм, причем в концентрации, равной той, которая была в исходном слое. Заметим также, что часть германия также стягивается с глубины в захороненный слой $150\text{--}300$ нм, что может быть связано с процессом зарождения и последующего роста преципитатов германия.

Сведения о структуре формируемых nc-Ge могут быть получены из формы и положения пиков в спектре КРС на оптических фонах. Отжиг под давлением при $T_a = 600^\circ\text{C}$ приводит к формированию широкого пика в спектрах КРС с максимумом около 300 см^{-1} .

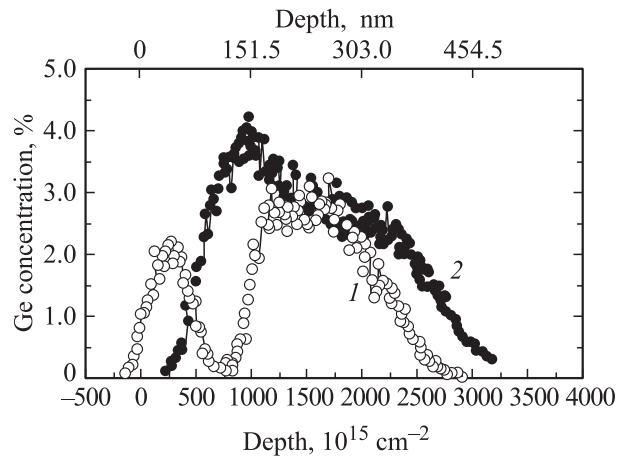


Рис. 1. Профили распределения атомов Ge, полученные методом RBS от пленок SiO_2 , содержащих 3 ат% Ge и отожженных при $T_a = 1130^\circ\text{C}$ и давлениях 1 бар (1) и 12 кбар (2).

Ширина на полувысоте этого пика составляла около 30 см^{-1} , что указывает на его связь с колебаниями связей Ge–Ge в неупорядоченной матрице. На рис. 2 представлены спектры КРС от пленок SiO_2 , с содержанием 0.1, 0.67 и 3 ат% Ge и отожженных при $T_a = 1130^\circ\text{C}$ и $P = 12$ кбар. В пленках с низким содержанием Ge (0.1%) также формируется пик вблизи 300 см^{-1} , полная ширина на полувысоте которого составляет около 15 см^{-1} . Увеличение содержания Ge до 0.67% сопровождается дальнейшим уменьшением ширины пика 300 см^{-1} до значения $\sim 10 \text{ см}^{-1}$, а также появлением слабоинтенсивного узкого пика с максимумом около 307 см^{-1} . В спектрах КРС от пленок, содержащих 3% Ge, пик $\sim 307 \text{ см}^{-1}$ становится доминирующим. Его интенсивность возрастает более чем в 2 раза. Полная ширина этого пика на полувысоте составляет около 4.5 см^{-1} . Вблизи 300 см^{-1} также наблюдается слабо выраженный максимум, интенсивность которого уменьшается по сравнению с интенсивностью пика, наблюдаемого от образцов, содержащих 0.67 ат% Ge. Природа пика 300 см^{-1} может быть связана как с изолированными связями Ge–Ge, встроенными в SiO_2 в различных положениях, так и с аморфными кластерами Ge. В пользу формирования таких кластеров говорит сужение пика по сравнению с образцами, отожженными при 600°C . Для сравнения на рис. 2 приведен спектр от образца с содержанием 3 ат% Ge после отжига при $T_a = 1130^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении. В этом случае в спектрах КРС наблюдается пик Ge с объемным значением частоты (300 см^{-1}), а спектр аморфной компоненты практически отсутствует. Высокочастотный сдвиг спектра оптических фононов (кривая 3) указывает на наличие механических напряжений, сжимающих nc-Ge. Эти напряжения имеют гидростатический характер, поскольку не наблюдается расщепление фоновой линии на поперечную и продольную моды. Величина этих

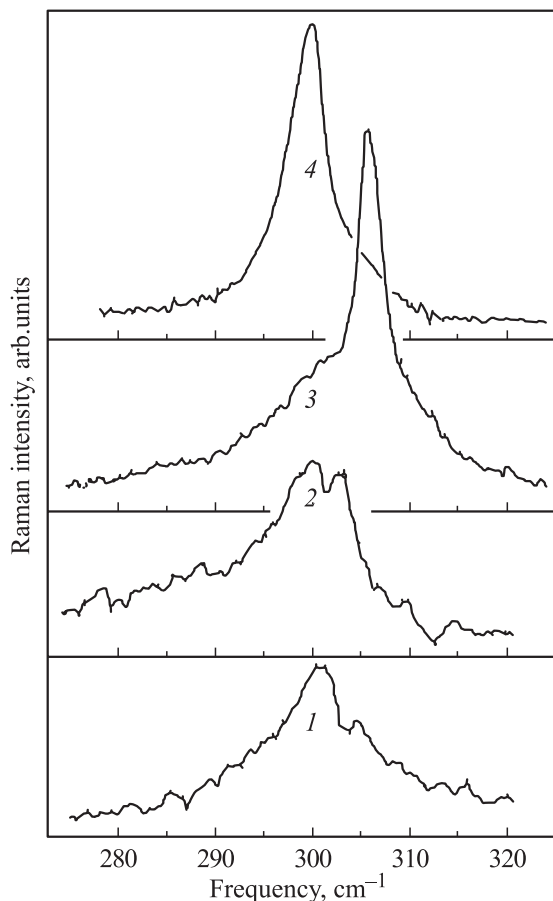


Рис. 2. Спектры КРС пленок SiO₂, содержащих 0.1 (1), 0.67 (2) и 3 (3, 4) ат % Ge и отожженных при $T_a = 1130^\circ\text{C}$ под давлением 12 кбар (1–3) и 1 бар (4). Длина волны возбуждающего излучения 448 нм.

напряжений может быть оценена по сдвигу частоты моды Ge–Ge в кристаллическом Ge:

$$\gamma = (B/\omega_0)(d\omega_0/dP), \quad (1)$$

где γ — параметр Грюнайзена, B — объемный модуль Ge ($B = 750$ кбар [13]), $d\omega_0$ — сдвиг частоты $\omega_0 \approx 300 \text{ см}^{-1}$ с изменением гидростатического давления dP . Параметр Грюнайзена γ для Ge–Ge-колебаний в объемном Ge был найден равным 0.89 [14]. Подстановка приведенных численных значений в выражение (1) дает величину гидростатических напряжений связи Ge–Ge в пс-Ge порядка 19.7 кбар. Данные о размере пс-Ge могут быть получены из резонансных зависимостей КРС на оптических Ge–Ge-фононах. На рис. 3 представлены такие зависимости для пс-Ge, сформированных в результате отжига (при $P = 1$ бар и 12 кбар) пленок, содержащих 3 ат % Ge, а также для объемного Ge. Стрелками указаны значения энергий E_1 и $E_1 + \Delta_1$ экситона в объемном Ge [15]. Голубой сдвиг энергии E_1 , $E_1 + \Delta_1$ резонанса КРС в пс-Ge соответствует квантованию энергии основного состояния двумерного экситона критической точки M_1 германия. При этом видно, что ширина резонанса в пс-Ge, сформированных при $P = 12$ кбар,

больше, чем после отжига при $P = 1$ бар. Это говорит о более неоднородном их распределении по размерам. Меньшие голубые смещения перехода E_1 свидетельствуют о более крупных средних размерах пс-Ge при $P = 12$ кбар. В Ge эффективные массы электронов и дырок, вовлеченных в переход E_1 , сильно различаются в направлениях, перпендикулярном и параллельном направлению Λ . Это означает, что экситон E_1 можно рассматривать как двумерно-ограниченную частицу. Для расчетов размеров пс-Ge мы воспользовались выражением, полученным в приближении эффективной массы для энергии двумерно-ограниченного экситона E_1 [16]. Для ненапряженных пс-Ge величина энергии квантового ограничения составила $E_c = 0.3$ эВ, что, согласно расчетам, соответствует величине радиуса пс-Ge $\sim (3.5 \pm 0.2)$ нм. При оценке параметров напряженных пс-Ge необходимо учитывать увеличение энергии экситона E_1 на величину деформационного сдвига уровней $E_{\text{stress}} = \alpha P$, где $\alpha = 7.5 \cdot 10^{-3}$ эВ/кбар [17] — коэффициент давления переходов E_1 , $E_1 + \Delta_1$, $P = 19.7$ кбар. Отсюда $E_{\text{stress}} \approx 0.15$ эВ. Вычитая эту энергию из величины сдвига резонанса, мы найдем значение $E_c = 0.09$ эВ, что соответствует пс-Ge с радиусом около (5.7 ± 0.4) нм. Чтобы проверить достоверность сделанных нами оценок параметров нанокристаллов, мы провели исследование свойств сформированных нами структур методом HRTEM. Никаких признаков формирования нанокластеров или нанокристаллов Ge не было обнаружено после отжига при $T_a = 600^\circ\text{C}$. После отжига при 1130°C пленок, содержащих 0.1 ат % Ge, происходило лишь образование нанокластеров, не имеющих кристаллической структуры. Максимум их распределения по размерам соответствовал радиусу ~ 2 нм. Нанокристаллы Ge формировались лишь в пленках, содержащих более или порядка 0.67 ат % Ge. В случае 0.67 ат % Ge средние

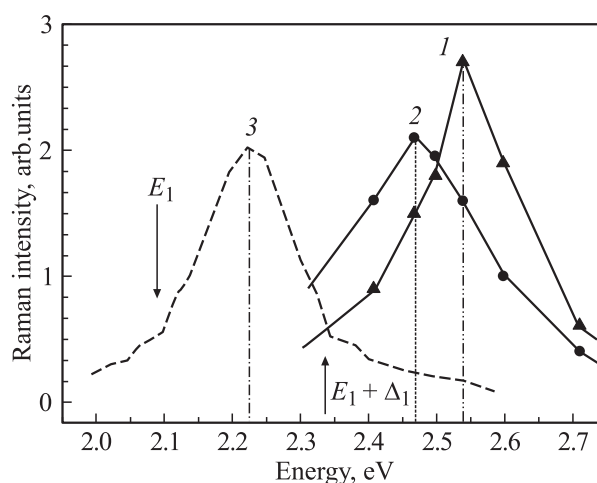


Рис. 3. Резонансные зависимости КРС на оптических Ge–Ge-фононах в пс-Ge, сформированных в результате отжига при $P = 1$ бар (1) и 12 кбар (2) пленок SiO₂, содержащих 3 ат % Ge, а также в объемном Ge (3). Стрелками указаны значения энергий экситона E_1 и $E_1 + \Delta_1$ в объемном Ge.

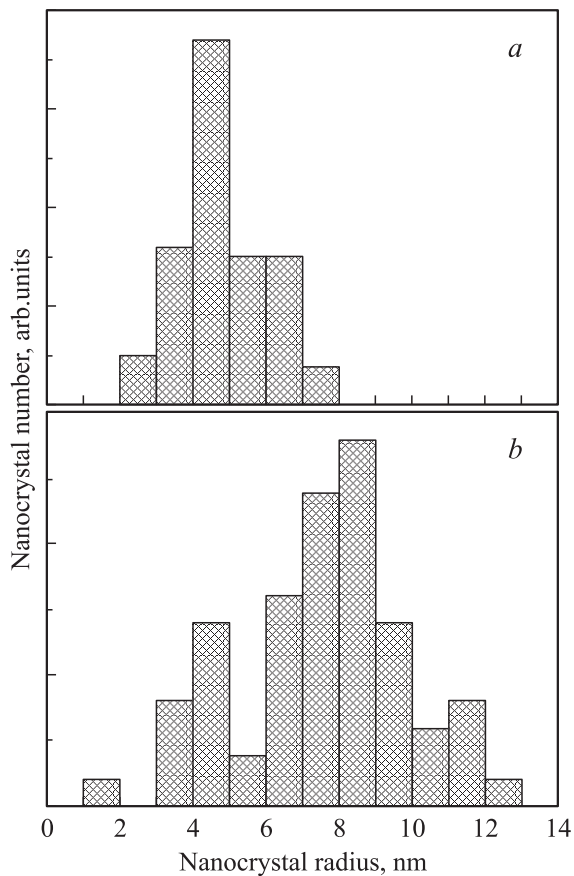


Рис. 4. Распределения нанокристаллов по размерам, полученные из статистической обработки данных HRTEM пленок SiO_2 , содержащих 3 ат% Ge и отожженных при $T_a = 1130^\circ\text{C}$ и давлении $P = 1$ бар (a) и 12 кбар (b).

радиусы нанокристаллов составляли ~ 6.2 нм. На рис. 4 представлены их распределения по размерам для случаев содержания 3 ат% Ge после отжига при $T_a = 1130^\circ\text{C}$ и при давлениях $P = 1$ бар и 12 кбар. Их средние радиусы составляли $\sim (4.5 \pm 0.2)$ нм и $\sim (7.4 \pm 0.4)$ нм соответственно. Эти значения лишь на 20–25% отличаются от значений, полученных из резонансных зависимостей КРС. В условиях наших экспериментов мы находим такое совпадение весьма удовлетворительным. В случае отжига при $P = 1$ бар распределение пс-Ge по размерам было значительно уже, чем после отжига под давлением. Значения рассчитанных межплоскостных расстояний соответствовали расстояниям в алмазоподобной решетке объемного Ge. Важно отметить, что пс-Ge наблюдались лишь на глубинах более 120 нм. В приповерхностном слое, куда Ge стекал при отжиге, нанокристаллы обнаружены не были.

На рис. 5 представлены спектры ФЛ образцов, содержащих 0.67 и 3 ат% Ge и отожженных при $T_a = 600$ и 1130°C под давлениями 1 бар и 12 кбар. В случае обычного отжига в спектре ФЛ доминирует пик с максимумом 396 нм. Второй, менее интенсивный пик, имеет максимум вблизи 460 нм. В литературе [18] природа

этих пиков объясняется рекомбинацией электронов и дырок на нейтральных вакансиях кислорода в центрах $\equiv \text{Ge}-\text{Si} \equiv$ и $\equiv \text{Si}-\text{Si} \equiv$ соответственно. После отжига при $T_a = 600^\circ\text{C}$ и $P = 12$ кбар также формируется широкий пик большой интенсивности в фиолетово-голубой области спектра. Повышение T_a до 1130°C при $P = 12$ кбар сопровождалось красным смещением спектра ФЛ. При этом решающим фактором в формировании пиков ФЛ являлась концентрация внедренного Ge. Никакой ФЛ в видимом диапазоне не было обнаружено от образцов, содержащих 0.1 ат% Ge. В спектрах ФЛ образцов, содержащих 0.67 ат% Ge, доминирует пик в голубой части спектра (около 427 нм), а в зеленой области спектра формируется плечо с меньшей интенсивностью (рис. 5). Дальнейшее увеличение концентрации Ge до 3% приводит к усилению интенсивности зеленого пика ФЛ (~ 520 нм) в ~ 4 раза, а интенсивность пика голубой ФЛ увеличивается незначительно.

Анализ полученных данных показывает, что гидростатическое сжатие, с одной стороны, препятствует стоку Ge на поверхность, а с другой — способствует формированию нанокристаллов с большими размерами и с более широким их распределением по размерам. Из сравнения спектров 3 и 4 на рис. 2 видно, что

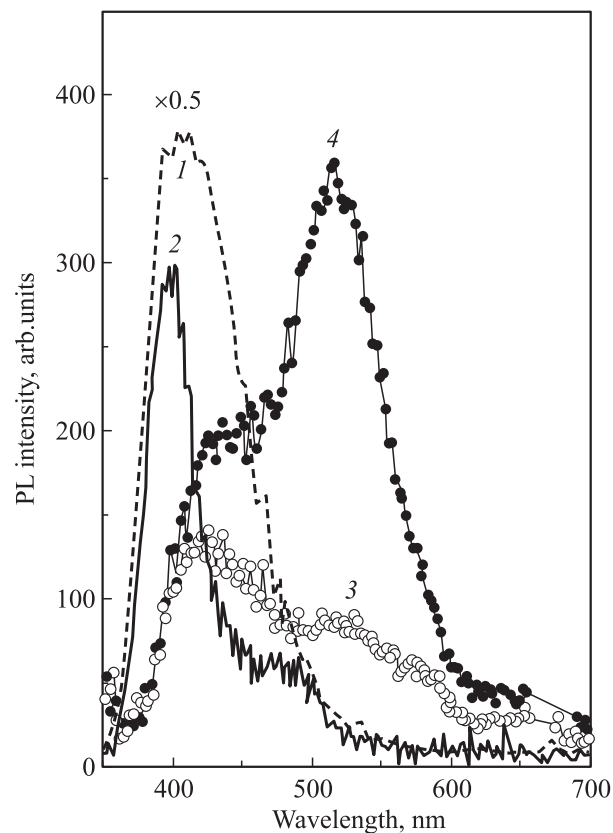


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции пленок SiO_2 , содержащих 0.67 ат% (3) и 3 ат% (1, 2, 4) германия и отожженных при $T_a = 600$ (1) и 1130°C (2, 3, 4) под давлениями 1 бар (2) и 12 кбар (1, 3, 4). Длина волны возбуждающего излучения 337 нм.

при обычном отжиге аморфная компонента Ge в спектре КРС практически отсутствует, а наблюдается лишь интенсивный пик, соответствующий кристаллическому состоянию Ge. Это говорит о том, что в данном случае формирование nc-Ge происходит за счет стягивания атомов германия в нанокластеры и последующего их перехода в кристаллическое состояние. При высокотемпературном отжиге под давлением наряду со спектром напряженной кристаллической фазы Ge сохраняется также и спектр аморфной компоненты германия. Это может быть связано, во-первых, с переходной областью между nc-Ge и окружающей матрицей диоксида кремния. Однако уменьшение интенсивности пика 300 см^{-1} с увеличением концентрации нанокристаллов противоречит этому предположению. Вторая причина может быть связана с наличием некристаллических кластеров Ge. Это означает, что под давлением переход Ge из аморфной фазы в кристаллическую замедлен. Сравнение данных HRTEM, RBS и КРС может свидетельствовать о замедлении процесса зародышеобразования кристаллической фазы Ge в условиях отжига под давлением. Это приводит к широкому распределению nc-Ge по размерам. Кроме того, разница модулей упругости Ge и SiO₂ способствует быстрому восстановлению (с меньшими энергиями активации) матрицы диоксида кремния в условиях сжатия. Избыточные атомы германия при этом выталкиваются из матрицы и могут ускоренно сегрегировать на зародышах фазы кристаллического Ge. Таким образом, процесс роста nc-Ge под давлением может быть ускоренным по сравнению с обычным отжигом. Интересно, что свойства сформированных нами нанокристаллов Ge с напряженными связями Ge–Ge достаточно удовлетворительно описываются с использованием параметров объемного Ge: постоянной Грюнайтзена и объемного модуля упругости. Ранее было найдено, что квантовые точки Ge, сформированные методом молекулярно-лучевой эпитаксии в кремнии, описываются меньшими значениями указанных параметров по сравнению с объемным германием [13]. Различия величин γ и B , полученных в наших экспериментах и в работе [13], связаны скорее всего с различием упругих свойств матриц, окружающих nc-Ge. Так, Si имеет большие значения объемного модуля (970 кбар), чем Ge (750 кбар). Это означает, что значения γ и B , полученные авторами работы [13], являются характеристикой не nc-Ge, а лишь эффективными значениями, характеризующими систему „nc-Ge–кремний“. В наших экспериментах окружающая nc-Ge матрица SiO₂ имеет объемный модуль, более чем в 2 раза меньший (370 кбар), чем Ge. Таким образом, матрица не оказывает сжимающего влияния на формирующиеся под давлением nc-Ge. Следовательно, полученные в наших экспериментах константы γ и B являются именно характеристикой nc-Ge и не отличаются от параметров объемного материала.

Наблюдаемая нами ФЛ вблизи 520 нм регистрировалась и ранее в пленках SiO₂ с большим содержанием Ge (от 5 [8] до 46 ат% [2]). Как уже было сказано во

Введении, происхождение этой полосы ФЛ до сих пор вызывает противоположные мнения исследователей. Ее происхождение часто связывают с излучательной рекомбинацией электронов и дырок в квантово-размерном nc-Ge [2,5,6]. Однако четкой корреляции между размерами нанокристаллов и положением максимума ФЛ в имеющихся данных не наблюдается. Это явилось основной причиной для поиска альтернативных источников зеленой полосы ФЛ. Например, рекомбинация электронов и дырок в квантово-размерных нанокластерах Ge с размерами менее или порядка 2 нм, не имеющих кристаллической структуры [7]. Граница раздела „nc-Ge–матрица SiO₂“ также указывается в качестве источника полосы ФЛ при $\lambda \approx 520\text{ нм}$ [8]. Хотя другая группа авторов [2,9] рассматривает границу раздела как канал безызлучательной рекомбинации электронов и дырок, генерируемых в nc-Ge. В наших экспериментах никакой ФЛ не наблюдалось от пленок SiO₂, содержащих нанокластеры с размерами $\lesssim 2\text{ нм}$, не имеющие кристаллической структуры. Появление этой полосы коррелировало с формированием напряженных nc-Ge. Поэтому правомерно предположить, что напряженные nc-Ge являются наиболее вероятным источником наблюдаемой ФЛ. Однако в наших экспериментах также отсутствует корреляция между размерами nc-Ge и положением максимума ФЛ, ожидаемая при увеличении содержания Ge от 0.67 до 3 ат%. Это может быть вызвано двумя причинами. Во-первых, с рекомбинацией генерируемых в квантово-размерном nc-Ge электронов и дырок не в объеме нанокристалла, а в переходной области между nc-Ge и матрицей SiO₂, как это было предложено авторами работ [8]. Во-вторых, нельзя полностью исключать рекомбинацию электронов и дырок в объеме квантово-размерного нанокристалла лишь на основании отсутствия сдвига максимума ФЛ с увеличением размеров nc-Ge. Надо иметь в виду, что эффективность излучательной рекомбинации пропорциональна обратной степенной функции размера нанокристалла [19]. Это означает, что основной вклад в интенсивность ФЛ дают нанокристаллы с малыми радиусами. Механизм наблюдаемой нами зеленой ФЛ требует более детальных исследований.

4. Заключение

Изучено влияние гидростатического сжатия на процессы ионного синтеза нанокристаллов германия (nc-Ge) в SiO₂. Обнаружено замедление диффузии атомов Ge в SiO₂ при высокотемпературном отжиге под давлением. Показано, что при обычном отжиге формируются ненапряженные nc-Ge. Отжиг под давлением сопровождается формированием гидростатически напряженных nc-Ge. По сдвигу частоты оптических фононов в спектрах комбинационного рассеяния света определена величина деформации нанокристаллов Ge. Наблюдаемый в nc-Ge сдвиг энергии резонанса комбинационного

рассеяния света E_1 , $E_1 + \Delta_1$ соответствует квантованию энергии основного состояния двумерного экситона критической точки M_1 германия. Установлено, что полоса фотолюминесценции 520 нм формируется лишь в спектрах пленок, содержащих напряженные nc-Ge.

Авторы благодарны L. Rebohle за помощь при проведении имплантации ионов Ge, Б.А. Колесову за помощь при исследовании резонансных спектров КРС, А.К. Гутаковскому за полезные обсуждения результатов HRTEM.

Список литературы

- [1] T. Takagahara, K. Takeda. Phys. Rev. B, **46**, 15 578 (1992).
- [2] Y. Maeda. Phys. Rev. B, **51**, 1658 (1995).
- [3] Y-W. Mo, D.E. Savage, B.S. Swartzentruber, M.G. Lagally. Phys. Rev. Lett., **65**, 1020 (1990).
- [4] M. Grundman, O. Stier, D. Bimberg. Phys. Rev. B, **52**, 11 969 (1995).
- [5] L. Yue, Y. He. J. Appl. Phys., **81**, 2910 (1997).
- [6] H.A. Atwater, K.V. Shcheglov, S.S. Wong, K.J. Vahala, R.C. Flagan, M.L. Brongersma, A. Polman. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **321**, 363 (1994).
- [7] S. Hayashi, J. Kanazawa, M. Takaoka, T. Nagareda, K. Yamamoto. Z. Phys. D, **26**, 144 (1993).
- [8] S.Y. Ma, Z.C. Ma, W.H. Zong, H.X. Han, Z.P. Wang, G.H. Li, G. Qin, G.G. Qin. J. Appl. Phys., **84**, 559 (1998).
- [9] Г.А. Качурин, Л. Ребоhlе, И.Е. Тыщенко, В.А. Володин, М. Фельсков, В. Скорупа, Х. Фрöб. ФТП, **34**, 30 (2000); G.A. Kachurin, L. Rebohle, I.E. Tyschenko, V.A. Volodin, M. Voelskow, W. Skorupa, H. Fröb. Semiconductors, **34**, 23 (2000).
- [10] I.V. Antonova, A. Misiuk, V.P. Popov, L.I. Fedina, S.S. Shaimeev. Physica B, **255**, 251 (1996).
- [11] I.E. Tyschenko, L. Rebohle, R.A. Yankov, W. Skorupa, A. Misiuk. Appl. Phys. Lett., **73**, 1418 (1998).
- [12] I.E. Tyschenko, K.S. Zhuravlev, E.N. Vandyshev, A. Misiuk, L. Rebohle, W. Skorupa, R.A. Yankov, V.P. Popov. Optical Materials, **17**, 99 (2001).
- [13] L. Quin, K.L. Teo, Z.X. Shen, C.S. Peng, J.M. Zhou. Phys. Rev. B, **64**, 075312-1 (2001).
- [14] F. Cerdeira, C.J. Buchenauer, F.H. Pollak, M. Cardona. Phys. Rev. B, **5**, 580 (1972).
- [15] M.A. Renucci, J.B. Renucci, R. Zeyher, M. Cardona. Phys. Rev. B, **10**, 4309 (1974).
- [16] K.L. Teo, S.N. Kwok, P.Y. Yu, S. Guha. Phys. Rev. B, **62**, 1584 (2000).
- [17] R. Zallen, W. Paul. Phys. Rev., **155**, 703 (1967).
- [18] L. Rebohle, J. von Borany, R.A. Yankov, W. Skorupa, I.E. Tyschenko, H. Fröb, K. Leo. Appl. Phys. Lett., **71**, 2809 (1997).
- [19] G.C. John, V.A. Singh. Phys. Rev. B, **50**, 5329 (1994).

Редактор Т.А. Полянская

The properties of Ge nanocrystals formed by ion implantation of Ge⁺ ions into SiO₂ films and subsequent annealing under hydrostatic pressure

I.E. Tyschenko, A.B. Talochkin, A.G. Cherkov, K.S. Zhuravlev, A. Misiuk*, M. Voelskow⁺, W. Skorupa⁺

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of RAS,
630090 Novosibirsk, Russia

* Institute of Electron Technology,
02-668 Warsaw, Poland

⁺ Institute of Ion Beam Physics
and Materials Research,
Research Center Rossendorf,
D-01314 Dresden, Germany

Abstract The influence of hydrostatic pressure on ion synthesis of Ge nanocrystals in SiO₂ matrix was studied. A retardation of Ge atom diffusion under conditions of high-pressure annealing was observed. It has been shown, that annealing at atmospheric pressure produces the unstressed Ge nanocrystals. In the case of high-pressure annealing, the hydrostatically stressed Ge nanocrystals have been formed. From the shift of the optical phonon frequency in Raman spectra the deformation of Ge nanocrystals is obtained. The E_1 , $E_1 + \Delta_1$ Raman resonance shift observed from the nanocrystals corresponds to the basic state quantization energy of two-dimension exciton in M_1 critical point of Ge band. It is shown that photoluminescence band of 520 nm was excited from the films containing the stressed Ge nanocrystals only.