

Особенности фотолюминесценции в структурах кремний-на-изоляторе, имплантированных ионами водорода

© И.Е. Тысченко[¶], К.С. Журавлев, А.Б. Талочкин, В.П. Попов

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

(Получена 11 июля 2005 г. Принята к печати 9 сентября 2005 г.)

Исследованы особенности спектров фотолюминесценции в имплантированных ионами водорода структурах кремний-на-изоляторе. Обнаружено увеличение интенсивности фотолюминесценции с ростом гидростатического давления P во время отжига и формирование системы узких периодических пиков фотолюминесценции в спектральном диапазоне $\sim 500\text{--}700\text{ нм}$ для структур, отожженных при $P > 6$ кбар. Показано, что появление тонкой структуры в спектре фотолюминесценции коррелирует с замедлением выхода водорода из имплантированных образцов и подавлением процесса образования микропузырей водорода в приповерхностном слое. Эти процессы способствуют формированию оптического резонатора с зеркалами, образованными границами раздела „кремний-на-изоляторе–воздух“ и „кремний-на-изоляторе– SiO_2 “, и оптически активным слоем, созданным имплантацией ионов водорода и последующим отжигом.

PACS: 78.55.Hx, 78.66.-w, 81.40.Tv, 81.60.Cp, 68.55.Ln

1. Введение

В последние годы большое внимание исследователей привлекают проблемы, связанные с созданием оптоэлектронных приборов на основе кремния. Реализация кремниевой оптоэлектроники, совместимой с имеющейся СБИС-технологией, становится возможной благодаря открытию фотолюминесценции (ФЛ) пористого кремния при комнатной температуре [1]. В связи с этим последние десять лет ознаменовались большим всплеском работ по созданию и исследованию свойств наноразмерных объектов непрямозонных полупроводников (в основном Si и Ge), люминесцирующих в видимом спектральном диапазоне при комнатной температуре [2–8]. При этом подавляющее большинство работ посвящено созданию и исследованию либо нульмерных нанокристаллов и нанокластеров в диэлектрических матрицах [2–6], либо многослойных двумерных систем (например, Ge/SiO₂ [7], *a*-Si:H/SiO₂ [8]), выращенных на монокристаллических кремниевых подложках. В последние годы также особое внимание уделяется созданию и исследованию свойств структур кремний-на-изоляторе (КНИ). КНИ-структура может быть рассмотрена как вариант оптического резонатора, который формируется между зеркалами, расположенными на поверхности КНИ-слоя и на верхней границе раздела захороненного SiO₂. С этой точки зрения КНИ-структуры могут быть эффективным инструментом модификации спектра ФЛ квантово-размерных объектов, синтезированных на их основе. Идея модифицировать спектр спонтанной эмиссии атомов путем помещения последних внутрь резонатора была реализована еще в 1946 г. Пурселем [9]. Недавние исследования оптических свойств пленок пористого кремния и квантовых проволок показали, что они могут быть существенно изменены, если

в качестве базового материала использовать не объемный кремний, а КНИ-структуры [10,11]. Так, например, было продемонстрировано 8-кратное увеличение ФЛ в инфракрасном спектральном диапазоне от квантовых проволок SiGe, выращенных на КНИ-структурах [11], по сравнению с ФЛ от соответствующих объектов на объемном Si.

В данной работе мы исследовали особенности спектра эмиссии имплантированных ионами водорода слоев кремния-на-изоляторе, излучающих в видимом диапазоне при комнатной температуре.

2. Методика экспериментов

КНИ-структуры, изготовленные методом водородного переноса [12] на подложках Si ориентации (100), с толщиной отсеченного слоя кремния 500 нм и толщиной захороненного диоксида кремния 280 нм, были имплантированы дополнительно ионами H⁺ с энергией 24 кэВ дозой $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ из ионно-плазменного источника. После имплантации образцы отжигались при температурах $T_{\text{анн}} = 200\text{--}900^\circ\text{C}$ в течение 5 ч в атмосфере Ar. Отжиг проводился как в обычных условиях при атмосферном давлении, так и в печи высокого давления при гидростатическом сжатии $P = 6$ и 12 кбар. Более подробно процесс отжига под давлением описан в работе [13]. Оптические исследования модифицированных слоев проводились методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КРС) и ФЛ. Спектры КРС измерялись в геометрии обратного рассеяния с использованием спектрометра ДФС-52. Возбуждение спектров осуществлялось излучением Ar-лазера с длиной волны 488 нм. ФЛ возбуждалась излучением N₂-лазера с длиной волны $\lambda_{\text{ex}} = 337 \text{ нм}$ и средней мощностью около 10 мВт. Все измерения проводились при комнатной температуре. Удаление слоев Si при приготовлении образцов осуществлялось анодным окислением образцов с последующим травлением в

[¶] E-mail: tys@isp.nsc.ru
Fax: 3833332771

HF. Распределение атомов водорода внутри имплантированного слоя до и после отжига изучалось методом вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS). Распыление проводилось ионами O_2^+ с энергией 10 кэВ.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены спектры ФЛ, полученные от КНИ-структур, имплантированных ионами водорода дозой $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и отожженных при температуре $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ как в условиях атмосферного давления, так и в условиях гидростатического сжатия под давлением $P = 6$ и 12 кбар. Для сравнения здесь также представлен спектр ФЛ от объемного кремния, имплантированного в тех же условиях и отожженного при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ и $P = 12$ кбар. Повышение давления во время отжига до 6 кбар приводило к увеличению интенсивности во всем исследованном интервале длин волн излучения. Дальнейшее повышение давления во время отжига до 12 кбар существенным образом изменяло форму профиля в длинноволновой области спектра. Если в голубой части спектра интенсивность ФЛ практически не изменяется, то в спектральном диапазоне $\sim 500\text{--}700$ нм формируется система острых периодических пиков с шириной на полувысоте около 0.1 эВ и энергетическим зазором между максимумами ФЛ около 0.2 эВ. Увеличение интенсивности ФЛ в пиках зависело от длины волны излучения и было максимальным при $\lambda_{\text{em}} \approx 515$ и 560 нм. Для указанных длин волн интенсивность ФЛ была соответственно в 13 и 37 раз выше по сравнению с ФЛ, наблюдаемой на данной длине волны от образца объемного Si. Представленный на рисунке спектр ФЛ от образца объемного кремния после отжига при $P = 12$ кбар близок к тому, что наблюдалось после отжига при атмосферном давлении. Заметим, что в неимплантированных структурах, отожженных под

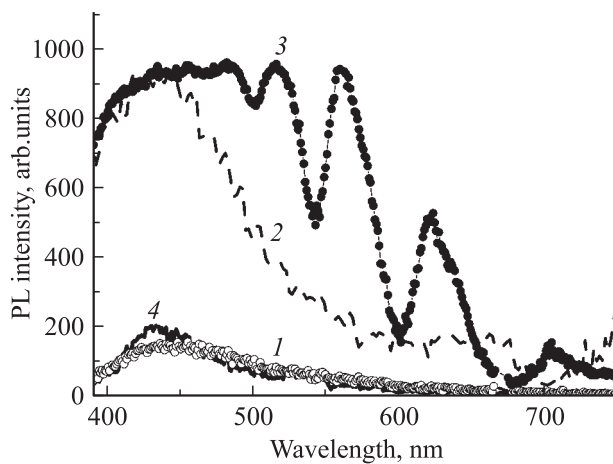


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции кремния (4) и КНИ-структур (1–3), имплантированных ионами H^+ , 24 кэВ, дозой $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ после отжига при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ в течение 5 ч под давлением $P = 1$ бар (1), 6 кбар (2) и 12 кбар (3, 4). Длина волны возбуждающего излучения 337 нм.

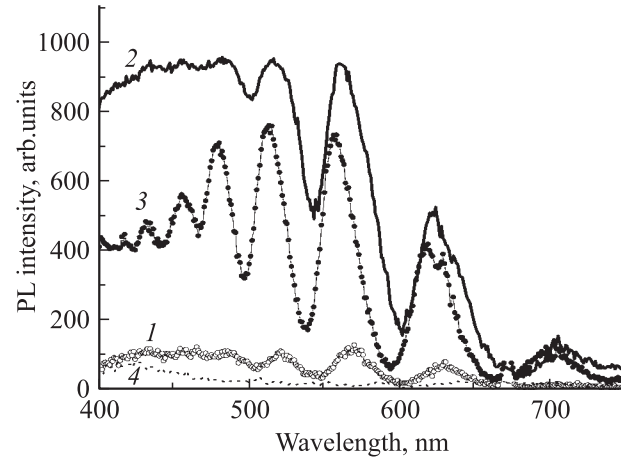


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции КНИ-структур, имплантированных ионами H^+ , 24 кэВ, дозой $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ после отжига в течение 5 ч под давлением 12 кбар при температурах отжига T_{ann} , $^\circ\text{C}$: 1 — 500, 2 — 600, 3 — 800. Длина волны возбуждающего излучения 337 нм. Кривая 4 — спектр для имплантированной КНИ-структуры, отожженной при 600°C при $P = 12$ кбар, после удаления верхнего слоя толщиной 20 нм.

давлением, никакой ФЛ не наблюдалось. Итак, данные рис. 1 показывают, что необходимым условием формирования особенностей в спектре ФЛ является наличие КНИ-структуры, имплантированной большими дозами ионов H^+ , и отжига в условиях высокого гидростатического сжатия.

С целью более подробного изучения наблюдаемого эффекта мы исследовали спектры эмиссии в зависимости от температуры отжига под давлением 12 кбар (рис. 2). Формирование системы пиков в длинноволновой области спектра ФЛ наблюдалось начиная с $T_{\text{ann}} = 500^\circ\text{C}$. Увеличение температуры отжига до 600°C приводило как к увеличению полной интенсивности ФЛ во всем исследованном диапазоне λ_{em} , так и к увеличению амплитуды пиков в области $\lambda_{\text{em}} = 500\text{--}700$ нм. Дальнейший рост T_{ann} до 800°C приводит к небольшому падению интенсивности ФЛ. Однако при этом происходит более четкое проявление системы периодически расположенных пиков, в том числе и в более коротковолновой (голубой) области спектра эмиссии. Необходимо также заметить, что с ростом T_{ann} происходит незначительное голубое смещение системы наблюдаемых пиков ФЛ. Удаление верхнего слоя 20 нм приводит к исчезновению системы периодически расположенных пиков ФЛ. В этом случае в спектре ФЛ наблюдается лишь один широкий пик с максимумом при $\lambda \approx 430$ нм, при этом его интенсивность несколько ниже, чем в случае имплантированных образцов объемного кремния или соответствующих КНИ-структур, отожженных при атмосферном давлении (см. рис. 1).

С целью выявления причин появления особенностей в спектрах ФЛ КНИ-структур, имплантированных ионами H^+ и отожженных при высоких гидростатических

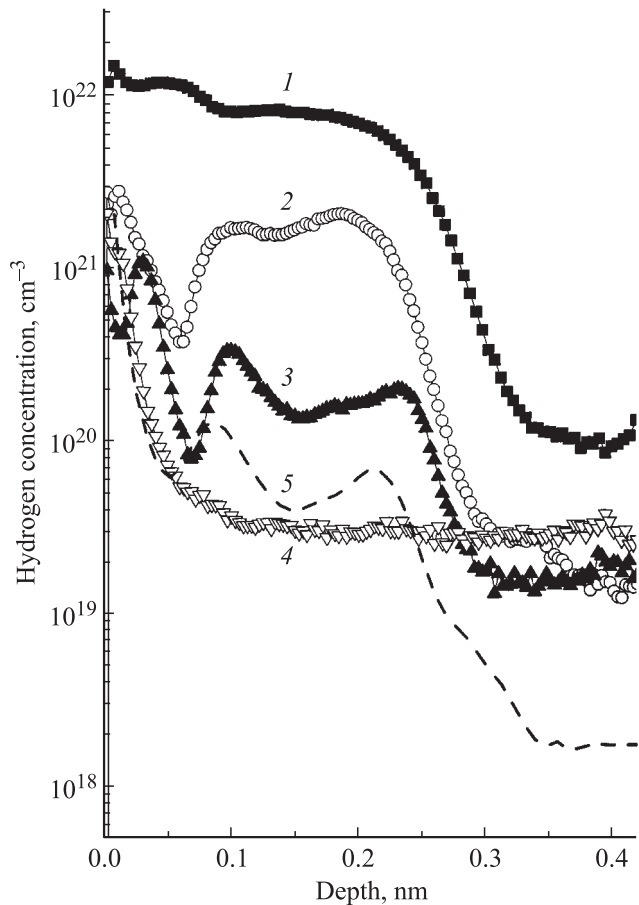


Рис. 3. Профили распределения водорода в пленке КНИ до (1) и после (2–4) имплантации ионов H^+ с энергией 24 кэВ дозой $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и последующего отжига при температуре $T_{\text{ann}}, ^\circ\text{C}$: 2 — 600, 3 — 800, 4 — 1000 в течение 5 ч в атмосфере Ag под давлением 12 кбар, а также при температуре 700°C (кривая 5) при атмосферном давлении.

сжатиях, мы исследовали распределение внедренного водорода как в образцах объемного кремния, так и КНИ-структур. Профили распределения имплантированных атомов водорода в слое КНИ после отжига под давлением 12 кбар при разных температурах отжига представлены на рис. 3. После имплантации практически весь водород однородно распределен в слое толщиной около 0.3 мкм с концентрацией $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Последующий отжиг при температуре $T_{\text{ann}} \lesssim 500^\circ\text{C}$ не приводил к перераспределению водорода в слое Si. При более высоких температурах наблюдалось как изменение формы профиля распределения водорода, так и снижение его интегральной концентрации. При температурах выше 500°C происходит также и перераспределение водорода из глубины образца по направлению к его внешней поверхности. При этом часть водорода покидает образец, а часть накапливается в приповерхностном слое толщиной $\lesssim 50 \text{ нм}$ в концентрации $\sim 6 \text{ ат}\%$. Для сравнения на рис. 3 показан концентрационный профиль водорода, полученный после отжига соответствующих образцов при $T_{\text{ann}} = 700^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении. Видно,

что в этом случае распределение водорода внутри имплантированного соответствует профилю, полученному после отжига под давлением при $T_{\text{ann}} = 1000^\circ\text{C}$. Это означает, что по сравнению с отжигом при $P = 1 \text{ бар}$ отжиг в условиях гидростатического сжатия препят-

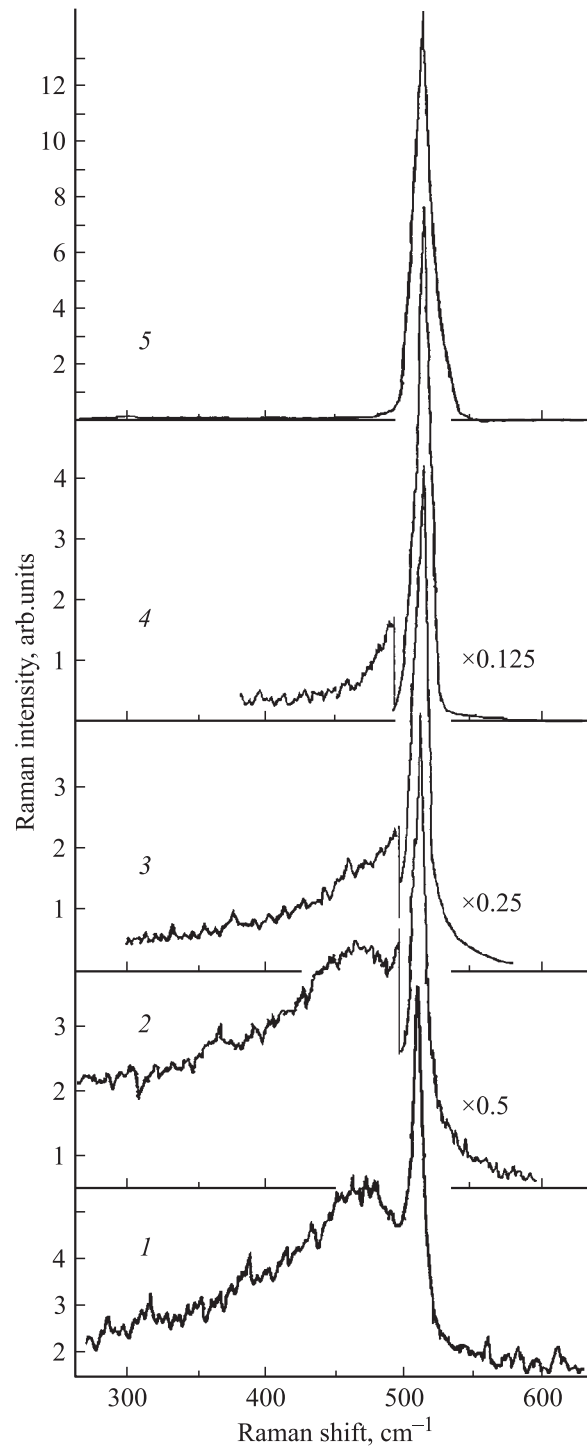


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния света для КНИ-структур, имплантированных ионами H^+ с энергией 24 кэВ дозой $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ до (1) и после отжига в течение 5 ч под давлением 12 кбар при температуре $T_{\text{ann}}, ^\circ\text{C}$: 2 — 500, 3 — 600, 4 — 800 и при $T_{\text{ann}} = 800^\circ\text{C}$ под давлением 1 бар (кривая 5)

ствуется выходу водорода из имплантированного слоя, а также способствует большей его аккумуляции вблизи поверхности Si.

Дополнительные данные о структурных и оптических характеристиках имплантированных слоев кремния-на-изоляторе были получены из результатов спектроскопии КРС. На рис. 4 представлены спектры КРС от структур, имплантированных ионами водорода и отожженных при температурах 500, 600 и 800°С под давлением 12 кбар, а также спектр образца, отожженного при атмосферном давлении при $T_{\text{ann}} = 800^\circ\text{C}$. Так же как и в спектрах образцов, измеренных сразу после имплантации, после отжига при $T_{\text{ann}} = 500^\circ\text{C}$ наблюдались два пика. Первый пик с максимумом при 480 см^{-1} совпадает со спектром аморфного кремния. Второй пик на частоте 520 см^{-1} , имеющий ширину на полувысоте около 3 см^{-1} , связан с рассеянием на оптических фононах кристаллической матрицы Si. Однако интенсивность последнего пика была существенно ниже, чем обычно наблюдается в монокристаллическом кремнии.

Увеличение температуры отжига до 600°C сопровождается появлением следующих особенностей в КРС спектрах. Во-первых, уменьшается интенсивность КРС в низкочастотной области спектра ($< 520\text{ см}^{-1}$). При этом четкий пик при 480 см^{-1} не виден, а наблюдается лишь асимметрия фоновой линии 520 см^{-1} в виде плеча в низкочастотной области. Одновременно интенсивность пика, связанного с кристаллическим Si, увеличивается почти в 2 раза. Рост T_{ann} до 800°C сопровождается дальнейшим затуханием интенсивности пика, связанного с оптическими фононами в аморфной матрице, и увеличением интенсивности фоновой линии в монокристаллическом Si еще в 2 раза. Интенсивность последней теперь достигает величины, соответствующей ее значению в объемном монокристалле кремния. Необходимо отметить, что асимметрия этой линии в низкочастотной области спектра все еще остается заметной. Это может быть следствием двух следующих факторов. Во-первых, обусловлено смещением частоты оптического фонона в монокристаллическом Si из-за размерных эффектов, например, вследствие образования нанокристаллов кремния в процессе кристаллизации слоя КНИ, имплантированного большими дозами H^+ . Во-вторых, наблюдаемая асимметрия может быть связана с присутствием остаточной аморфной фазы. Для сравнения на рис. 4 приведены спектры КРС имплантированных соответствующими дозами ионов водорода КНИ-структур, отожженных при $T_{\text{ann}} = 800^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении. Видно, что в этом случае пик вблизи 520 см^{-1} симметричен, что является свидетельством отсутствия иных фаз, кроме фазы объемного монокристаллического Si. Однако как ширина этого пика, несколько большая ширины пиков, обычно наблюдаемых от объемного монокристаллического кремния, так и относительно низкая интенсивность могут свидетельствовать о наличии дефектов структуры в рекристаллизованном слое и, как следствие, о достаточно большом его коэффициенте поглощения для данной длины волны. Дополнительные

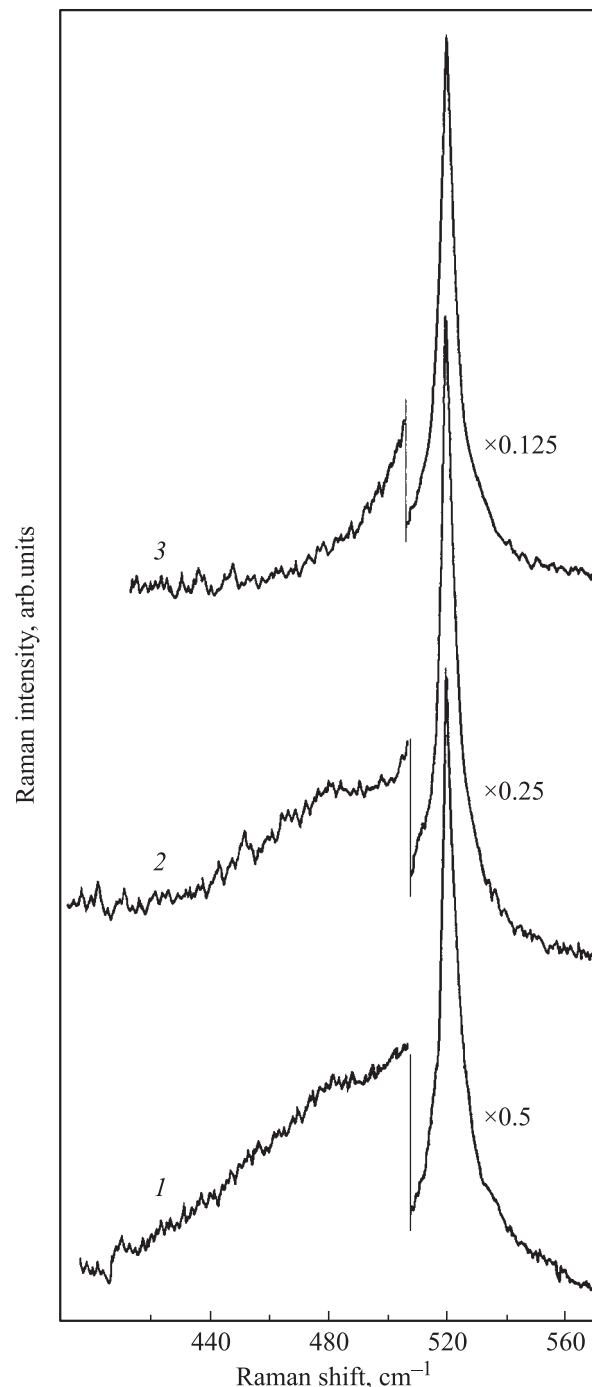


Рис. 5. Спектры комбинационного рассеяния света КНИ-структур, имплантированных ионами H^+ с энергией 24 кэВ дозой $3 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$ и отожженных при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ под давлением 12 кбар, до (1) и после стравливания верхних слоев толщиной 20 (2) и 80 нм (3).

сведения о распределении кристаллической и аморфной фаз в имплантированных КНИ-структурах были получены из измерений спектров КРС в сочетании с последовательным удалением верхних слоев Si. На рис. 5 представлены спектры КРС от КНИ-структур, имплантированных ионами H^+ и отожженных при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$

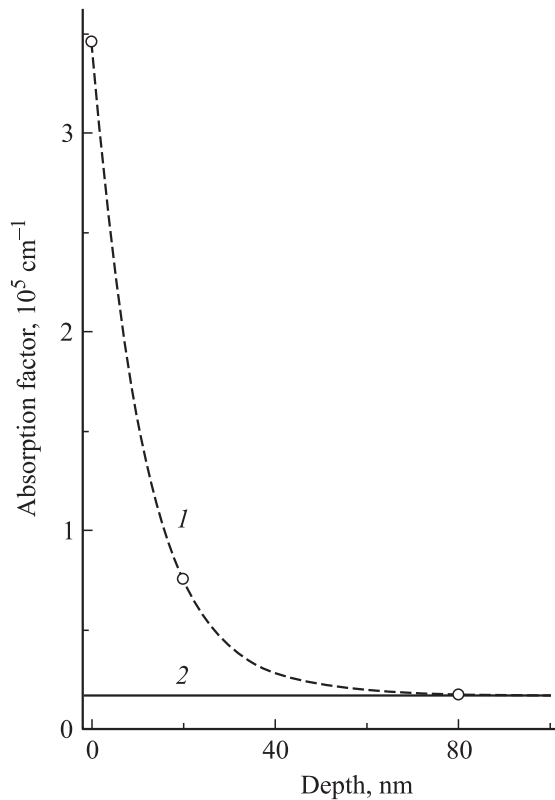


Рис. 6. Распределение по глубине коэффициента поглощения: 1 — в КНИ-структуре, имплантированной ионами H^+ с энергией 24 кэВ дозой $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и отожженной при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ под давлением 12 кбар; 2 — в монокристаллическом Si.

под давлением 12 кбар, до и после стравливания верхних слоев толщиной 20 и 80 нм. Удаление верхних 20 нм имплантированного слоя Si приводит к уменьшению в спектрах КРС интенсивности пика вблизи 480 см^{-1} почти в 2 раза. При этом интенсивность фоновой линии в монокристаллическом кремнии (520 см^{-1}) увеличивается в ~ 2 раза. После удаления слоя Si толщиной 80 нм пик КРС, связанный с аморфным кремнием, практически исчезает, а интенсивность пика 520 см^{-1} увеличивается в 4 раза по сравнению с исходным образцом и достигает величины, соответствующей объемному монокристаллу кремния. Данные послойных измерений спектров КРС показывают, что в имплантированном слое КНИ в результате отжига под давлением формируется двухслойная структура: тонкий аморфный слой в приповерхностной области и слой монокристаллического кремния, по оптическим свойствам близкий к объемному материалу. Распределение коэффициента поглощения возбуждающего света в слое КНИ может быть определено по изменению интенсивности фоновой линии в монокристаллическом кремнии следующим образом:

$$\frac{I_i}{I_{i+1}} = \exp[2k(d_{i+1} - d_i)], \quad (1)$$

где I_i и I_{i+1} — интенсивности пика 520 см^{-1} , регистрируемые в спектре КРС после удаления слоев толщиной

d_i и d_{i+1} соответственно, k — коэффициент поглощения. После подстановки в уравнение (1) соответствующих значений интенсивности пика при 520 см^{-1} и толщины удаленных слоев мы получили распределение по глубине коэффициента поглощения в слое КНИ, представленное на рис. 6. Здесь же горизонтальной линией показан коэффициент поглощения света с длиной волны 488 нм для объемного монокристаллического кремния [14]. Таким образом, проведенные расчеты показывают, что в условиях отжига под давлением 12 кбар формируется тонкий приповерхностный слой с коэффициентом поглощения света с длиной волны 488 нм, в 19.5 раз превышающим коэффициент поглощения объемного кремния.

4. Обсуждение результатов исследований

При обсуждении полученных результатов сконцентрируемся на рассмотрении двух проблем. Во-первых, обсудим особенности структурных перестроек слоев кремния-на-изоляторе, имплантированного большими дозами ионов водорода, в условиях отжига под давлением. Во-вторых, рассмотрим влияние сформированной структуры на оптические свойства КНИ-слоев.

Известно, что водород в кремнии при температурах ниже 350°C находится в связанном состоянии [15], насыщая оборванные связи. Как правило, это связи Si—H. Кроме того, имплантация ионов водорода в концентрации нескольких десятков атомных процентов сопровождается формированием микропустот в области имплантации. Рост температуры постимплантационного отжига выше 350°C приводит к выходу водорода из связанного состояния и образованию подвижных димеров (молекул H_2), которые, диффундируя при $T_{\text{ann}} > 500^\circ\text{C}$ к микропустотам, образуют в них водородные пузыри. Давление водородного газа в микропоре растет по мере накопления последнего в ней и достигает критических значений $P_{\text{cr}} = 5\text{--}6$ кбар [16], при которых происходит разрушение микропоры и выход газа из имплантированного слоя с образованием микрокуполов на поверхности кремния. В обычных условиях этот процесс эффективен при температурах $\gtrsim 600^\circ\text{C}$. Высокое гидростатическое давление атмосферы отжига $P > P_{\text{cr}}$ подавляет образование газовых пузырей в приповерхностном слое и препятствует выходу водорода из образца. В результате водород скапливается в виде растворенных молекул H_2 в приповерхностной области образца, образуя тонкий аморфный слой, насыщенный водородом. Именно этот слой, по-видимому, мы и наблюдаем в спектрах КРС. Другая характерная особенность состоит в том, что с ростом температуры отжига при высоких давлениях внутри имплантированного и насыщенного водородом слоя кремния может происходить стабилизация и последующая кластеризация гидрированных точечных дефектов на протяженных структурных нарушениях типа микротрещин или микропластин. Итак, в отличие от

обычного отжига, отжиг в условиях гидростатического сжатия при $P > 6$ кбар, во-первых, предотвращает образование куполов на поверхности образца, приводя тем самым к формированию достаточно резкой границы „КНИ-воздух“; во-вторых, стимулирует накопление водорода внутри имплантированного слоя КНИ. Именно эти два фактора, по-видимому, и играют ключевую роль в модификации спектров ФЛ.

Как уже было отмечено выше, имплантированная ионами водорода и отожженная под давлением КНИ-структура представляет собой микрорезонатор Фабри-Перро с зеркалами, сформированными границами раздела „КНИ-воздух“ и „КНИ-SiO₂“, и активным слоем, содержащим центры ФЛ, излучающие в зелено-желтой области спектра. В резонаторе усиливается излучение на частотах, соответствующих условию пропускания данного резонатора, а именно [17]

$$\frac{2\pi nL}{\lambda} + \Psi_1 + \Psi_2 = 2m\pi \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (2)$$

где n — показатель преломления света с длиной волны λ в вакууме, L — геометрическая длина резонатора, Ψ_1 и Ψ_2 — фазовые сдвиги, соответствующие перераспределению света за счет отражения и поглощения в зеркалах. Моды, не удовлетворяющие данному условию, подавляются. Поэтому в спектре ФЛ вместо широкой сплошной полосы с максимумом 515 нм (рис. 1) мы наблюдаем систему острых пиков, расположенных на расстоянии, соответствующем разрешенному спектральному диапазону резонатора:

$$F = \frac{\lambda^2}{2n(L + L_{\text{eff},1} + L_{\text{eff},2})}. \quad (3)$$

Здесь $L_{\text{eff},1}$ и $L_{\text{eff},2}$ — эффективные оптические длины зеркал, которые определяются соответствующими фазовыми сдвигами Ψ_1 и Ψ_2 и коэффициентами преломления в зеркалах [17]. Получив из эксперимента величину F , можно рассчитать на резонансной длине волны эффективную длину резонатора L_{eff} , включающую в себя перераспределение излучения в зеркалах. Из рис. 1 и 2 можно найти величину F . Например, при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ получаем $F \approx 47$ нм вблизи $\lambda = 515$ нм. Подставив эти значения, а также величину показателя преломления $n_{\text{eff}} = 4.2$ в выражение (3), получим $L_{\text{eff}} = 670$ нм. Это на $\sim 30\%$ превышает геометрические размеры резонатора, которые в нашем случае соответствуют толщине КНИ-слоя. Различия между L и L_{eff} могут быть обусловлены перераспределением света в зеркалах. Так, в случае верхнего зеркала необходимо учитывать тот факт, что оно сформировано тонким аморфным слоем вблизи границы „КНИ-воздух“, коэффициент поглощения зеленого света которого в 19.5 раз превышает соответствующий коэффициент поглощения объемного кремния. Это означает, что величина $L_{\text{eff},1}$ в формуле (3) является конечной величиной. Добротность резонатора, определяемая как отношения длины волны

резонанса к ширине резонансного пика, в нашем случае составляла ~ 20 . Эта величина может быть существенно увеличена за счет подбора соответствующих геометрических размеров активной области и зеркал, а также за счет подбора распределения и концентрации светоизлучающих центров.

5. Заключение

Таким образом, в данной работе исследованы особенности формирования спектра ФЛ в имплантированных ионами водорода КНИ-структурах. Наблюдалось формирование широкой сине-зеленой полосы ФЛ, интенсивность которой растет с увеличением гидростатического сжатия во время постимплантационного отжига КНИ-структур. В объемном кремнии интенсивность этой полосы ФЛ остается практически неизменной с ростом давления. Обнаружено формирование системы периодических пиков ФЛ в спектральном диапазоне ~ 500 – 700 нм от КНИ-структур, отожженных под давлением 12 кбар. Появление тонкой структуры в спектре ФЛ коррелирует с особенностями отожженных под высоким давлением КНИ-структур. А именно — со структурой оптического резонатора, формирование которого обусловлено замедлением выхода водорода из имплантированного КНИ-слоя и подавлением процесса образования микропузырей водорода в условиях отжига при $P > 6$ кбар. Полученные результаты позволяют надеяться на то, что КНИ-структуры могут стать базой для создания высокоэффективных интегральных светоизлучающих приборов на основе кремния.

В заключение авторы выражают благодарность И.И. Морозову за проведение имплантации ионов водорода, проф. А. Мисюку за проведение отжигов под давлением, В.И. Ободникову за измерение профилей распределения атомов водорода методом SIMS, Е.М. Багаеву за помощь при измерении спектров фотолюминесценции, В.А. Володину за полезное обсуждение результатов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 04-02-16425).

Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [2] X. Zhao, O. Schoenfeld, J. Komuro, Y. Aoyagi, T. Sugano. Phys. Rev. B, **50**, 18 654 (1994).
- [3] T. Shimizu-Iwajama, S. Nakao, K. Saitoh. Appl. Phys. Lett., **65**, 1814 (1994).
- [4] R.E. Hummel, M.H. Ludvig, S.-S. Chang. Sol. St. Commun., **93**, 237 (1995).
- [5] Q. Zhang, S.C. Bayliss, D.A. Hutt. Appl. Phys. Lett., **66**, 1977 (1995).
- [6] W. Skorupa, R.A. Yankov, I.E. Tyschenko, H. Fröb, T. Böhme, K. Leo. Appl. Phys. Lett., **68**, 2410 (1996).
- [7] A.A. Shklyayev, M. Shibata, M. Ishikawa. Phys. Rev. B, **62**, 1540 (2000).
- [8] Zh. Ma, K. Chen, X. Huang, J. Xu, W. Li, D. Zhu, J. Mei. Appl. Phys. Lett., **85**, 516 (2004).

- [9] E.M. Purcell. Phys. Rev., **69**, 681 (1946).
- [10] M. Zelsmann, E. Picard, T. Charvolin, E. Hadji, M. Heitzmann, B. Dal'zotto, M.E. Nier, C. Seassal, P. Rojo-Romeo, X. Letartre. Appl. Phys. Lett., **83**, 2542 (2003).
- [11] C.B. Li, C.J. Huang, B.W. Cheng, Y.H. Zuo, R.W. Mao, L.P. Luo, J.Z. Yu, Q.M. Wang. J. Appl. Phys., **95**, 5914 (2004).
- [12] В.П. Попов, И.Е. Тыщенко. *Способ изготовления структуры кремний-на-изоляторе*. Патент РФ (№ 2217842, 14.01.2003).
- [13] И.Е. Тыщенко, В.П. Попов, А.Б. Талочкин, А.К. Гутаковский, К.С. Журавлев. ФТП, **38** (1), 111 (2004). [Semiconductors, **38**, 107 (2004)].
- [14] В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко. *Оптические свойства полупроводников* (Киев, Наук. думка, 1987) гл. II, с. 178.
- [15] V.P. Popov, A.K. Gutakovskii, L.N. Safronov, I.E. Tyschenko, K.S. Zhuravlev, A.B. Talochkin, I.V. Antonova, O.V. Naumova, V.I. Obodnikov, A. Misiuk, J. Bak-Misiuk, J. Domagala, A. Romano-Rodrigues, A. Bachrouri. *Progress in SOI Structures and Devices Operating at Extreme Conditions* ed. by F. Balestra et al. (Kulwer Academic Publishers, Netherlands, 2002) p. 269.
- [16] W. Han, J. Yu. J. Appl. Phys., **89**, 6551 (2001).
- [17] M.S. Ünlü, S. Strite. J. Appl. Phys., **78**, 607 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

Peculiarities of photoluminescence in silicon-upon-insulator structures implanted with hydrogen ions

*I.E. Tyschenko, K.S. Zhuravlev, A.B. Talochkin,
V.P. Popov*

Institute for Physics of Semiconductors,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk 630090, Russia