

УДК 621.315.592

## Исследование фотолюминесценции пленок $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных ионами $\text{Ge}^+$ и отожженных в условиях гидростатического давления

© И.Е. Тыщенко<sup>¶</sup>, К.С. Журавлев, Е.Н. Вандышев, А. Мисюк<sup>+</sup>, Р.А. Янков\*, Л. Реболе<sup>≠</sup>, В. Скорупа<sup>≠</sup>Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия<sup>+</sup> Институт электронной технологии,  
02-668 Варшава, Польша<sup>\*</sup> Центр пленочных технологий, ТЦО Райнбрайтбах,  
53619 Райнбрайтбах, Германия<sup>≠</sup> Институт ионно-лучевой физики и материаловедения, Исследовательский центр Росседорф,  
510119, 01314 Дрезден, Германия

(Получена 16 июня 2000 г. Принята к печати 20 июня 2000 г.)

Впервые исследовано влияние гидростатического давления в процессе отжига на фотолюминесценцию осажденных на кремнии пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  ( $x = 0.25$ ,  $y = 1$ ), имплантированных ионами  $\text{Ge}^+$ . Показано, что гидростатическое сжатие приводит к 10-кратному усилению интенсивности фотолюминесценции имплантированных пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  по сравнению с соответствующими отжигами при атмосферном давлении. Наблюдаемый рост интенсивности фотолюминесценции объясняется ускоренным образованием центров излучательной рекомбинации в областях метастабильных фаз имплантированного оксинитрида кремния. Природа этих центров предположительно связывается с центрами  $\equiv \text{Si}-\text{Si} \equiv$  и комплексами атомов Ge (типа  $\equiv \text{Si}-\text{Ge}$  и  $\equiv \text{Ge}-\text{Ge} \equiv$ ).

### Введение

В последние годы, с момента открытия видимой фотолюминесценции (ФЛ) пористого кремния [1], большой интерес привлекают к себе исследования свойств структур с низкоразмерными объектами на основе Si. Одним из наиболее перспективных способов создания таких структур стал метод ионно-лучевого синтеза кластеров Si и Ge и нанокристаллов в термически выращенных на кремнии пленках  $\text{SiO}_2$  [2–5] — материала, наиболее широко использующегося в кремниевой технологии. Слои оксинитрида кремния ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ) также широко используются при изготовлении кремниевых приборов и обладают целым рядом замечательных свойств, позволяющих применять их в качестве компонентов оптических интегральных схем. По сравнению с  $\text{SiO}_2$  пленки оксинитрида кремния обладают большим коэффициентом преломления и являются более пригодными для создания оптоэлектронных приборов. Так, волноводы на основе  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  характеризуются малыми потерями света [6]. Пленки оксинитрида кремния по сравнению с  $\text{SiO}_2$  являются химически более стойкими и обладают хорошими маскирующими характеристиками. В последнее время высказываются предположения, что в будущем термический  $\text{SiO}_2$  как подзатворный диэлектрик для наноразмерных МДП приборов будет вытеснен пленками аморфного  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ . Это обусловлено тем, что оксинитрид кремния содержит меньшее количество связей Si–Si на границе раздела кремний–диэлектрик (являющихся ловушками для дырок), а также обладает блокирующими свойствами для перераспределения легирующих примесей [7]. До

последнего времени в литературе отсутствовали данные по ФЛ оксинитрида кремния при комнатной температуре. Лишь понижение температуры до 90 К позволяло наблюдать полосу ФЛ с максимумами вблизи энергии  $\hbar\omega = 2.8$  эВ (длина волны  $\lambda \approx 440$  нм), природа которой выяснена не была [8]. Недавно в работе [9] впервые при комнатной температуре были измерены спектры ФЛ пленок аморфного  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  разного состава. В видимой области спектра была обнаружена полоса с максимумом вблизи  $\hbar\omega = 3.1$  эВ ( $\lambda \approx 400$  нм). Максимум интенсивности этой полосы ФЛ достигался при энергии возбуждающего излучения  $\sim 6.3$  эВ (длина волны  $\sim 200$  нм). Интенсивность и ширина пика зависели от стехиометрического состава пленок. С увеличением содержания кислорода в пленке наблюдалось уширение пика ФЛ с одновременным падением его интенсивности. Авторы связывают природу этого пика с рекомбинацией на связи  $\text{N}_3\text{Si}-\text{SiN}_3$ . В литературе также было показано [10], что имплантация ионов  $\text{C}^+$  в пленке  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  приводит при комнатной температуре к возбуждению зеленой полосы ФЛ с максимумом вблизи  $\lambda = 550$  нм ( $\hbar\omega \approx 2.25$  эВ). Максимальная ее интенсивность достигалась после отжига при температуре  $T_a = 600^\circ\text{C}$ . Природа этой полосы объяснялась процессами рекомбинации в комплексах атомов Si, N, O и C. Несмотря на все возрастающий интерес к исследованию свойств оксинитрида кремния, его фотолюминесцентные свойства, а также природа наблюдаемых пиков ФЛ остаются практически не изученными. Не исследованы в полной мере и возможности применения этого материала для создания на его основе эффективных источников излучения. Ранее нами было обнаружено [11], что отжиг в условиях гидро-

<sup>¶</sup> E-mail: tys@isp.nac.ru

статического сжатия ионно-имплантированных пленок  $\text{SiO}_2$  приводит к усилению ФЛ в видимом диапазоне при комнатной температуре. Цель данной работы — изучить влияние отжига в условиях гидростатического давления на ФЛ пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных ионами  $\text{Ge}^+$ .

## Методика эксперимента

Исходные подложки представляли собой пластины монокристаллического кремния  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением 3–10 Ом·см, ориентированные в направлении  $\{100\}$ . Затем на кремниевых пластинах выращивался буферный слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 2 нм. Пленки  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  ( $x = 0.25$ ,  $y = 1$ ) с коэффициентом преломления  $\sim 1.882$  толщиной  $\sim 75$  нм осаждались из смеси газов  $\text{SiH}_2\text{C}_{12}$  ( $50 \text{ с} \cdot \text{см}^3$ ),  $\text{N}_2\text{O}$  ( $150 \text{ с} \cdot \text{см}^3$ ) и  $\text{NH}_3$  ( $150 \text{ с} \cdot \text{см}^3$ ) при температуре  $780^\circ\text{C}$  под давлением 200 мТорр. Имплантация пленок оксинитрида кремния проводилась ионами  $\text{Ge}^+$  с энергией 55 кэВ дозами  $2.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (малая доза —  $LD$ ),  $5.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (средняя доза —  $MD$ ) и  $1.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (высокая доза —  $HD$ ). Параметры ионов выбирались таким образом, чтобы максимум распределения ионов находился в середине пленки  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ . Температура подложки во время облучения во всех случаях поддерживалась в интервале  $-(145-155)^\circ\text{C}$  за счет охлаждения в колонне жидкого азота. Плотность ионного тока составляла  $0.5-1.0 \text{ мкА/см}^2$ . Последующие отжиги проводились при температурах  $T_a = 450-1000^\circ\text{C}$  в течение 5 ч в атмосфере  $\text{Ag}$ , как при атмосферном давлении, так и в условиях гидростатического сжатия при давлении  $P = 12$  кбар. Стационарная ФЛ в интервале длин волн  $\lambda = 340-850 \text{ нм}$  возбуждалась излучением  $\text{N}_2$ -лазера с длиной волны  $\lambda_{\text{ex}} = 337 \text{ нм}$  и мощностью 10 мВт. При измерении спектров нестационарной ФЛ также использовался азотный лазер с длительностью импульса 7 нс и мощностью 16 мВт. Для изменения мощности возбуждения использовались нейтральные фильтры. Все измерения проводились при температуре  $T = 300 \text{ К}$ . Полученные спектры нормированы на спектральную чувствительность фотоэлектронного умножителя.

## Результаты экспериментов

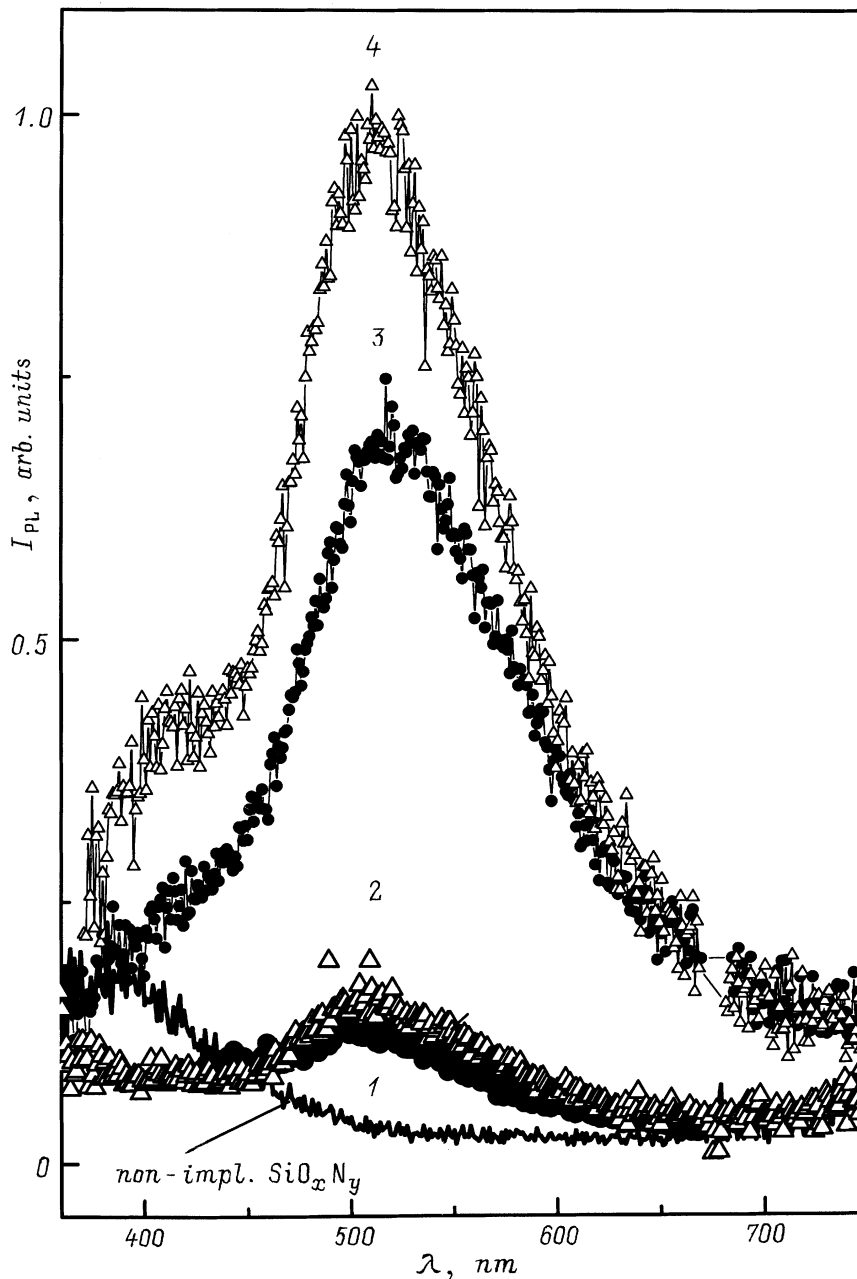
В наших экспериментах исходные пленки  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  люминесцировали в фиолетовой области спектра с максимумом интенсивности вблизи  $\lambda = 400 \text{ нм}$  (рис. 1). Отжиг неимплантированных слоев оксинитрида кремния, как при атмосферном давлении, так и при  $P = 12$  кбар, не приводил к изменениям спектра ФЛ. Имплантация ионов  $\text{Ge}^+$  приводила к исчезновению ФЛ во всей области спектра. Последующий отжиг сопровождался вновь возрастанием интенсивности. При этом положение пиков ФЛ и их интенсивность  $I_{\text{PL}}$  сильно зависели от температуры и величины давления во время отжига. Для сравнения на рис. 1 приведены спектры ФЛ пленок

$\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных  $LD$  ионов  $\text{Ge}^+$ , после отжига при  $T_a = 800$  и  $1100^\circ\text{C}$  и давлениях  $P = 1$  бар и 12 кбар. Отжиг при атмосферном давлении приводил к формированию пика вблизи  $\lambda = 520 \text{ нм}$ . Его интенсивность увеличивалась с ростом температуры отжига и после  $T_a \approx 800-1000^\circ\text{C}$  была сравнима по величине с интенсивностью пика фиолетовой ФЛ в исходных пленках. В случае отжига под давлением  $P = 12$  кбар также происходило возгорание зеленой полосы ФЛ ( $\lambda \approx 520 \text{ нм}$ ), но в  $\sim 10$  раз более интенсивной, чем в слоях, отожженных при атмосферном давлении (см. рис. 1). Наряду с формированием интенсивного пика зеленой ФЛ отжиг под давлением приводил и к усилению ФЛ в фиолетовой области спектра ( $\lambda \approx 400 \text{ нм}$ ). После отжига при  $T_a = 1000^\circ\text{C}$  ее интенсивность была почти в 2 раза выше, чем в исходных образцах. Интенсивность наблюдаемых полос ФЛ в этом случае также увеличивалась с ростом температуры отжига.

В исследованных нами интервалах доз ионов и температур отжига большие интенсивности ФЛ соответствовали меньшим дозам ионов  $\text{Ge}^+$ . Эффект падения интенсивности ФЛ с ростом дозы ионов наблюдался как в образцах, отожженных при атмосферном давлении, так и в образцах, отожженных в условиях гидростатического сжатия. На рис. 2 представлены спектры ФЛ пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных тремя разными дозами ионов  $\text{Ge}^+$ , после отжига при  $T_a = 1000^\circ\text{C}$  и  $P = 12$  кбар.

Стационарные спектры ФЛ при разных мощностях возбуждения показаны на рис. 3. Видно, что увеличение мощности возбуждающего излучения ( $W$ ) приводит к возгоранию как фиолетового, так и зеленого пиков ФЛ. При этом энергетическое положение максимумов остается неизменным. На вставке рис. 3 точками показаны интенсивности пиков 400 и 520 нм, полученные после разложения экспериментальных спектров на составляющие по закону Лоренца, как функция  $W$ . Пунктирными линиями представлены теоретические аппроксимации экспериментальных зависимостей  $I_{\text{PL}}$  от  $W$ . Анализ показал, что изменение интенсивности каждого из пиков в зависимости от мощности возбуждающего излучения носит линейный характер:  $I_{\text{PL}} \propto W^\gamma$ , где  $\gamma = 1$  для зеленого и 0.97 для фиолетового пика ФЛ.

На рис. 4 представлены кинетические зависимости интенсивности ФЛ для исходных пленок оксинитрида кремния и пленок, имплантированных  $LD$  ионов  $\text{Ge}^+$  после отжига при  $T_a = 1000^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении и под давлением 12 кбар. На вставке рис. 4 показаны спектры нестационарной ФЛ пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных  $LD$  ионов  $\text{Ge}^+$  и отожженных при  $T_a = 1000^\circ\text{C}$ ,  $P = 12$  кбар. Видно, что форма спектров не изменяется во времени, а происходит лишь падение интенсивности ФЛ. Подобным образом ведут себя и спектры нестационарной ФЛ от исходных слоев  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , а также от имплантированных пленок после отжига при  $T_a = 1000^\circ\text{C}$ ,  $P = 1$  бар. Для неимплантированных слоев оксинитрида кремния спад интенсивности ФЛ от времени описывается экспоненциальной функцией с харак-

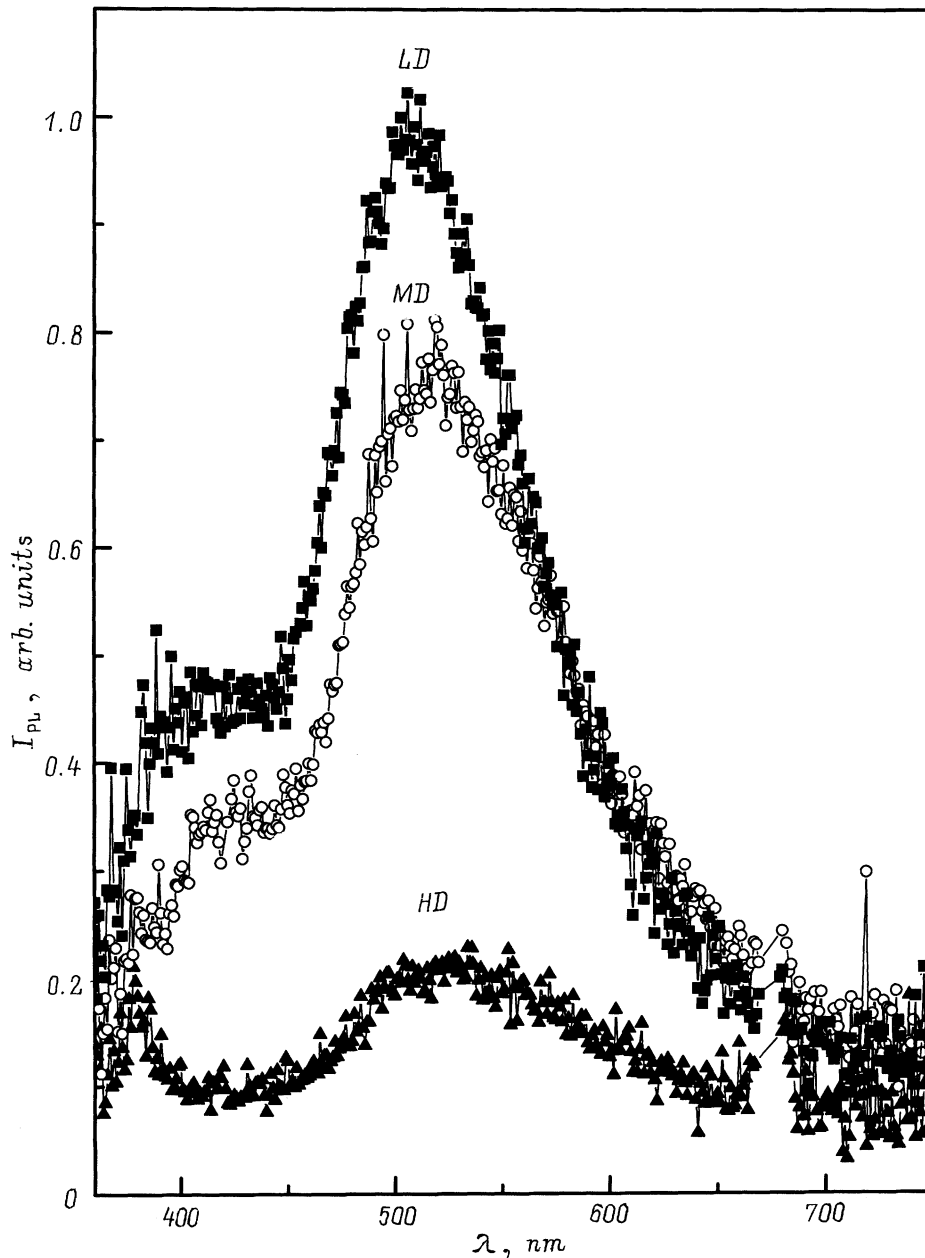


**Рис. 1.** Спектры ФЛ неимплантированного оксинитрида кремния ( $\text{non-impl. SiO}_x\text{N}_y$ ), а также пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных  $\text{LD}$  ионов  $\text{Ge}^+$  и отожженных при  $T_a = 800$  (1, 3) и  $1000^\circ\text{C}$  (2, 4) в течение 5 ч при давлениях 1 кбар (1, 2) и 12 кбар (3, 4). Мощность возбуждающего излучения  $W = 10 \text{ мВт/см}^2$ , длина волны возбуждения  $\lambda_{\text{ex}} = 337 \text{ нм}$ .

терным временем релаксации  $\tau = 17 \text{ мкс}$ . Для пленок, имплантированных  $\text{Ge}^+$  и отожженных при  $P = 1 \text{ бар}$ , 12 кбар и  $T_a = 1000^\circ\text{C}$ , затухание ФЛ не подчиняется экспоненциальному закону. В этих случаях кривые затухания удалось описать степенной функцией вида  $I_{\text{PL}} \sim \tau^{-\beta}$ , где параметр  $\beta = 4.22$  и  $4.29$  для пленок, отожженных при атмосферном и высоком давлениях соответственно. Характерные времена уменьшения интенсивности ФЛ в  $e$  раз имеют значения  $\tau = 45$  и  $48 \text{ мкс}$  соответственно. Важно подчеркнуть, что величины  $\beta$  и  $\tau$  практически не зависят от величины давления во время отжига.

## Обсуждение результатов

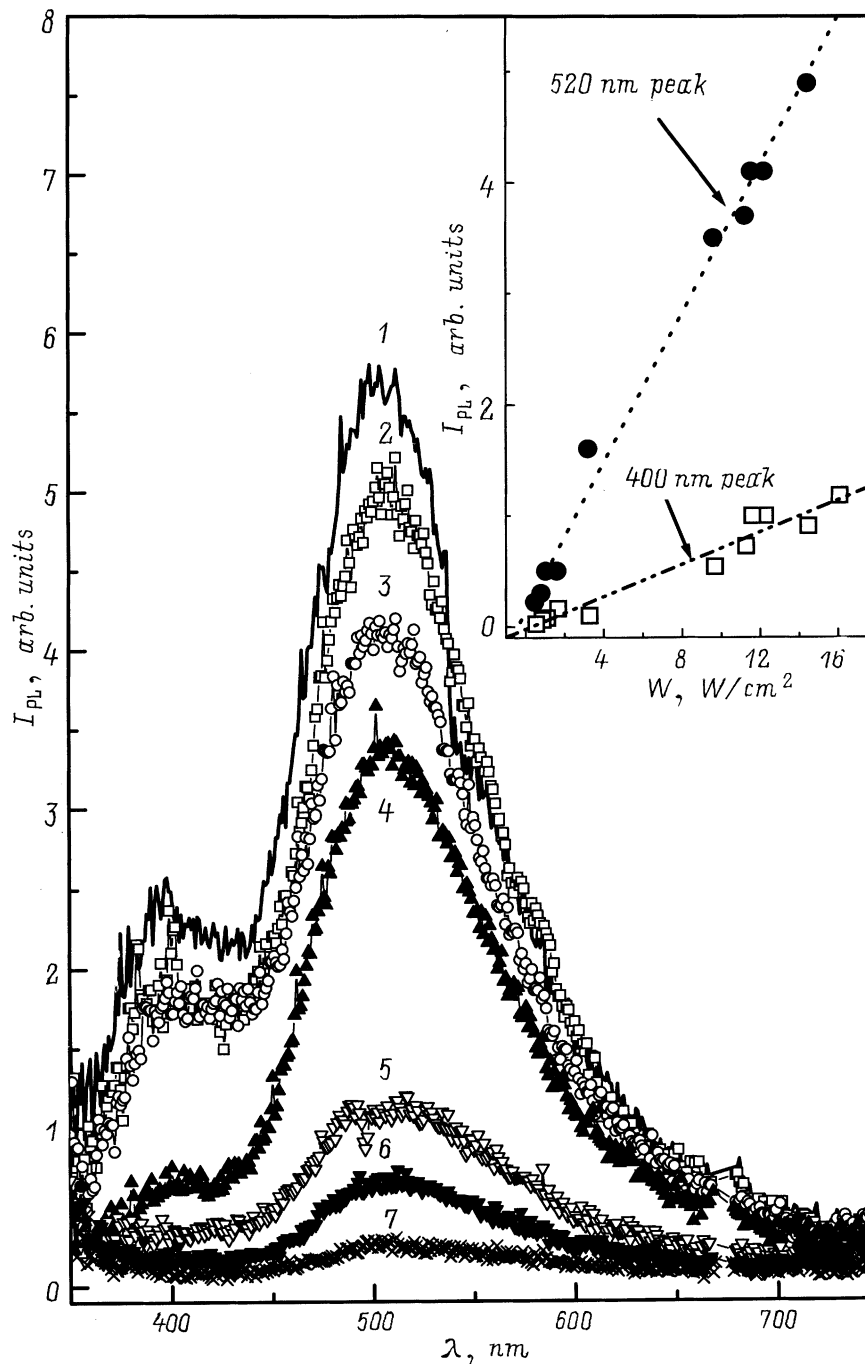
Прежде чем анализировать влияние отжига под давлением на процессы эмиссии света в имплантированном  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , обсудим возможные механизмы и природу ФЛ в этих пленках. Линейная зависимость интенсивности ФЛ от мощности возбуждения показывает, что рекомбинация в пленках оксинитрида кремния происходит не за счет прямой рекомбинации электрона и дырки, например, внутри формирующихся в результате ионной имплантации и последующего отжига  $\text{Ge}$  нанокристаллов и нанокласте-



**Рис. 2.** Спектры ФЛ пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных ионами  $\text{Ge}^+$  дозами  $2.1 \cdot 10^{15}$  (LD),  $5.8 \cdot 10^{15}$  (MD) и  $1.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (HD) после отжига при  $T_a = 1000^\circ\text{C}$  в течение 5 ч под давлением 12 кбар. Мощность возбуждающего излучения  $W = 10 \text{ мВт/см}^2$ , длина волны возбуждения  $\lambda_{\text{ex}} = 337 \text{ нм}$ .

ров, а через рекомбинационные центры. Кроме того, характер дозовой зависимости спектров ФЛ (рис. 2) указывает на то, что процессы рекомбинации связаны, скорее, не с крупными скоплениями атомов Ge, формирование которых предпочтительнее при внедрении больших доз ионов Ge, а с центрами, состоящими из небольшого числа атомов. Заметим, что подобные полосы ФЛ (400 и 520 нм) наблюдались нами ранее в пленках нитрида кремния [12], причем они присутствовали в спектрах как исходного  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , так и имплантированного ионами  $\text{Ge}^+$ . В литературе эти две полосы ФЛ приписываются процес-

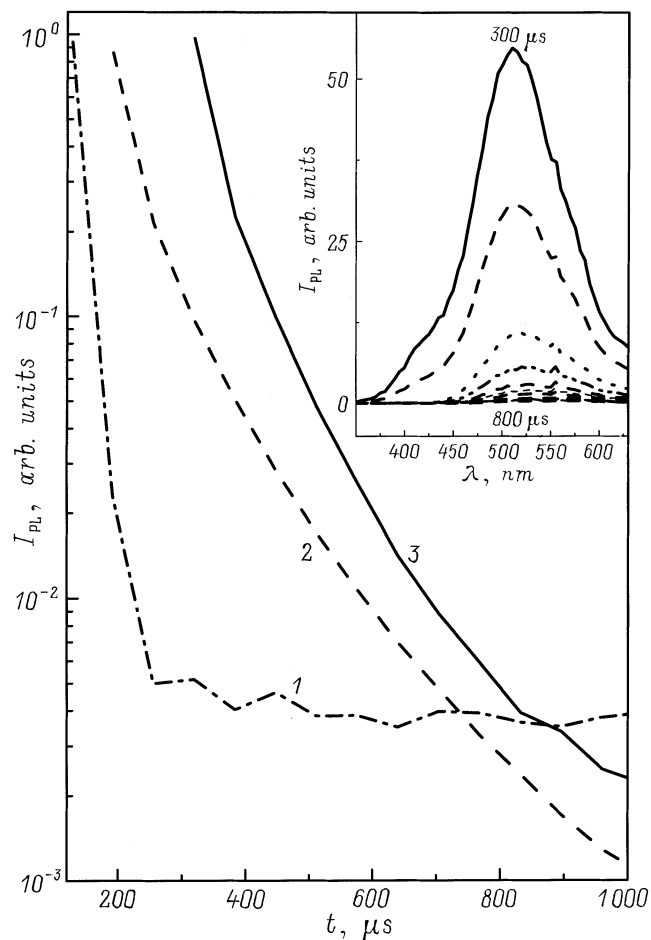
су рекомбинации на центрах  $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$  [13]. Результаты данной работы показывают, что в  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  возгорание зеленой полосы ФЛ происходит лишь с введением в матрицу атомов Ge. При этом роль атомов Ge в процессах рекомбинации может выражаться двояко. Они могут участвовать в образовании как центров поглощения излучения, так и излучающих рекомбинационных центров (например, комплексы  $\equiv\text{Si}-\text{Ge}\equiv$  или  $\equiv\text{Ge}-\text{Ge}\equiv$ ). Последние, по-видимому, и являются источником зеленой полосы ФЛ. Фиолетовая полоса ФЛ присутствует как в спектрах исходных пленок, так и пленок, отожженных



**Рис. 3.** Спектры ФЛ пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных LD ионов  $\text{Ge}^+$  и отожженных при  $T_a = 1000^\circ\text{C}$  в течение 5 ч под давлением 12 кбар в зависимости от мощности возбуждающего излучения  $W$  с длиной волны  $\lambda_{\text{ex}} = 337$  нм.  $W$ , мВт/см<sup>2</sup>: 1 — 16, 2 — 14.4, 3 — 12.2, 4 — 9.6, 5 — 3.2, 6 — 1.6, 7 — 0.48. На вставке — зависимости от мощности возбуждения интенсивности пиков ФЛ 400 и 520 нм, полученные разложением экспериментальных спектров на составляющие по закону Лоренца (точки), и теоретическая аппроксимация экспериментальных зависимостей (прямые линии).

под давлением. Оценки времен релаксации этой полосы в том и другом случае дают близкие значения:  $\tau \approx 17$  и 26 мкс соответственно. На основе этого можно предположить, что полоса ФЛ 400 нм связана с процессами рекомбинации на центрах  $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$ . Необходимо заметить, что полученные нами времена релаксации ФЛ отличаются от указанных в литературе [14,15] значе-

ний характерных времен перехода между уровнями возбужденного ( $T_1$ ) и основного ( $S_0$ ) состояний центров  $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$  и  $\equiv\text{Ge}-\text{Ge}\equiv$ . Причина этого расхождения может состоять в том, что в наших экспериментах возбуждение спектров ФЛ осуществлялось с энергией, не достаточной для возбуждения прямых переходов ( $S_0 \rightarrow T_1$ ). Переход носителя на уровень возбужден-



**Рис. 4.** Кинетические зависимости интенсивности ФЛ исходного  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  (1), а также имплантированного LD ионов  $\text{Ge}^+$  и отожженного при  $T_a = 1000^\circ\text{C}$  в течение 5 с при давлениях 1 бар (2) и 12 кбар (3). На вставке — спектры нестационарной ФЛ  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированного LD ионов  $\text{Ge}^+$ , после отжига при  $T_a = 1000^\circ\text{C}$  в течение 5 с под давлением 12 кбар для временного интервала 300–800 мкс.

ного состояния в нашем случае мог осуществляться лишь только через дополнительные уровни. Полученная нами степенная зависимость интенсивности ФЛ от времени для имплантированных пленок указывает на более сложный характер генерации и рекомбинации носителей по сравнению с неимплантированными пленками. Необходимо также отметить, что имеющиеся в литературе данные о временах релаксации ФЛ центров  $\equiv \text{Si}-\text{Si} \equiv$  и  $\equiv \text{Ge}-\text{Ge} \equiv$  относятся, как правило, к пленкам  $\text{SiO}_2$ , а не  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ .

Представленные результаты показывают, что гидростатическое сжатие во время отжига пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных  $\text{Ge}^+$ , не приводит к формированию новых рекомбинационных центров в исследованном нами интервале  $T_a$ , а способствует лишь увеличению количества центров по сравнению с соответствующими отжигами в условиях атмосферного давления. В пользу

этого свидетельствуют следующие факты. Во-первых, отжиг под давлением не сопровождается появлением новых пиков в спектрах ФЛ по сравнению со спектрами исходных пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , а также слоев, отожженных при  $P = 1$  бар (рис. 1). При этом наблюдается лишь увеличение интенсивности уже наблюдавшихся ранее полос ФЛ ( $\sim 400$  и  $\sim 520$  нм). Во-вторых, анализ кинетических зависимостей ФЛ дает одинаковые времена релаксации ФЛ для имплантированных слоев  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , отожженных как при атмосферном давлении, так и при  $P = 12$  кбар. Важно, что давление в процессе постимплантационного отжига стимулирует формирование комплексов, ответственных и за фиолетовую, и за зеленую полосы ФЛ. Природа и механизм этого явления пока остаются до конца не выясненными. Одной из причин ускоренного образования центров излучательной рекомбинации может быть уменьшение межатомного расстояния в результате воздействия гидростатического сжатия при отжиге. Используемые нами значения  $P$  примерно на порядок величины меньше тех, которые приводят к структурно-фазовым переходам в объемном материале [16]. Наши эксперименты также показывают, что в случае неимплантированного оксинитрида кремния давление не приводит к формированию дополнительных центров. Это происходит лишь в случае, когда мы имеем дело с ионно-имплантированными пленками, содержащими высокую концентрацию избыточных атомов Ge и дефектов. Возможно, что в областях ионно-имплантированного  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  такие структурные перестройки происходят при более низких  $P$ . Другое объяснение ускоренного образования центров ФЛ в процессе отжига под давлением было высказано нами в работе [11]. Оно было сделано в рамках концепции ускоренных структурных переходов внутри отдельных областей метастабильных фаз [17], каковыми в данном случае являются нестехиометрические области оксинитридов кремния, обогащенные атомами кремния и германия. Это означает, что энергия активации, соответствующая изменениям в ближнем порядке, может быть существенно понижена в случае, когда атомы матрицы находятся вдали от равновесия. Причиной такого понижения локальной энергии активации может быть исчезновение одной или нескольких частот колебаний атомов решетки вблизи порога устойчивости. В данном случае это может привести к формированию большого числа мелких кластеров Si или Si-Ge, структура которых наиболее энергетически выгодна. Вопрос о том, какой из этих двух механизмов является ответственным за процесс ускоренного образования центров под действием давления при отжиге ионно-имплантированного  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , требует дополнительных исследований. Так или иначе, ускоренное образование центров излучательной рекомбинации в данном случае происходит лишь в областях метастабильных фаз, созданных в процессе имплантации  $\text{Ge}^+$ .

## Заключение

Нами впервые показано, что применение гидростатического давления во время отжига пленок  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , имплантированных ионами  $\text{Ge}^+$ , приводит к усилению ФЛ в видимой области спектра в  $\sim 10$  раз по сравнению с соответствующими отжигами при атмосферном давлении. Исследования кинетики ФЛ, а также зависимости ФЛ от мощности возбуждающего излучения позволяют сделать вывод о том, что рост интенсивности ФЛ в процессе отжига под давлением обусловлен ускоренным образованием центров излучательной рекомбинации в областях метастабильных фаз имплантированного оксинитрида кремния. Природа этих центров предположительно связывается с центром  $\equiv \text{Si}-\text{Si} \equiv$  и комплексами атомов Ge (типа центров  $\equiv \text{Si}-\text{Ge} \equiv$  и  $\equiv \text{Ge}-\text{Ge} \equiv$ ).

Авторы выражают благодарность В.А. Гриценко за полезное обсуждение работы. И.Е. Тыщенко благодарит Министерство науки и искусств Земли Саксония (ФРГ) за финансовую поддержку при проведении данных исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке Польским комитетом по научным исследованиям (грант № 7Т08Ф 05717).

## Список литературы

- [1] L.T. Canham. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1046 (1990).
- [2] T. Shimizu-Iwayama, K. Fujita, S. Nakao, K. Saitoh, T. Fujita, N. Itoh. *J. Appl. Phys.*, **75**, 7779 (1994).
- [3] H.A. Atwater, K.V. Shcheglow, S.S. Wong, K.J. Vahala, R.C. Flagan, M.L. Brongersma, A. Polman. *Mater. Res. Proc.*, **321**, 363 (1994).
- [4] W. Skorupa, R.A. Yankov, I.E. Tyschenko, H. Fröb, T. Böhme, K. Leo. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2410 (1996).
- [5] L.-S. Liao, X.-M. Bao, N.-Sh. Li, X.-Q. Zheng, N.-B. Min. *J. Luminesc.*, **68**, 199 (1996).
- [6] *Нитрид кремния в электронике*, под ред. А.В. Ржанова (Новосибирск, Наука, 1982) с. 198.
- [7] M.L. Green, D. Brasen, L.C. Feldman, E. Garfunkel, E.P. Gusev, T. Gustafsson, W.N. Lennard, H.C. Lu, T. Sorbsch. *NATO Advanc. Res. Workshop Proc.* (Kluwer Academic Publishers, 1997) p. 335.
- [8] П.А. Пундур, Ю.Г. Шевалгин. *АН ЛатвССР*, **26**, 58 (1985).
- [9] V.A. Gritsenko, Yu.G. Shavalgin, P.A. Pundur, H. Wong, W.M. Lau. *Microelectron. Reliab.*, **39**, 715 (1999).
- [10] L.S. Liao, Z.H. Xiong, X. Zhou, X.B. Liu, X.Y. Hou. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2193 (1997).
- [11] I.E. Tyschenko, L. Rebohle, R.A. Yankov, W. Skorupa, A. Misiuk. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1418 (1998).
- [12] И.Е. Тыщенко, В.А. Володин, Л. Реболе, М. Фельсков, В. Скорупа. *ФТП*, **33**, 559 (1999).
- [13] В.А. Гриценко. *Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП структурах* (Новосибирск, Наука, 1993) с. 280.
- [14] L. Skuja. *J. Non-Cryst. Sol.*, **239**, 16 (1998).
- [15] R. Thomon, Y. Shimogaichi, H. Mizuno, Y. Ohki, K. Nagasawa, Y. Hama. *Phys. Rev. Lett.*, **62**, 1388 (1989).

[16] O.B. Tsiok, V.V. Brazhkin, A.G. Lyapin, L.G. Khvostantsev. *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 999 (1998).

[17] V.V. Brazhkin. *J. Non-Cryst. Sol.*, **124**, 34 (1990).

Редактор Л.В. Шаронова

## The investigation of photoluminescence from $\text{Ge}^+$ -ion implanted $\text{SiO}_x\text{N}_y$ annealed under hydrostatic pressure

I.E. Tyschenko, K.S. Zhuravlev, E.N. Vandyshev, A. Misiuk<sup>+</sup>, R.A. Yankov\*, L. Rebohle<sup>≠</sup>, W. Skorupa<sup>≠</sup>

Institute of Semiconductor Physics,  
630090 Novosibirsk, Russia

<sup>+</sup> Institute of Electron Technology,  
Al. Lotnikow 46, Warsaw, Poland

\* CCR GmbH, Beschichtungstechnologie,  
TZO Rheinbreitbach, Germany

<sup>≠</sup> Institute of Ion Beam Physics and Materials  
Research, Research Center Rossendorf,  
Inc. POB 510119, D-01314 Dresden, Germany

**Abstract** The effect of hydrostatic pressure during annealing on the photoluminescence properties of  $\text{Ge}^+$ -ion implanted  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  films ( $x = 0.25$ ,  $y = 1$ ) grown on Si substrates was investigated for the first time. It is shown, that after heat treatment under hydrostatic pressure, photoluminescence intensity from ion implanted films became 10 times higher as compared to annealing under atmospheric pressure. The results obtained are interpreted in terms of enhanced formation of radiative recombination centers within metastable phase regions of ion implanted silicon oxynitride films. The nature of these centers is connected with  $\equiv \text{Si}-\text{Si} \equiv$  centers and complexes of Ge atoms ( $\equiv \text{Si}-\text{Ge} \equiv$  and  $\equiv \text{Ge}-\text{Ge} \equiv$  centers).