

Фотолюминесценция пленок Si_3N_4 , имплантированных ионами Ge^+ и Ar^+

© И.Е. Тыщенко, В.А. Володин, Л. Реболе,* М. Фельсков,* В. Скорупа*

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

*Институт ионно-лучевой физики и материаловедения, Исследовательский центр Россендорф, Дрезден, Германия

(Получена 25 августа 1998 г. Принята к печати 9 сентября 1998 г.)

Спектры эмиссии и возбуждения фотолюминесценции при комнатной температуре пленок Si_3N_4 , имплантированных ионами Ge^+ и Ar^+ , исследованы в зависимости от дозы ионов и температуры последующего отжига. Установлено, что внедрение связеобразующих атомов Ge при отжиге вплоть до температуры $T_a = 1000^\circ\text{C}$ стимулирует образование центров, излучающих в зеленой и фиолетовой областях спектра. Имплантация инертных ионов Ar^+ вносит преимущественно безызлучательные дефектные центры. Сравнительный анализ спектров фотолюминесценции данных резерфордовского обратного рассеяния и спектров комбинационного рассеяния показывает, что излучательная рекомбинация связана не с квантово-размерными эффектами в нанокристаллах Ge, а скорее с рекомбинацией на дефектах $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$, $\equiv\text{Si}-\text{Ge}\equiv$ и $\equiv\text{Ge}-\text{Ge}\equiv$.

Введение

В последнее время все больший интерес привлекает исследование термически выращенных на кристаллическом кремнии пленок диоксида кремния, имплантированных ионами Si^+ или Ge^+ [1–4], как материала, излучающего при комнатной температуре в видимой области спектра и наиболее совместимого с кремниевой интегральной технологией. Слои Si_3N_4 также широко используются при изготовлении кремниевых приборов. Этот диэлектрик обладает целым рядом замечательных свойств, которые позволяют применять его, например, в качестве маскирующих пленок, при LOCOS-технологии (локальное окисление кремния) и пр., когда необходимо снизить проникновение в активную область кремниевой пластины различных примесей [5]. При изучении оптических свойств пленок нитрида кремния, выращенных различными способами, было обнаружено несколько полос фотолюминесценции (ФЛ) в видимом диапазоне спектра, интенсивность и энергетическое положение которых несколько различались, в зависимости от способа осаждения этих пленок. Авторами работ [6–8] была обнаружена широкая полоса ФЛ в области длин волн $\lambda = 450 \div 600$ нм (энергии фотона $\hbar\omega = 2.75 \div 2$ эВ), которая возбуждается в пленках нитрида кремния, выращенного различными способами, при комнатной температуре. Увеличение энергии возбуждающего кванта от $\hbar\omega_{\text{ex}} = 4$ эВ (длина волны 310 нм) до $\hbar\omega_{\text{ex}} = 5.3$ эВ (~ 230 нм) приводит к увеличению относительной интенсивности зеленой линии по сравнению с фиолетовой [9]. При этом максимум возбуждения фиолетовой полосы наблюдается при энергиях $4.8 \div 4.6$ эВ ($260 \div 270$ нм), а зеленой сдвинут в область больших энергий — около 5.2 эВ (240 нм). Красная линия ФЛ также возбуждается при энергии ~ 4.6 эВ (~ 270 нм). Природа этих полос ФЛ до сих пор остается невыясненной. Малые времена релаксации этих полос ФЛ ($10^{-7} \div 10^{-8}$ с) указывают на внутрицентровый характер

переходов. В литературе высказывается предположение о связи всех этих полос ФЛ с Si–Si-дефектами в нитриде кремния [7,10]. Однако для подтверждения гипотезы необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

В литературе иногда высказываются мнения о преимуществах пленок Si_3N_4 по сравнению с SiO_2 для создания светоизлучающих материалов на основе кремния [11]. Однако данные о создании таких материалов и исследование их свойств практически отсутствуют. Ранее нами была обнаружена мощная полоса фиолетовой фото- и электролюминесценции пленок SiO_2 , имплантированных ионами Ge^+ [12], природа которой связывалась нами с центрами $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$ и $\equiv\text{Ge}-\text{Si}\equiv$ в сетке диоксида кремния. Сведений о модификации оптических свойств нитрида кремния под действием ионной бомбардировки в настоящее время в литературе практически нет. Такие исследования позволили бы, с одной стороны, получить информацию о возможности практического применения их в качестве источников излучения, а с другой стороны, прояснить природу наблюдаемых полос фотолюминесценции. В данной работе с целью выяснения вклада собственных дефектов, генерированных ионной имплантацией, а также связеобразующих атомов в процессы формирования светоизлучающих центров в нитриде кремния, мы провели исследование ФЛ при комнатной температуре выращенных на пластинах монокристаллического кремния пленок Si_3N_4 , имплантированных ионами Ar^+ и Ge^+ .

Методика экспериментов

Исходные подложки представляли собой пластины монокристаллического кремния n -типа проводимости с удельным сопротивлением $3 \div 10$ Ом · см ориентации {100}. Слои Si_3N_4 толщиной 300 нм были напылены в реакторе пониженного давления из смеси $\text{NH}_3 + \text{SiH}_2\text{Cl}_2$ при температуре 775°C . Перед осаждением нитрида

кремния на кремниевых пластинах был выращен переходный слой окисла толщиной 25 нм. Имплантация пленок нитрида кремния проводилась ионами Ge^+ с энергией 150 кэВ, либо ионами Ar^+ с энергией 100 кэВ. Дозы ионов в каждом случае были $0.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (малая доза — LD), $1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (средняя доза — MD) и $4.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (высокая доза — HD). Параметры ионов выбирались таким образом, чтобы максимум их распределения находился внутри пленки нитрида кремния, а максимальные концентрации внедренных атомов при соответствующих дозах были равными. Температура подложки во время облучения во всех случаях поддерживалась $-(145 \div 155)^\circ\text{C}$ за счет охлаждения жидким азотом. Плотность ионного тока составляла $0.5 \div 1.0 \text{ мкА/см}^2$. Последующие отжиги проводились при температурах $T_a = 400 \div 1300^\circ\text{C}$ в течение 30 мин в атмосфере N_2 . Спектры ФЛ и спектры возбуждения ФЛ измерялись при комнатной температуре на установке "Spex Fluoromax". Источником возбуждающего излучения служила ультрафиолетовая лампа, нужная длина волны выделялась монохроматором. Распределение внедренных атомов исследовалось методом резерфордского обратного рассеяния (RBS) ионов He^+ с энергией 1.7 МэВ. Структурные изменения в ионно-имплантированных слоях контролировались методом комбинационного рассеяния.

Результаты

На рис. 1 представлены спектры ФЛ пленок Si_3N_4 имплантированных LD-ионами Ge^+ и отожженных при температурах $600 \div 1200^\circ\text{C}$. Здесь же представлен спектр ФЛ от исходного, не имплантированного нитрида кремния. Спектры возбуждались излучением с длиной волны $\lambda_{\text{ex}} = 350 \text{ нм}$ ($\hbar\omega_{\text{ex}} \approx 3.5 \text{ эВ}$). Видно, что уже в неимплантированном нитриде кремния возбуждается видимая ФЛ при комнатной температуре. При этом основной пик ФЛ находится в фиолетовой области спектра с максимумом вблизи $\lambda = 380 \text{ нм}$ ($\hbar\omega \approx 3.2 \text{ эВ}$). В зеленой области спектра также наблюдается широкий пик вблизи $\lambda = 520 \text{ нм}$ ($\hbar\omega \approx 2.4 \text{ эВ}$). Интенсивность этого пика лишь в 2 раза меньше интенсивности фиолетовой полосы ФЛ. Ионная имплантация Ge^+ приводит к гашению этих полос ФЛ. Последующие отжиги вновь восстанавливали интенсивность фиолетовой и зеленой ФЛ. Так, отжиг слоев, имплантированных ионами Ge^+ , приводил к тому, что уже после $T_a = 600^\circ\text{C}$ интенсивность как зеленого, так и фиолетового пиков превышала их исходные значения и продолжала расти с увеличением T_a вплоть до 1000°C . Энергетическое положение зеленого пика ФЛ при этом оставалось практически неизменным, а фиолетовый пик имел некоторое коротковолновое смещение. Дальнейшее увеличение T_a до 1200°C вновь приводило к падению интенсивности ФЛ ниже исходного значения с дальнейшим смещением фиолетового пика в сторону коротких волн. Несколько иное поведение в зависимости от T_a обнаруживают спектры ФЛ пленок нитрида кремния, имплантированных ионами Ar^+ (рис. 2). В

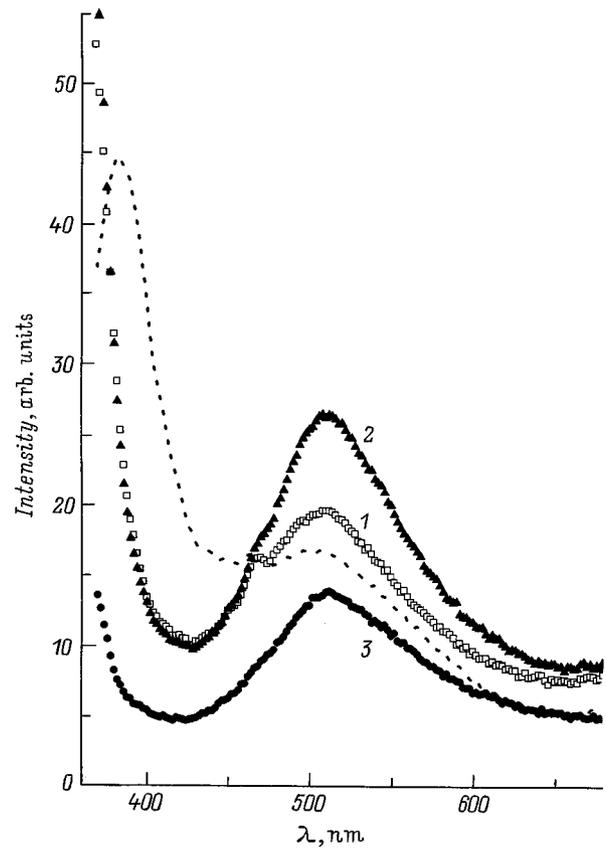


Рис. 1. Спектры ФЛ пленок Si_3N_4 до (штриховая линия) и после имплантации ионов Ge^+ , 150 кэВ, дозой $0.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (LD) и отжигов при $T_a = 600$ (1), 1000 (2) и 1200°C (3) в течение 30 мин в атмосфере N_2 . Длина волны возбуждающего излучения $\lambda_{\text{ex}} = 350 \text{ нм}$.

этом случае до исходного значения в процессе отжига восстанавливалась лишь интенсивность зеленой полосы ФЛ, причем максимальный эффект достигался при $T_a = 600^\circ\text{C}$. Фиолетовая ФЛ в этом случае оставалась подавленной. Такое поведение в зависимости от T_a спектры ФЛ нитрида кремния, имплантированного ионами Ar^+ , проявляли независимо от дозы ионов (см. вставку на рис. 2). В то же время при имплантации ионов Ge^+ увеличение дозы ионов сопровождалось гашением интенсивности ФЛ во всем исследованном диапазоне длин волн. На рис. 3 спектры ФЛ для трех доз ионов Ge^+ представлены после отжига образцов при 1000°C . Подобные зависимости наблюдались нами как до, так и после отжигов при различных температурах.

На рис. 4 представлены спектры возбуждения пиков фиолетовой и зеленой ФЛ исходного нитрида кремния, а также нитрида, имплантированного LD-ионами Ge^+ и отожженного при 1000°C . Интересно отметить, что спектры возбуждения как фиолетовой, так и зеленой полос ФЛ имеют одинаковый вид, причем как для неимплантированного, так и для имплантированного Si_3N_4 . Во всех указанных случаях в спектрах возбуждения

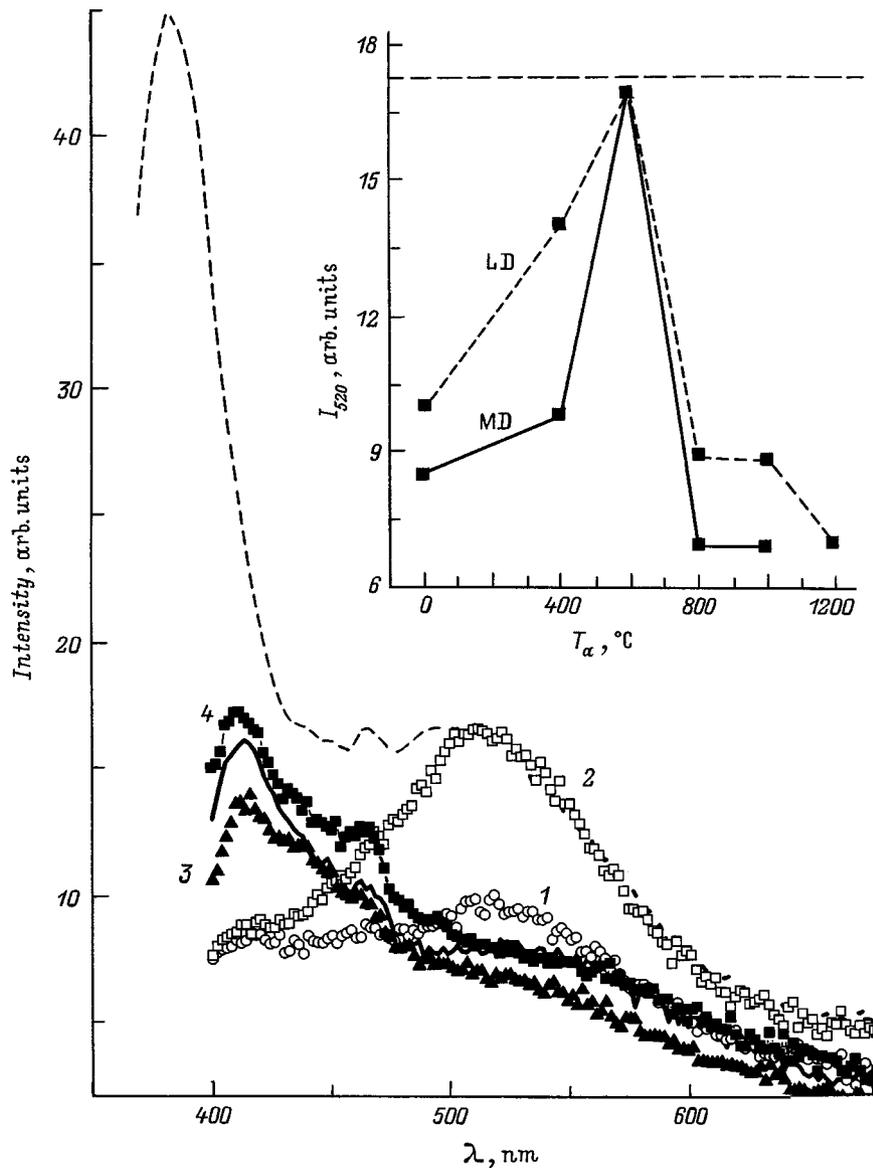


Рис. 2. Спектры ФЛ пленок Si_3N_4 , неимплантированной (штриховая линия) и имплантированных ионами Ag^+ , 100 кэВ, дозой $1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (MD) до (сплошная линия) и после отжига при $T_a = 400$ (1), 600 (2), 1000 (3) и 1200°C (4) в течение 30 мин в атмосфере N_2 . Длина волны возбуждающего излучения $\lambda_{\text{ex}} = 350 \text{ нм}$. На вставке — зависимость интенсивности ФЛ в максимуме при $\lambda = 520 \text{ нм}$ (I_{520}) от температуры отжига для доз $0.5 \cdot 10^{16}$ (LD) и $1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (MD); горизонтальная штриховая линия — интенсивность ФЛ неимплантированного Si_3N_4 .

ФЛ регистрируются максимумы вблизи $\lambda_{\text{ex}} = 270 \text{ нм}$ ($\hbar\omega_{\text{ex}} \simeq 4.6 \text{ эВ}$), 310 нм ($\sim 4.0 \text{ эВ}$) и 390 нм ($\sim 3.2 \text{ эВ}$).

С целью выяснения закономерностей формирования светоизлучающих центров мы исследовали методом RBS профили распределения имплантированного германия по глубине d до и после отжига при $T_a = 400 \div 1300^\circ\text{C}$. Эти профили представлены на рис. 5 для случая HD-ионов Ge^+ . Видно, что вплоть до $T_a = 1200^\circ\text{C}$ не происходит никакого диффузионного перемещения имплантированных атомов в нитриде кремния, и лишь отжиг при $T_a = 1300^\circ\text{C}$ ведет к перераспределению германия по всей толщине пленки. При этом основной максимум распределения смещается с глубины, соответствующей

проецированному пробегу R_p , на глубину $\sim 170 \text{ нм}$, соответствующую приблизительно границе между первоначально имплантированной и неимплантированной областями пленки Si_3N_4 . Частично германий накапливается на границе раздела SiO_2/Si .

Структурные свойства слоев мы изучали с помощью комбинационного рассеяния. На рис. 6 показаны спектры от пленок, имплантированных ионами Ge^+ , после отжига при температурах 600, 1000 и 1300°C в течение 30 мин. Эти спектры были сняты в геометрии $Z(\text{XY})\bar{Z}$, где X, Y, Z — оси, соответствующие направлениям (100), (010) и (001). Вплоть до $T_a = 1000^\circ\text{C}$ в спектрах комбинационного рассеяния не выявлено никаких особенностей по

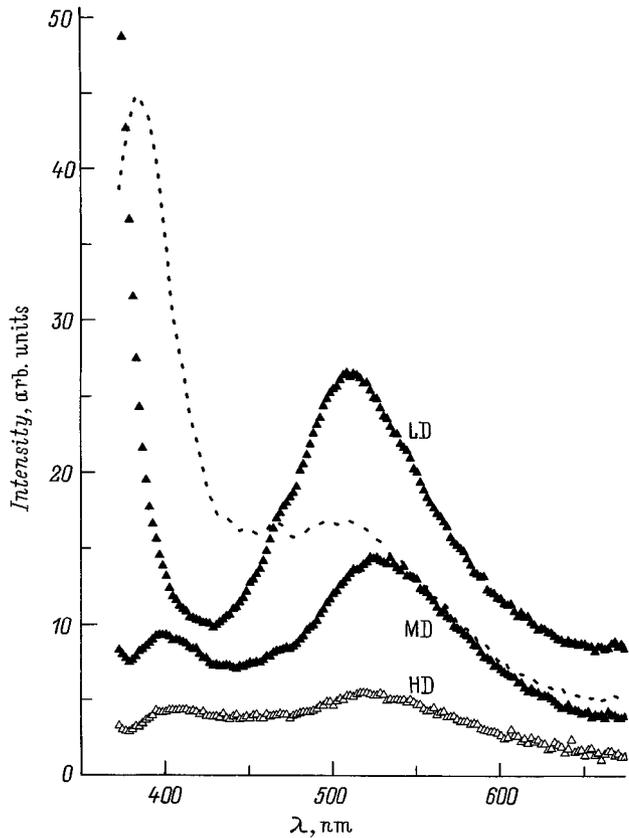


Рис. 3. Спектры ФЛ пленок Si_3N_4 до (штриховая линия) и после имплантации ионов Ge^+ , 150 кэВ, дозами $0.5 \cdot 10^{16}$ (LD), $1.4 \cdot 10^{16}$ (MD), $4.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (HD) и отжига при $T_a = 1000^\circ\text{C}$ в течение 30 мин в атмосфере N_2 . Длина волны возбуждающего излучения $\lambda_{\text{ex}} = 350 \text{ нм}$.

сравнению со спектрами исходного неимплантированного Si_3N_4 . Лишь отжиг при 1300°C приводит к формированию несимметричного пика с основным максимумом вблизи 300 см^{-1} , соответствующего кристаллическому германию, а также плеча в интервале волновых чисел $-(295 \div 280) \text{ см}^{-1}$, природа которого до конца не ясна. Возможны три различные причины возникновения плеча: во-первых, наличие фазы аморфных включений Ge; во-вторых, формирование более мелких германиевых нанокристаллов; в-третьих, граница раздела нанокристаллический германий–нитрид кремния.

Обсуждение

Наблюдаемые нами полосы фиолетовой и зеленой ФЛ наблюдались ранее на неимплантированном Si_3N_4 , синтезированном различными способами. Однако, как уже было отмечено во введении, природа этих полос остается невыясненной. В наших экспериментах ионная бомбардировка как ионами Ar^+ , так и ионами Ge^+ гасила эти полосы ФЛ, а последующий отжиг приводил к восстановлению или даже усилению их интенсивности.

Это означает, что ионная имплантация нитрида кремния в сочетании с последующим отжигом вводит как излучательные, так и безызлучательные центры рекомбинации. Эти центры могут быть связаны как с дефектами, генерируемыми ионной бомбардировкой, так и с наличием высоких концентраций избыточных атомов Ge в матрице Si_3N_4 . Важным экспериментальным фактом является сходство спектров возбуждения фиолетовой и зеленой полос ФЛ и их одинаковое поведение после имплантации ионов Ge^+ и последующем отжиге. Наблюдаемое подобие спектров возбуждения нельзя отнести, например, к возможному проявлению эффекта интерференции в пленках нитрида кремния. Аналогичные пики в спектрах возбуждения фиолетовой, зеленой и красной полос ФЛ неимплантированных пленок Si_3N_4 , выращенных другими методами и имеющих различные толщины, наблюдались и ранее в работах [6,13]. В наших экспериментах интенсивность зеленого и фиолетового пиков ФЛ растет одновременно с повышением T_a вплоть до 1000°C . Практически неизменны при этом и спектры их возбуждения. Это указывает на связь полос с одним и тем же рекомбинационным центром. С другой стороны, не вызывает сомнений роль атомов Ge в образовании этих центров. Сопоставление данных по зависимости интенсивности ФЛ от дозы ионов Ge^+ (рис. 2) и результатов комбинационного рассеяния (рис. 4) показывает, что центры, излучающие в фиолетовой и зеленой областях спектра, не связаны с нанокристаллами Ge и могут содержать в своей структуре лишь минимальное количество атомов германия. Кроме того, данные RBS свидетельствуют о том, что эти светоизлучающие центры формируются не за счет диффузионного стягивания атомов Ge, а путем перестройки ближнего порядка в матрице Si_3N_4 , например, через перестройку связей между ближайшими атомами. При этом роль атомов водорода в структуре данного центра, на которую указывается автором работы [10], маловероятна. В пользу сказанного свидетельствует тот факт, что интенсивность фиолетового и зеленого пиков ФЛ продолжает расти вплоть до $T_a = 1000^\circ\text{C}$. При столь высоких температурах присутствие водорода в пленках Si_3N_4 маловероятно. Наиболее вероятным источником наблюдаемых нами полос ФЛ мог бы служить, например, центр, который по аналогии с кислородной вакансией в SiO_2 можно связать с центром $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$ в структуре нитрида кремния. Действительно, предположение о существовании таких центров было высказано в работе [14] при исследовании нестехиометрического нитрида кремния с избытком Si, а также в работе [15] при изучении оптического края поглощения нитрида кремния, имплантированного ионами бора. Формирование этих центров происходит за счет рекомбинации трехкоординированных атомов $\equiv\text{Si}\bullet$ при температурах последующего отжига $T_a \approx 600^\circ\text{C}$. При этих же температурах наиболее эффективным должен быть процесс образования связей $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$ [16] и соответствующее увеличение интенсивности зеленой и фиолетовой ФЛ. Однако в наших экспериментах после имплантации ионов Ar^+ , когда в матрице нитрида

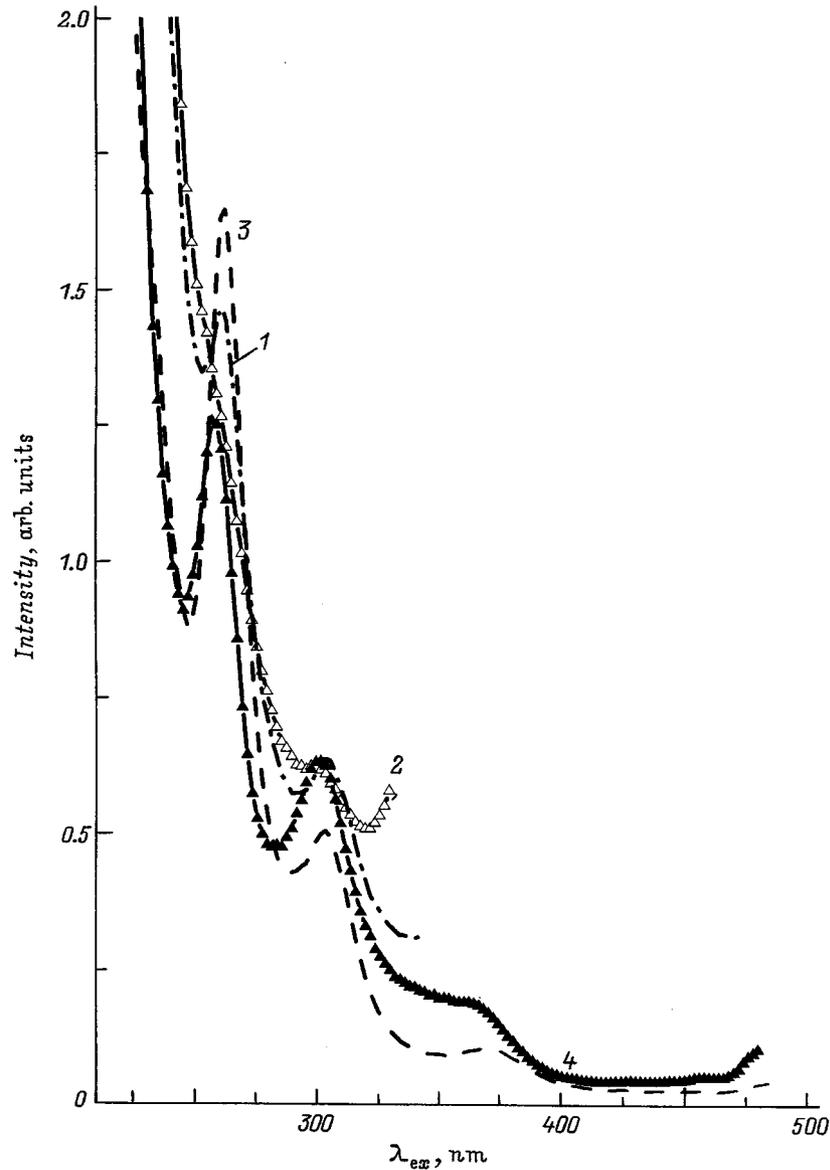
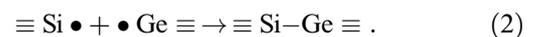


Рис. 4. Спектры возбуждения фиолетового (1, 2) и зеленого (3, 4) пиков ФЛ пленок Si_3N_4 до (1, 3) и после (2, 4) имплантации ионов Ge^+ , 150 кэВ, дозой $0.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (LD) и отжига при $T_a = 1000^\circ\text{C}$ в течение 30 мин в атмосфере N_2 . Длина волны ФЛ λ , нм: 1 — 380, 2 — 368, 3 — 520, 4 — 510.

кремния отсутствуют избыточные связеобразующие атомы, мы наблюдали восстановление лишь зеленой ФЛ в процессе отжига дефектов, фиолетовая ФЛ при этом не восстанавливалась. Этот факт можно было бы трактовать в пользу различной природы зеленой и фиолетовой ФЛ, однако возможно и другое объяснение наблюдаемого эффекта. Присутствующие в нитриде кремния атомы или комплексы атомов, не связанные с атомами матрицы, такие как атомы и пузырьки Ag , могут вносить дополнительные уровни безызлучательной рекомбинации, что снижает в первую очередь вероятность излучательных переходов, приводящих к ФЛ в фиолетовой области спектра. Вместе с тем присутствие связеобразующих атомов Ge в матрице Si_3N_4 способствует при отжиге

формированию в большей степени излучательных рекомбинационных центров. Интересно отметить, что в неимплантированных пленках нитрида кремния отжиг уже при $T_a = 900^\circ\text{C}$ в течение 30 мин приводил к уменьшению интенсивности зеленого пика ФЛ ($\lambda \approx 520 \text{ нм}$) в 2 раза [17]. Процесс образования светоизлучающих центров с участием избыточных атомов Ge оказывается сдвинутым в сторону более высоких температур отжига и может идти по схеме



Аналогичным образом может происходить и формирование центров $\equiv \text{Ge}-\text{Ge} \equiv$. Однако удивительным остается

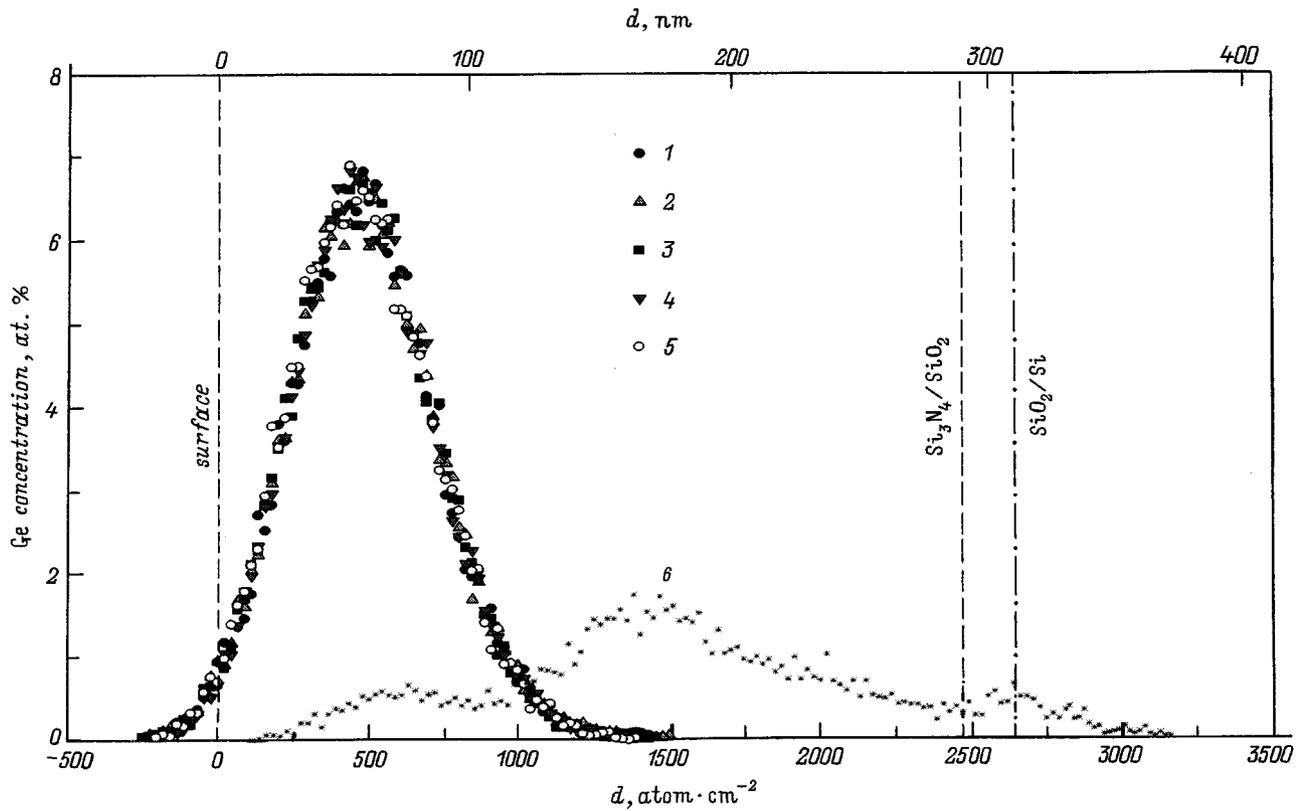
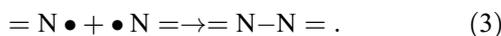


Рис. 5. Профили распределения германия в пленках Si_3N_4 , имплантированных ионами Ge^+ , 150 кэВ, дозой $4.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (HD) до (1) и после отжига при $T_a = 600$ (2), 800 (3), 1000 (4), 1200 (5) и 1300°C (6) в течение 30 мин в атмосфере N_2 , полученные методом резерфордского обратного рассеяния ионов He^+ с энергией 1.7 МэВ.

ся тот факт, что максимум зеленой ФЛ при внедрении атомов Ge в сетку нитрида кремния не сдвигается по шкале энергий по сравнению с пиком ФЛ от неимплантированного нитрида кремния, а также имплантированного ионами аргона. Это наталкивает на мысль о возможной связи между локализованными состояниями центров $\equiv \text{Si}-\text{Si} \equiv$, $\equiv \text{Si}-\text{Ge} \equiv$ и $\equiv \text{Ge}-\text{Ge} \equiv$ с уровнями, обусловленными, например, азотными комплексами. Это предположение ранее высказывалось авторами работы [7]. В нашем случае это также могло бы объяснить не только постоянство энергии зеленого пика ФЛ, но и рост интенсивности этого пика при наличии избыточной концентрации атомов Ge в сетке Si_3N_4 , которое в процессе образования центров $\equiv \text{Si}-\text{Ge} \equiv$ и $\equiv \text{Ge}-\text{Ge} \equiv$ ведет и к увеличению чисто азотных комплексов. На основе данных электронного парамагнитного резонанса, свидетельствующих об отсутствии парамагнитных центров при отжиге облученного аморфного нитрида кремния, в работе [15] высказано предположение о том, что дефекты $= \text{N} \bullet$ также спариваются друг с другом по реакции



Однако связь $\text{N}-\text{N}$ в нитриде кремния нестабильна уже при температурах $700 \div 800^\circ\text{C}$ [10], в то время как в наших экспериментах максимум ФЛ наблюдался после

$T_a = 1000^\circ\text{C}$. Наиболее вероятное объяснение постоянства энергетического положения пика зеленой ФЛ при введении в матрицу Si_3N_4 связеобразующих атомов Ge может состоять в том, что атомы германия, замещая при отжиге атомы кремния в сетке нитрида кремния по схеме (1) и (2), способствуют увеличению числа несвязанных атомов кремния, образующих затем связи $\equiv \text{Si}-\text{Si} \equiv$, ответственные за наблюдаемые нами полосы ФЛ. Однако это предположение требует дополнительных экспериментальных подтверждений.

Заключение

Исследованы спектры ФЛ и возбуждения ФЛ при комнатной температуре пленок Si_3N_4 , имплантированных ионами Ge^+ и Ar^+ , в зависимости от дозы ионов и температуры последующего отжига. Наряду с оптическими свойствами, методами RBS и комбинационного рассеяния изучены процессы перераспределения внедренных атомов и связанные с ними структурные изменения в имплантированных пленках нитрида кремния. Установлено, что ионная имплантация в сочетании с последующим отжигом приводит к формированию как излучательных, так и безызлучательных центров рекомбинации. Имплантация ионов Ar^+ формирует лишь безызлучатель-

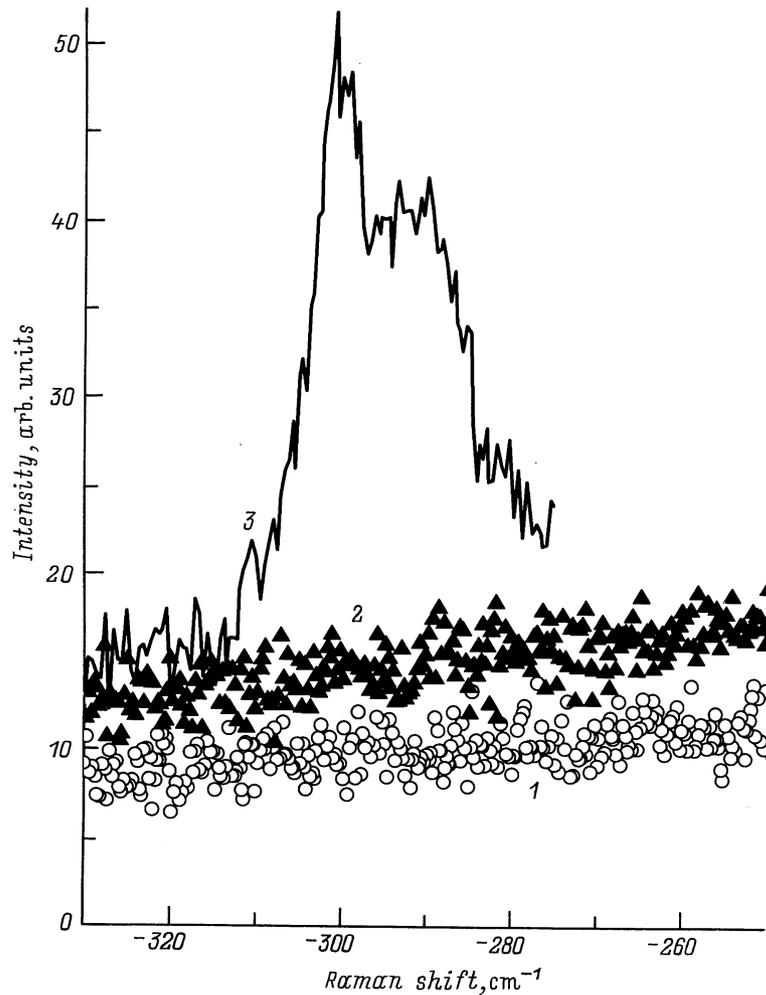


Рис. 6. Спектры комбинационного рассеяния пленок Si_3N_4 , имплантированных ионами Ge^+ , 150 кэВ, дозой $4.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (HD) после отжига при $T_a = 600$ (1), 1000 (2) и 1300°C (3) в течение 30 мин в атмосфере N_2 .

ные дефектные центры, отжиг которых происходит при $T_a \approx 600^\circ\text{C}$. Формирование центров, излучающих в зеленой ($\lambda \approx 520 \text{ нм}$) и фиолетовой ($\lambda \approx 380 \text{ нм}$) областях спектра, стимулируется присутствием в матрице Si_3N_4 связеобразующих атомов Ge. Интенсивность ФЛ при этом убывает с увеличением дозы Ge^+ и растет с температурой отжига вплоть до 1000°C . Характер дозовой зависимости, а также отсутствие перераспределения атомов Ge и изменений в спектрах комбинационного рассеяния при $T_a \leq 1000^\circ\text{C}$ указывает на то, что центры зеленой и фиолетовой ФЛ не связаны с нанокристаллами Ge и формируются благодаря перестройке связей между ближайшими атомами. Наиболее вероятным их источником являются центры $\equiv \text{Si}-\text{Si} \equiv$, $\equiv \text{Si}-\text{Ge} \equiv$ и $\equiv \text{Ge}-\text{Ge} \equiv$. Обсуждаются возможные механизмы рекомбинации, благодаря которым происходит наблюдаемый рост интенсивности зеленой полосы ФЛ при неизменном положении энергетического положения ее максимума по сравнению с неимплантированными Ge^+ пленками Si_3N_4 .

Авторы выражают благодарность В.А. Гриценко за полезное обсуждение работы, а также Х. Фрёбу за помощь при проведении измерений спектров фотолюминесценции. И.Е. Тыщенко благодарит Министерство науки и искусств Земли Саксония (ФРГ) за финансовую поддержку при проведении данных исследований.

Список литературы

- [1] T. Shimizu-Iwayama, K. Fujita, S. Nakao, K. Saitoh, T. Fujita, N. Itoh. *J. Appl. Phys.*, **75**, 7779 (1994).
- [2] H.A. Atwater, K.V. Shcheglow, S.S. Wong, K.J. Vahala, R.C. Flagan, M.L. Brongersma, A. Polman. *Mater. Res. Soc. Proc.*, **321**, 363 (1994).
- [3] W. Skorupa, R.A. Yankov, I.E. Tyschenko, H. Fröb, T. Böhme, K. Leo. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2410 (1996).
- [4] L.-S. Liao, X.-M. Bao, N.-Sh. Li, X.-Q. Zheng, N.-B. Min. *J. Luminesc.*, **68**, 199 (1996).
- [5] *Нитрид кремния в электронике*, под ред. А.В. Ржанова (Новосибирск, Наука, 1982) с. 198.

- [6] V.V. Vasilev, Д.Г. Есаев, С.П. Синеца. ЖТФ, **52**, 795 (1982).
- [7] П.А. Пундур, Ю.Г. Шевалгин. Изв. АН ЛатвССР, **5**, 74 (1985).
- [8] V.G. Baru, S. Bayliss, A.P. Chernushich, M.I. Elinson, P. Harris, V.A. Jitov, V.I. Pokalyakin, G.V. Stepanov, L.Yu. Zaharov. Microelectron. Eng., **36**, 111 (1997).
- [9] V.V. Vasilev, I.P. Mikhailovskii, K.K. Svitasev. Phys. St. Sol. (a), **95**, K37 (1986).
- [10] В.А. Гриценко. *Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП структурах* (Новосибирск, Наука, 1993) с. 280.
- [11] V.A. Volodin, M.D. Efremov, V.A. Gritsenko. Sol. St. Phenomena, **57-58**, 501 (1997).
- [12] L. Rebohle, J. von Borany, R. Grotzschel, A. Markwitz, B. Schmidt, I.E. Tyschenko, W. Skorupa, H. Fröb, K. Leo. Appl. Phys. Lett., **71**, 19 (1997).
- [13] П.А. Пундур, Ю.Г. Шевалгин. Журн. прикл. спектроскопии, **5**, 843 (1986).
- [14] H.J. Stein. J. Appl. Phys., **47**, 3421 (1976).
- [15] В.А. Гриценко, А.В. Ржанов, С.П. Синеца, В.И. Федченко, Г.Н. Феофанов. ДАН СССР, **287**, 1381 (1986).
- [16] В.А. Гриценко, П.А. Пундур. ФТТ, **28**, 3239 (1986).
- [17] V.V. Vasilev, I.P. Mikhailovskii. Phys. St. Sol. (a), **90**, 355 (1985).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoluminescence from Si_3N_4 films implanted with Ge^+ and Ar^+ ions

I.E. Tyschenko, V.A. Volodin, L. Rebohle,*
M. Voelskov,* W. Skorupa*

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

*Institute of Ion Beam Physics and Materials Research,
Research Centre Rossendorf,
Inc. POB 510119, D-013014 Dresden, Germany

Abstract Room temperature emission and excitation photoluminescence spectra from Si_3N_4 films implanted with Ge^+ and Ar^+ ions were investigated as a function of the ion dose and annealing temperature. Implantation of Ge^+ ions and subsequent annealing up to $T_a = 1000^\circ\text{C}$ stimulated the formation of green- and violet-light-emitting centres, while Ar^+ ion bombardment created the non-radiative defect centres. Comparative analysis of results obtained with photoluminescence measurements, Rutherford back-scattering, and Raman spectroscopy shows that the sources of green and violet photoluminescence are associated with $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$, $\equiv\text{Si}-\text{Ge}\equiv$ and $\equiv\text{Ge}-\text{Ge}\equiv$ centers rather than with a quantum-confinement effect in Ge nanocrystals.

Fax: (382-2)332771(Tyschenko)
E-mail: tys@isp.nsc.ru(Tyschenko)