

09,12

Проявление квантоворазмерных эффектов в нанокристаллах и аморфных нанокластерах германия в пленках GeSixOy

© М.П. Гамбарян¹, Г.К. Кривякин^{1,2}, С.Г. Черкова¹, М. Stoffel³, Н. Rinnert³, М. Vergnat³, В.А. Володин^{1,2,¶}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Université de Lorraine, Institut Jean Lamour UMR CNRS 7198 B.P. 70239, 54506 Vandoeuvre-lés-Nancy, Cedex, France

¶ E-mail: volodin@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 25 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 23 октября 2019 г.

Принята к публикации 23 октября 2019 г.

Пленки нестехиометрических германосиликатных стекол двух типов $\text{GeO}_x[\text{SiO}]_{(1-x)}$ и $\text{GeO}_x[\text{SiO}_2]_{(1-x)}$ были получены высоковакуумным испарением порошков GeO_2 и SiO либо SiO_2 , и напылением на холодную подложку Si (001). Исходные и подвергнутые отжигам (550 и 650°C, 1 h) образцы исследовали методами ИК-спектроскопии, электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ). Из анализа спектров КРС установлено, что в отличие от исходной пленки $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$, пленка $\text{GeO}[\text{SiO}]$ изначально содержала кластеры аморфного германия. По данным электронной микроскопии размер кластеров составлял ~ 3 нм. ИК-спектроскопия показала наличие в пленках связей Si–O, Ge–O и Si–O–Ge. После отжига 550°C в обеих пленках были обнаружены кластеры аморфного германия, а после отжига 650°C в них появляются нанокристаллы германия. В исходных пленках при низких температурах наблюдалась широкая полоса ФЛ с максимумом 1050 nm, вероятно, обусловленная дефектами — вакансиями кислорода и избыточными атомами германия. Отжики вызывают трансформацию структуры пленок и меняют вид спектров ФЛ. В пленках, содержащих нанокластеры германия, наблюдается ФЛ с максимумом 1400–1600 nm. При этом уменьшился сигнал ФЛ от дефектов. Исследована температурная зависимость интенсивности пиков ФЛ, она падала с ростом температуры, но сохранялась при температурах до 200 K. Обсуждается вклад в ФЛ от нанокристаллов германия, формируемых при отжигах.

Ключевые слова: германосиликатные стекла, нанокластеры германия, фотолюминесценция, квантоворазмерный эффект.

DOI: 10.21883/FTT.2020.03.49010.600

1. Введение

Нанокристаллы и аморфные нанокластеры кремния и германия в диэлектрических пленках представляют собой квантовые точки, и интересны с фундаментальной точки зрения, а также перспективны для нано- и оптоэлектроники [1,2]. Их свойствами можно управлять, используя квантово-размерные эффекты. Применение оптических линий связи (вместо электрических проводников) для передачи данных внутри чипа приведет к росту быстродействия микропроцессоров. В 2015 г. был создан микропроцессор, с полностью оптической связью [3], однако инфракрасное (ИК) излучение вводилось в него от внешнего источника.

Вследствие своей непрямоугольной структуры объемный германий (Ge) не может излучать свет с высокой эффективностью. Исследователи пытаются использовать ряд подходов для преодоления этого фундаментального ограничения, такие как смягчение правил отбора по квазиимпульсу в квантоворазмерных нанокластерах [4–7]; приложение деформаций, изменяющих зонную струк-

туру [8–10]; создание светоизлучающих дефектов [11–13]; создание наночастиц $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ [14–20]. В то время как нанокристаллы (НК) кремния хорошо изучены, НК Ge изучались не столь интенсивно, хотя они обладают преимуществами. Например, температура кристаллизации германия ниже, чем у кремния, что позволяет снизить термический бюджет процессов [19–22].

Недавно в пленках германосиликатного нестехиометрического стекла GeSixO_y была обнаружена фотолюминесценция в ИК-диапазоне, предположительно обусловленная дефектами [13]. В настоящей работе для получения светоизлучающих дефектов и нанокластеров Ge мы использовали печные отжики пленок $\text{GeO}_x[\text{SiO}]_{(1-x)}$ и $\text{GeO}_x[\text{SiO}_2]_{(1-x)}$, полученные сораспылением соответствующих мишеней в высоком вакууме и осаждением на подложки, находящиеся при температуре 100°C.

2. Описание эксперимента

Пленки нестехиометрических германосиликатных стекол двух типов $\text{GeO}_x[\text{SiO}]_{(1-x)}$ и $\text{GeO}_x[\text{SiO}_2]_{(1-x)}$

были получены путем совместного испарения электронными пучками мишеней GeO_2 и SiO (либо GeO_2 и SiO_2) в высоком вакууме (10^{-8} Torr) и осаждения на подложках Si (001), находящихся при температуре 100°C . Скорость осаждения каждого материала контролировалась с применением датчика кварцевого микробаланса, молярная доля компонентов (стехиометрический параметр x) зависела от отношения скоростей осаждения материалов. Известно, что при испарении мишени GeO_2 на подложку осаждается слой GeO_y , со стехиометрическим параметром y равном примерно 1–1.1 [21–24]. По-видимому, это связано с большой летучестью монооксида германия и его не такой высокой (как у субоксидов кремния) химической активностью (скорость химической реакции его окисления до диоксида в присутствии дополнительного кислорода не так высока, как у монооксида кремния). Толщина пленок составляла ~ 400 nm, они покрывались защитным слоем SiO_2 толщиной 10 nm. Были осаждены слои с параметром $x \sim 0.5$. Затем образцы отжигали в атмосфере аргона при температурах 550 и 650°C , время отжига составляло 1 h.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) использовалась для анализа структуры образцов. Спектры КРС регистрировались в геометрии обратного рассеяния, источником возбуждения являлась линия Ar^+ лазера с длиной волны 514.5 nm. Использовался спектрометр T64000 (Horiba Jobin Yvon) в одинарной моде, спектральное разрешение было не хуже 2 cm^{-1} . Образцы также были исследованы с помощью инфракрасной фурье-спектроскопии поглощения (FTIR), применялся спектрометр ФТ-801 (производство ООО НПФ „СИМЕКС“, Новосибирск) со спектральным разрешением 4 cm^{-1} . Оптические свойства отожженных образцов были исследованы с помощью спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ). He–Cd-лазер (длина волны излучения 325 nm) использовался для возбуждения ФЛ. Для исследования низкотемпературной ФЛ применялся гелиевый криостат с точностью установки температуры ± 1 K. Спектры ФЛ в ИК диапазоне измеряли с помощью монохроматора, снабженного решеткой 600 lines/mm, и охлаждаемым жидким азотом InGaAs-диодом в качестве детектора. Спектры ФЛ не были скорректированы с учетом спектральной чувствительности детектора, длинноволновый край порога чувствительности составлял 1600 nm. Для исследования ФЛ в видимом диапазоне при комнатной температуре в качестве детектора использовался фотоэлектрический умножитель.

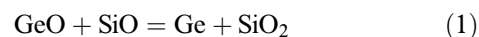
Структурные свойства образцов были исследованы с помощью электронного микроскопа (JEM-2200FS, ускоряющее напряжение 200 kV) в режиме просвечивающей высоко разрешающей электронной микроскопии (ПВРЭМ, High resolution transmittance electron microscopy — HRTEM). Образцы для исследования ПВРЭМ в поперечном сечении (cross-section) получали механической полировкой с использованием микроскопа

Leica EM TXP с последующим утонением ионным пучком.

3. Результаты и обсуждение

Так как мощность испарителей была выбрана так, чтобы скорость осаждения компонент была одинаковой, стехиометрический параметр x пленок составлял ~ 0.5 . В дальнейшем мы будем обозначать их как $\text{GeO}[\text{SiO}]$ и $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$.

На рис. 1 *a, b* приведена эволюция спектров КРС образцов в процессе отжига. Все спектры были измерены при комнатной температуре. Чтобы избежать нагрева пленки, лазерный луч был слегка расфокусирован, диаметр пятна составлял $10\ \mu\text{m}$, мощность излучения на поверхности составляла $\sim 1\text{ mV}$. Поскольку исходные пленки были полупрозрачны, то в их спектрах проявлялись особенности, связанные с КРС от подложки монокристаллического кремния. Известно, что двухфононное рассеяние на монокристаллическом кремнии имеет ряд особенностей. Это широкий пик с максимумом 305 cm^{-1} , обусловленный рассеянием на двух поперечных акустических фонах (2-ТА пик) [25], который проявляется в виде очень слабой особенности в спектре 1 на рис. 1, *a*. Других особенностей в спектре исходной пленки $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$ нет, значит в ней отсутствуют связи Ge–Ge. В спектре исходного образца $\text{GeO}[\text{SiO}]$ (кривая 1 на рис. 1, *b*) присутствует широкий пик (с максимумом $\sim 275\text{ cm}^{-1}$), связанный с рассеянием на оптических колебаниях в аморфном германии [27]. Значит, даже при относительно низкой температуре осаждения, происходит реакция



Это наблюдалось нами ранее [27]. Как показали отжиги, не весь монооксид германия прореагировал с образованием кластеров германия.

Видно, что отжиги при температуре 550°C приводят к росту сигнала от аморфного германия для пленки $\text{GeO}[\text{SiO}]$ (кривая 2 на рис. 1, *b*) и к возникновению данного пика для пленки $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$ (кривая 2 на рис. 1, *a*). Проявляется также слабая особенность (180 cm^{-1}), связанная с рассеянием на оптических колебаниях связей Ge–Ge продольного типа. Очевидно, отжиги способствуют собиранию германия в кластеры, растет их количество и размеры. После отжига при температуре 650°C в спектрах возник узкий пик (с положением $\sim 300\text{ cm}^{-1}$), характерный для кристаллического германия [28]. Сдвиг его положения в сравнении с пиком от монокристаллического германия (кривая 4 на рис. 1 *a, b*), говорит о том, что оптические фононы локализованы в НК Ge. Итак, при температуре 650°C в обеих пленках формируются НК Ge, причем в пленке $\text{GeO}[\text{SiO}]$ (кривая 3 на рис. 1, *b*) доля аморфной фазы германия заметно больше чем в пленке $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$ (кривая 3 на рис. 1, *a*). Экспериментальные спектры КРС были разложены на

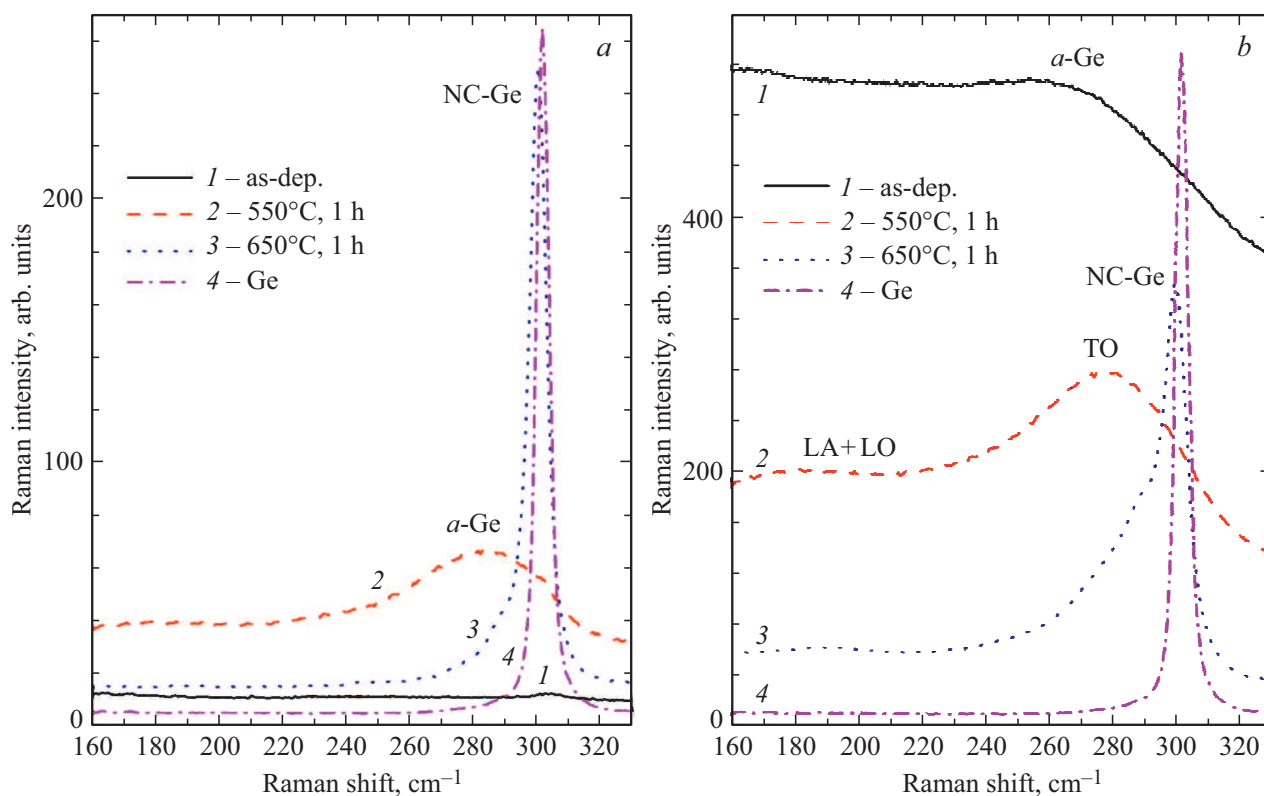


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света исходных образцов и после отжига 550 и 650°C: *a* — GeO[SiO₂]; *b* — GeO[SiO].

составляющие пики (контуры Фойгта). При разложении спектров КРС на пики мы определяли положение пиков. Известно, что частота локализованных в НК Ge оптических фононов уменьшается с уменьшением их размеров [29]. В нашем случае, согласно модели локализации фононов [29], размер НК германия составляет ~ 6.5 nm для пленки GeO[SiO₂] и ~ 6 nm для пленки GeO[SiO]. Это небольшое различие связано с тем, что в нашем случае НК Ge предположительно окружены не матрицей окисла, а переходным аморфным слоем германия, и толщина этого слоя больше в случае пленки GeO[SiO]. Как будет показано далее, это хорошо соответствует данным, полученным электронной микроскопией.

На рис. 2, *a, b* показаны спектры ИК-поглощения образцов в области частот колебаний Ge–O и Si–O-связей, а также в области частот колебаний O–H-связей. Известно, что валентные колебания связей O–H дают поглощение в районе 3300–3500 cm⁻¹. Этот пик в поглощении от воды наблюдался для исходных образцов. По-видимому, вода содержалась в порах пленок. Видно, что после отжига данный пик исчезал, отжиги приводили к удалению воды из пор, и, вероятно к исчезновению самих пор, к уплотнению пленок. В качестве эталонного образца при записи спектров ИК-поглощения использовалась подложка кремния без пленок. Так как в некотором спектральном диапазоне пленка являлась просветляющим покрытием, то абсо-

лютное значение поглощения в этом диапазоне могло принимать отрицательные значения.

На рис. 2, *a, b* видно, что отжиги привели к трансформации спектра поглощения в области частот колебаний Ge–O и Si–O-связей. Наиболее интенсивный пик поглощения на антисимметричных валентных колебаниях (так называемая TO₃ мода [30]) сдвинулся с 1070 cm⁻¹ в исходной пленке GeO[SiO₂] до 1075 cm⁻¹ в отожженных (рис. 2, *a*). В пленке GeO[SiO] данный пик сдвинулся еще больше — от 1035 cm⁻¹ в исходной пленке до 1070 cm⁻¹ после отжига 550°C, и до 1075 cm⁻¹ после отжига 650°C (рис. 2, *b*). Пай с соавторами [31] установили, что положение данного пика (в обратных сантиметрах) в пленках SiO_x практически линейно зависит от стехиометрического параметра *x*, как

$$\nu(\text{TO}_3, \text{SiO}_x) = 925 + 75x. \quad (2)$$

В нашем случае, как и в случае отжига структур Ge_x[SiO₂]_(1-x) [32], сдвиг, по-видимому, обусловлен, отжигом дефектов (пор и вакансий).

Видимый в пленке GeO[SiO₂] пик с положением ~ 990 cm⁻¹ (кривая 1, рис. 2, *a*) обусловлен поглощением на колебаниях Ge–O–Si в германосиликатном стекле [13,32,33]. Помимо пиков Si–O и Si–O–Ge в пленках видны пики, связанные с валентными колебаниями Ge–O связей [34,35]. Подобно нестехиометрическому оксиду кремния, положение данного пика (в обратных

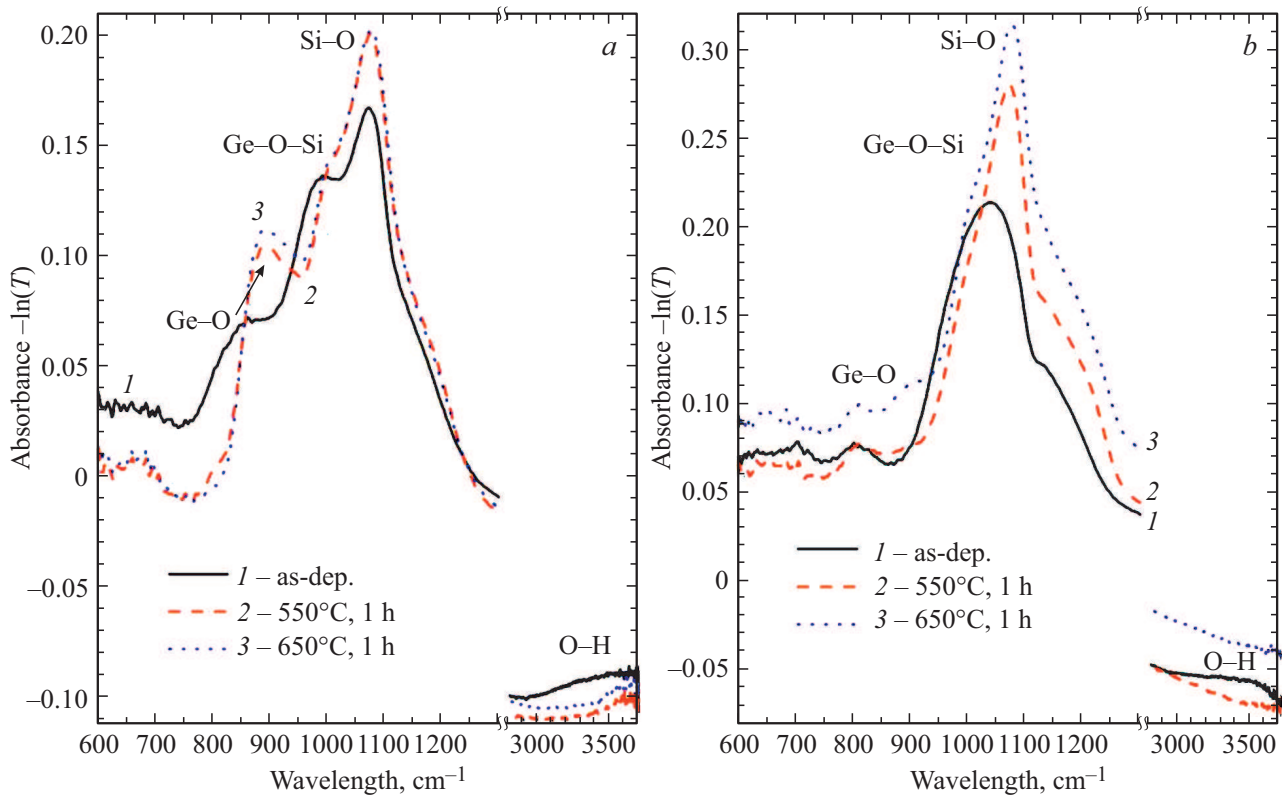
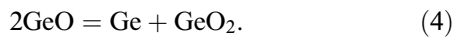


Рис. 2. Спектры ИК-поглощения исходных образцов и после отжига 550 и 650°C: *a* — GeO[SiO₂]; *b* — GeO[SiO].

сантиметрах) в пленках GeO_x практически линейно зависит от стехиометрического параметра x [35], как

$$\nu(\text{TO}_3, \text{GeO}_x) = 743 + 72.4x. \quad (3)$$

Таким образом, особенно в пленке GeO[SiO₂] (рис. 2, *a*) видно, что отжижки привели к деконволюции монооксида германия на германий и диоксид германия по реакции [7,22]:



Как уже отмечалось, данные ПВРЭМ (рис. 3 *a–d*) подтвердили результаты, полученные из анализа данных спектроскопии КРС. В исходной пленке GeO[SiO] были обнаружены нанокластеры аморфного германия с размерами около 3 nm (рис. 3, *a*). Отжиг при температуре 650°C привел к их кристаллизации и росту размеров (рис. 3, *b*), видны плоскости из атомов германия, средний размер нанокристаллов составляет 5–6 nm. Интересно, что отжиг при температуре 650°C пленки GeO[SiO₂] привел к возникновению слоистой структуры из довольно больших (и иногда огранных) агломератов из НК Ge (рис. 3, *c*). Подобные эффекты наблюдались ранее при отжиге слоистых структур GeO/SiO₂ [19], однако в нашем случае пленки являлись изначально твердыми растворами, и эффекты самоорганизации, приведшие к возникновению слоистых структур, требуют

дополнительного изучения. Наблюдается также диффузия германия к поверхности кремния, поэтому мы исследовали эту область пленки с большим разрешением (рис. 3, *d*). Более светлая область это естественный окисел кремния, а вблизи него наблюдается слой НК размерами 6–7 nm.

На рис. 4, *a, b* показаны спектры ФЛ-пленок в ИК-диапазоне. Для удобства восприятия спектры приведены в логарифмическом масштабе по вертикальной оси. В исходных пленках при низких температурах обнаружена широкая полоса ФЛ с максимумом 1050 nm. ФЛ, вероятно, обусловленная дефектами, предположительно вакансиями кислорода и избыточными атомами германия. В спектрах видны узкие линии: это паразитная линия лазера (1080 nm) а также сигнал от подложки кремния, так как излучение лазера достигает подложки. Самая интенсивная из них это линия на длине волны 1132 nm (линия излучения с участием ТО-фонона в кремнии — Si–TO). Отжиг при 550°C привел к возникновению широкого пика ФЛ с максимумом примерно 1300–1450 nm (кривые 2 на рис. 4, *a, b*). Для обоих образцов эта полоса предположительно связана с оптическими переходами в нанокластерах аморфного германия. Обычно, оптическая щель в аморфных материалах больше чем в кристаллических, а длинноволновое „плечо“ может быть обусловлено хвостами Урбаха в плотности состояний аморфных материалов. После отжига 650°C в пленках

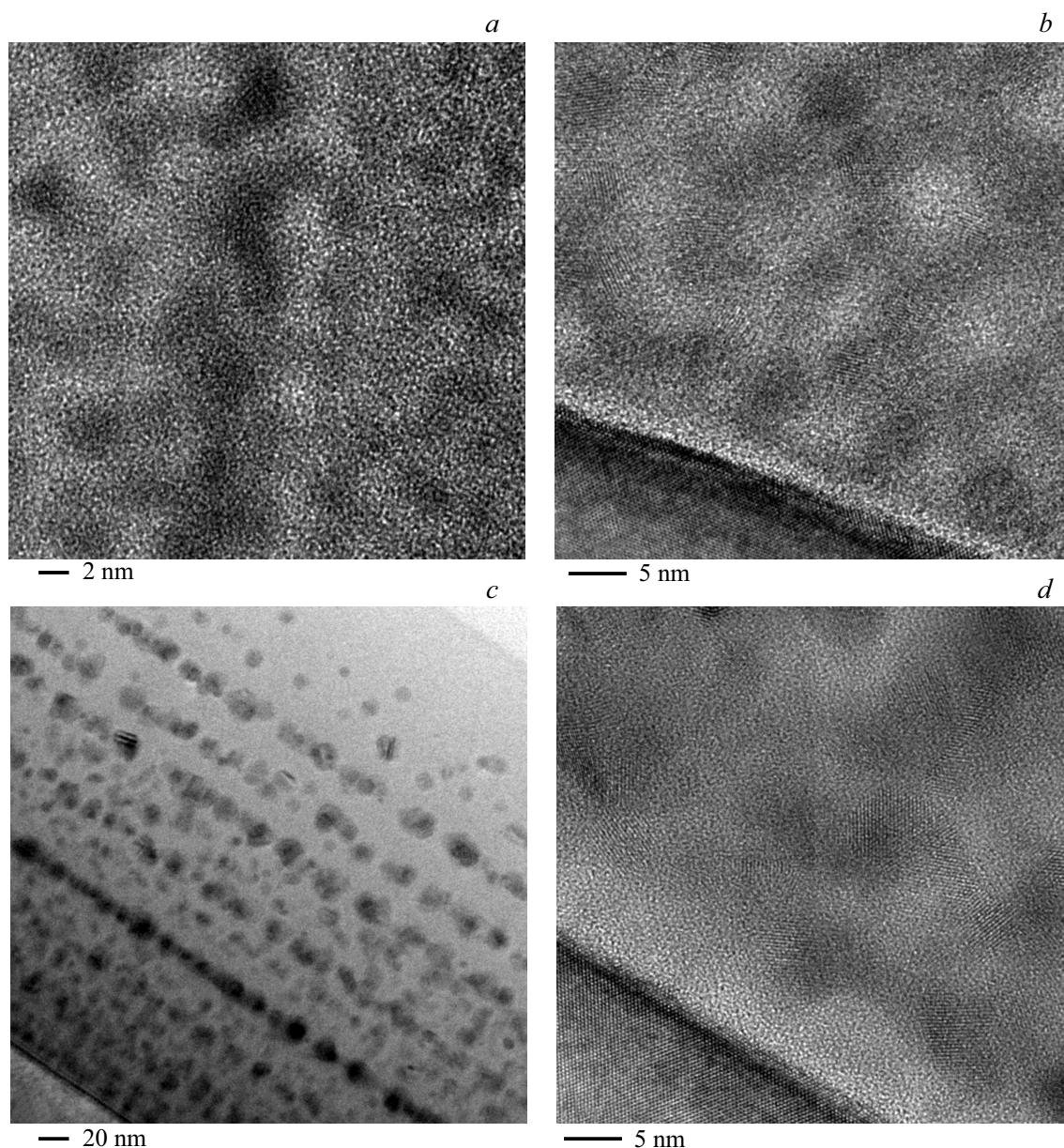


Рис. 3. Изображения ПВРЭМ поперечного среза образцов: *a* — GeO[SiO] исходный; *b* — GeO[SiO] после отжига 650°C; *c* — GeO[SiO₂] после отжига 650°C; *d* — GeO[SiO₂] после отжига 650°C, область Si-интерфейса, большее увеличение.

возникают НК Ge, однако интенсивность ФЛ уменьшается (кривые 3 на рис. 4 *a, b*). Длинноволновая ФЛ (часть которой обрезана вследствие края чувствительности детектора) по-видимому, обусловлена вкладом НК Ge с различными размерами. Квантово-размерный эффект приводит к увеличению энергии оптических переходов для экситонов в НК Ge. В спектре образца GeO/SiO₂ после отжига 650°C (кривая 3 на рис. 4, *a*) проявляется рост сигнала при увеличении длины волны от 1600 нм, однако он обрезается детектором (показано стрелкой). Итак, отжижки вызывают трансформацию структуры пленок и меняют вид спектров ФЛ. В пленках, содержащих НК Ge, наблюдается длинноволновая ФЛ. При этом уменьшился сигнал ФЛ от дефектов. Была исследована

температурная зависимость интенсивности пиков ФЛ (данные не показаны), интенсивность ФЛ падала с ростом температуры, но сигнал обнаруживался при температурах до 200 К.

На рис. 5, *a, b* приведены спектры ФЛ при комнатной температуре (T_{RT}) в видимом диапазоне. Наблюдаемая полоса с максимумом ~ 400 нм обусловлена комплексами дефектов — вакансия кислорода + избыточные атомы германия (два соседних атома Ge в матрице SiO₂) [20,36,37]. Менее интенсивная полоса ФЛ имеет максимум ~ 570 нм. Можно предположить, что эта полоса также обусловлена дефектами [32], связанными с Ge, эти сложные дефекты, очевидно, содержат более двух соседних атомов Ge в матрице германосиликатного

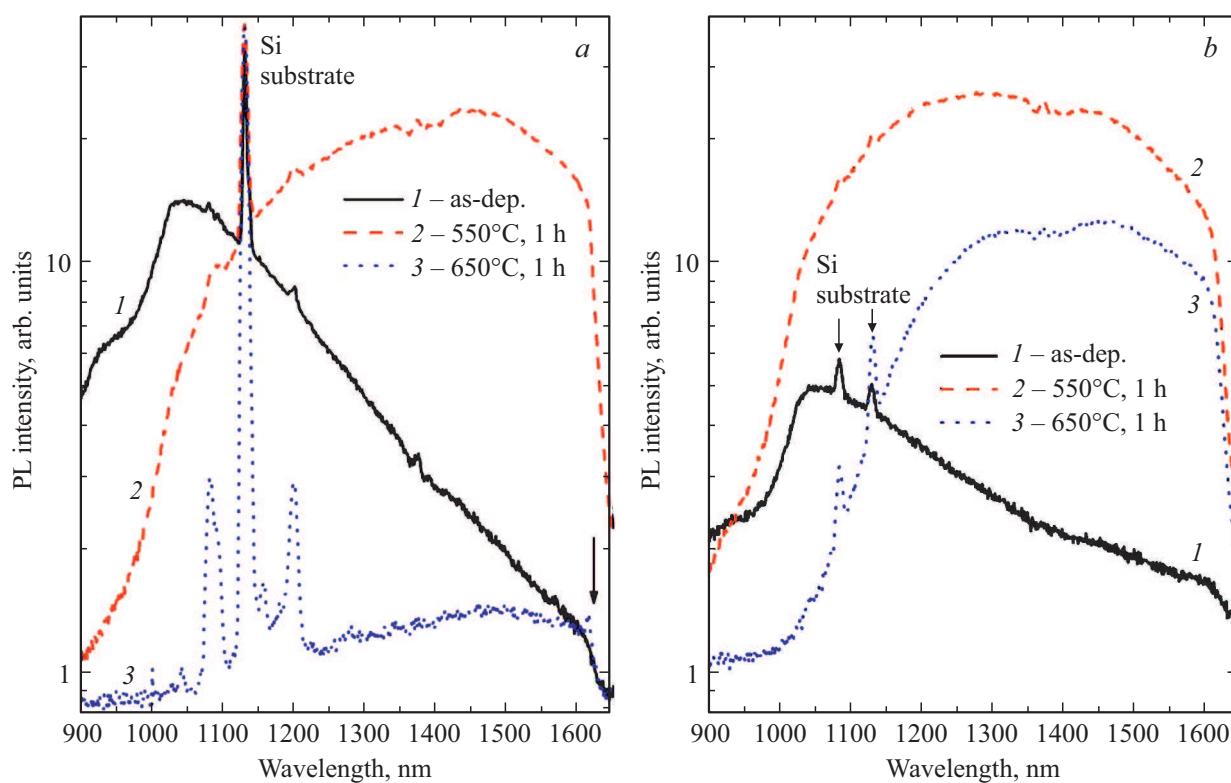


Рис. 4. Спектры фотолуминесценции при низкой температуре в ИК-диапазоне исходных образцов и после отжигов 550 и 650°C: *a* — GeO[SiO₂]; *b* — GeO[SiO]. ($T = 8\text{ K}$, $\lambda_{\text{exc}} = 325\text{ nm}$).

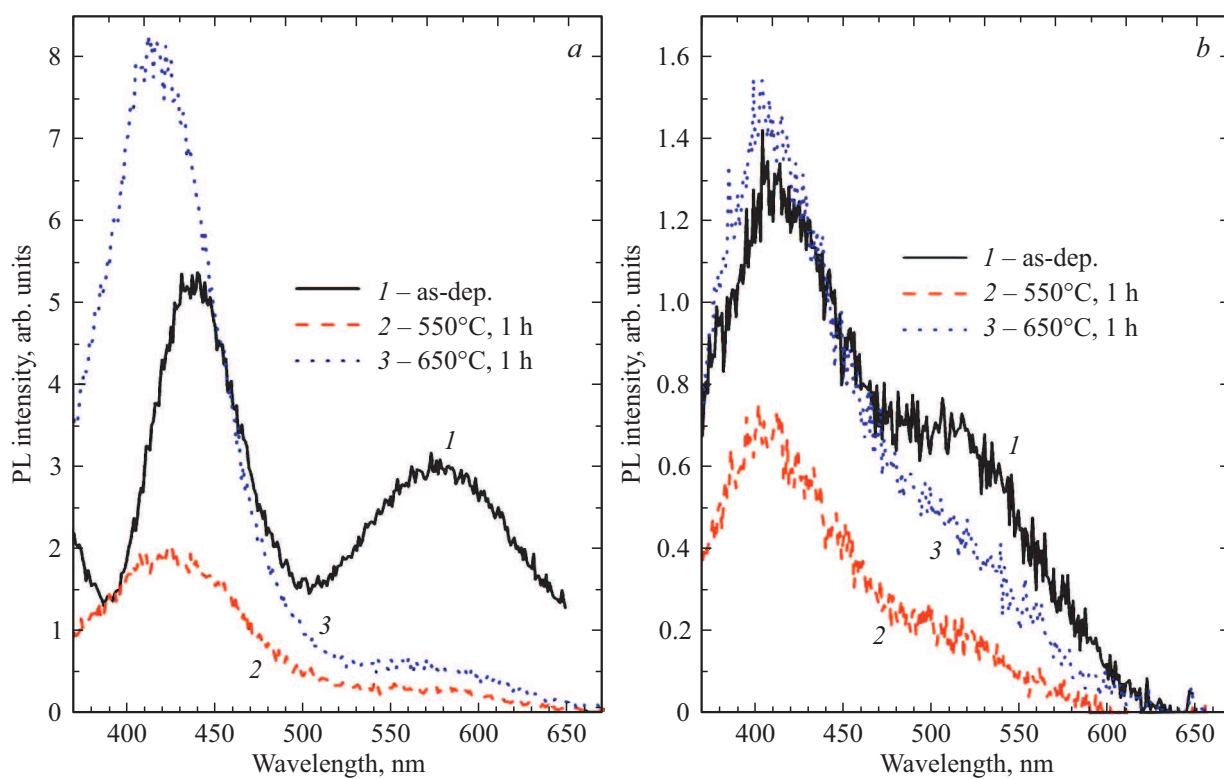


Рис. 5. Спектры фотолуминесценции при комнатной температуре в видимом диапазоне исходных образцов и после отжигов 550 и 650°C: *a* — GeO[SiO₂]; *b* — GeO[SiO]. ($T = T_{\text{RT}}$, $\lambda_{\text{exc}} = 325\text{ nm}$).

стекла. Отметим, что интенсивность ФЛ ведет себя немонотонно с температурой отжига: сначала она падает после отжига 550°C , и потом растет после отжига 650°C . Вероятно это связано с отжигом не только светоизлучающих дефектов (что приводит к падению ФЛ), но и с отжигом нерадиационных дефектов (это повышает вероятность излучательных переходов). Итого, можно утверждать что, полосы ФЛ в видимом диапазоне связаны с комплексами дефектов, включающих кислородные вакансии.

4. Выводы

Обнаружено, что в пленках, полученных сораспылением оксида германия и монооксида кремния на холодную подложку (100°C) присутствуют нанокластеры аморфного германия со средними размерами $\sim 3\text{ nm}$. Отжиги при температуре 550°C приводят к увеличению доли аморфного германия в данной пленке и к возникновению нанокластеров Ge в пленке, полученной сораспылением оксида германия и диоксида кремния. Отжиги при температуре 650°C приводят к возникновению нанокристаллов германия, причем в пленке $\text{GeO}[\text{SiO}]$ их размер меньше, а содержание аморфной фазы больше чем в пленке $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$. В обоих типах исходных пленок обнаружена фотолюминесценция при низкой температуре в ИК-диапазоне, предположительно от дефектов. После отжигов максимум фотолюминесценции сместился в длинноволновую область ($1500\text{--}1600\text{ nm}$), данный пик предположительно обусловлен оптическими переходами в кластерах германия. К сожалению, мы не обнаружили четких свидетельств проявления квантоворазмерного эффекта в спектрах фотолюминесценции от нанокристаллов германия, это будет являться предметом дальнейшего исследования.

Благодарности

Володин В.А. благодарен администрации Университета Лотарингии за возможность визита.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-07-00367.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Zhenyi Ni, Shu Zhou, Shuangyi Zhao, Wenbing Peng, Deren Yang, Xiaodong Pi. *Mater. Sci. Eng. R* **138**, 85 (2019).
- [2] E.G. Barbagioanni, D.J. Lockwood, P.J. Simpson, L.V. Goncharova. *Appl. Phys. Rev.* **1**, 011302 (2014).
- [3] C. Sun, M.T. Wade, Y. Lee, J.S. Orcutt, L. Alloattiet, M.S. Georgas, A.S. Waterman, J.M. Shainline, R.R. Avizienis, Sen Lin, B.R. Moss, R. Kumar, F. Pavanello, A.H. Atabaki, H.M. Cook, A.J. Ou, J.C. Leu, Yu-Hsin Chen, Krste Asanović, Rajeev J. Ram, Miloš A. Popović, V.M. Stojanović. *Nature* **528**, 534 (2015).
- [4] Y. Maeda, N. Tsukamoto, Y. Yazawa, Y. Kanemitsu, Y. Masumoto. *Appl. Phys. Lett.* **59**, 3168 (1991).
- [5] L. Pavesi, L.D. Negro, C. Mazzoleni, G. Franz, F. Priolo. *Nature* **408**, 440 (2000).
- [6] В.А. Володин, Е.Б. Горохов, М.Д. Ефремов, Д.В. Марин, Д.А. Орехов. *Письма в ЖЭТФ* **77**, 485 (2003).
- [7] Е.Б. Горохов, В.А. Володин, Д.В. Марин, Д.А. Орехов, А.Г. Черков, А.К. Гутаковский, В.А. Швец, А.Г. Борисов, Е.Д. Ефремов. *ФТП* **39**, 1210 (2005).
- [8] X. Wang, L.C. Kimerling, J. Michel, J. Liu. *Appl. Phys. Lett.* **102**, 131116 (2013).
- [9] В.А. Володин, Л.В. Соколов. *Письма в ЖЭТФ* **101**, 455 (2015).
- [10] В.А. Володин, В.А. Тимофеев, А.Р. Туктамышев, А.И. Никифоров. *Письма в ЖЭТФ* **105**, 305 (2017).
- [11] V. Kveder, M. Badylevich, E. Steinman, A. Izotov, M. Seibt, W. Schröter. *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2106 (2004).
- [12] M. Ardyanian, H. Rinnert, M. Vergnat. *J. Luminescence* **129**, 729 (2009).
- [13] S.G. Cherkova, V.A. Volodin, V.A. Skuratov, M. Stoffel, H. Rinnert, M. Vergnat. *J. Luminescence* **207**, 209 (2019).
- [14] S. Takeoka, K. Toshiakiyo, M. Fujii, Shinji Hayashi, Keiichi Yamamoto. *Phys. Rev. B* **61**, 15988 (2000).
- [15] A. Nyrow, C. Sternemann, C.J. Sahle, A. Hohl, M. Zschintzsch-Diaset. *Nanotechnology* **24**, 165701 (2013).
- [16] X.D. Pi, U. Kortshagen. *Nanotechnology* **20**, 295602 (2009).
- [17] V.A. Volodin, D.V. Marin, H. Rinnert, M. Vergnat. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 275305 (2013).
- [18] В.А. Володин, М.П. Гамбарян, А.Г. Черков, В.И. Вдовин, М. Stoffel, Н. Rinnert, М. Vergnat. *ЖЭТФ* **148**, 1225 (2015).
- [19] V.A. Volodin, M.P. Gambaryan, A.G. Cherkov, M. Stoffel, H. Rinnert, M. Vergnat. *Mater. Res. Express* **3**, 085019 (2016).
- [20] V.A. Volodin, A.G. Cherkov, A.Kh. Antonenko, M. Stoffel, H. Rinnert, M. Vergnat. *Mater. Res. Express* **4**, 075010 (2017).
- [21] M. Ardyanian, H. Rinnert, M. Vergnat. *J. Appl. Phys.* **100**, 113106 (2006).
- [22] M. Ardyanian, H. Rinnert, X. Devaux, M. Vergnat. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 011902 (2006).
- [23] Д.В. Марин, В.А. Володин, Е.Б. Горохов, Д.В. Щеглов, А.В. Латышев, М. Vergnat, J. Koch, B.N. Chichkov. *Письма в ЖТФ* **36**, 102 (2010).
- [24] D.V. Marin, V.A. Volodin, H. Rinnert, M. Vergnat. *Письма в ЖЭТФ* **95**, 472 (2012).
- [25] A.V. Kolobov. *J. Appl. Phys.* **87**, 2926 (2000).
- [26] W. Wihl, M. Cardona, J. Tauc. *J. Non-Crystalline Solids* **8–10**, 172 (1972).
- [27] V.A. Volodin, G.N. Kamaev, V.A. Gritsenko, A.A. Gismatulin, A. Chin, M. Vergnat. *Appl. Phys. Lett.* **114**, 233104(1-5) (2019).
- [28] J.H. Parker, Jr., D.W. Feldman, M. Ashkin. *Phys. Rev.* **155**, 712 (1967).
- [29] V.A. Volodin, D.V. Marin, V.A. Sachkov, E.B. Gorokhov, H. Rinnert, M. Vergnat. *ЖЭТФ* **145**, 77 (2014).

- [30] C.T. Kirk. Phys. Rev. B **38**, 1255 (1988).
- [31] P.G. Pai, S.S. Chao, Y. Takagi, G. Lucovsky. J. Vacuum Sci. Technology A **4**, 689 (1986).
- [32] В.А. Володин, Zhang Rui, Г.К. Кривякин, А.Х. Антоненко, М. Stoffel, H. Rinnert, M. Vergnat. ФТП **52**, 1056 (2018).
- [33] M. Seck, R.A.B. Devine, C. Hernandez, Y. Campidelli, J.-C. Dupuy. Appl. Phys. Lett. **72**, 2748 (1998).
- [34] A.L. Shabalov, M.S. Feldman. Phys. Status Solidi A **83**, K11 (1984).
- [35] D.A. Jishiashvili, E.R. Kutelia. Phys. Status Solidi B **143**, K147 (1987).
- [36] L. Rebohle, J. von Borany, R.A. Yankov, W. Skorupa, I.E. Tyschenko, H. Fröb, K. Leo. Appl. Phys. Lett. **71**, 2809 (1997).
- [37] W. Skorupa, L. Rebohle, T. Gebel. Appl. Phys. A **76**, 1049 (2003).

Редактор Ю.Э. Китаев