

Структура и оптические свойства сформированных с применением низкочастотного плазмохимического осаждения пленок $\text{SiN}_x : \text{H}$, содержащих нанокластеры кремния

© Т.Т. Корчагина^{*,†}, Д.В. Марин^{*,+}, В.А. Володин^{*,+,†}, А.А. Попов^{*}, М. Vergnat[‡]

* Институт физики полупроводников им. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

† Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

• Ярославский филиал Физико-технологического института Российской академии наук, 150007 Ярославль, Россия

‡ Laboratoire de Physique des Matériaux (LPM), Nancy-Université, CNRS, 54506 Vandœuvre lès Nancy, France

(Получена 26 марта 2009 г. Принята к печати 6 апреля 2009 г.)

Пленки $\text{SiN}_x : \text{H}$ разной стехиометрии были получены с применением низкочастотного плазмохимического осаждения при температурах 100 и 380°C. Варьирование стехиометрии достигалось изменением соотношения потоков аммиака и моносилана от 0.5 до 5. Пленки были исследованы с применением эллипсометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния света, ИК-поглощения и фотолюминесценции. В пленках $\text{SiN}_x : \text{H}$ ($x < 4/3$) были обнаружены кластеры аморфного кремния. Согласно оценкам, лишь небольшая часть избыточного кремния собирается в кластеры, а повышение температуры подложки стимулирует образование кластеров. При увеличении доли избыточного кремния в пленках наблюдается сдвиг максимума фотолюминесценции в длинноволновую область.

PACS: 63.22.+m, 78.30.-j, 81.05.Gc

1. Введение

Слои нитрида кремния получают, исследуют и применяют в микроэлектронике уже более 40 лет (см. работу [1] и ссылки в ней). Практический интерес к данным пленкам обусловлен их использованием в качестве маскирующих слоев, подзатворного диэлектрика в тонкопленочных транзисторах на базе аморфного и поликристаллического кремния и в электрически перепрограммируемых элементах памяти (flash память) [2]. В последнее время интерес к нестехиометрическим пленкам нитрида кремния (SiN_x с параметром x меньше 4/3) возрос в связи с их перспективами применения в оптоэлектронных устройствах. Впервые интенсивная фотолюминесценция в пленках нитрида кремния в спектральной области видимого и ближнего ультрафиолетового диапазона была обнаружена в работах [3,4]. Недавно в работах Парка в пленках нитрида кремния, содержащих нанокластеры кремния, была обнаружена сильная фотолюминесценция (ФЛ) и сдвиг максимума ФЛ в зависимости от размеров нанокластеров (квантово-размерный эффект) [5,6]. Причем нанокластеры кремния, содержащиеся в пленках SiN_x , были аморфными. В структурах металл–(пленка нитрида с нанокластерами кремния)—подложка кремния авторами работы [6] была получена эффективная электролюминесценция (ЭЛ). Это позволило им утверждать, что возможно создание как красного, зеленого и синего светодиодов (на основе пленок с кластерами разных размеров), так

и белого светодиода. Позднее проявления квантово-размерного эффекта были получены той же группой авторов в пленках SiN_x с нанокристаллами кремния [7]. Преимущества пленок нитрида кремния с нанокластерами кремния перед схожей гетеросистемой пленки оксида кремния с нанокластерами кремния следующие. Так как ширина щели подвижности (аналог запрещенной зоны в кристаллических диэлектриках) в аморфном нитриде кремния (~ 5 эВ) гораздо меньше щели подвижности в аморфном диоксиде кремния (около 9 эВ), инжекция носителей заряда в нитрид кремния более эффективна. Проблемы с инжекцией заряда осложняют достижение эффективной ЭЛ в структурах на основе оксида кремния. Для эффективной ЭЛ в этом случае надо прикладывать к структуре большую разность потенциалов. Другое преимущество — малые времена спада ФЛ в пленках нитрида кремния на уровне менее 1 наносекунды [8]. Это обстоятельство важно в случае использования данного эффекта в „быстрых“ светодиодах, интегрируемых в кремниевые микросхемы для передачи информации с помощью модулированного по времени оптического сигнала.

В случае применения пленок нитрида кремния в электронных и оптоэлектронных устройствах широкого формата используются недорогие подложки с низкой температурой размягчения. Поэтому актуально совершенствование низкотемпературной технологии осаждения пленок нитрида кремния. Методы плазмохимического осаждения в газовом разряде позволяют вести процесс при температурах до 100°C. Пленки, изготовленные по этой технологии, получаются более однородными,

[†] E-mail: Taisiya999@mail.ru

^{††} E-mail: volodin@isp.nsc.ru

Параметры роста и состав пленок

№ образца	Температура роста, °С	Давление в реакторе, Па	Соотношение потоков NH_3/SiH_4	Параметр x (оценка из показателя преломления и края поглощения)
611	100	150	5	1.3
612	100	150	2.6	1.2
613	100	150	1.5	1.0
614	100	150	0.9	0.7
615	100	150	0.5	0.6
621	380	240	5	1.3
622	380	240	2.6	1.2
623	380	240	1.5	1.0
624	380	240	0.9	0.7
625	380	240	0.5	0.6

и в результате наличия в разряде водорода количество дефектных состояний в пленках гораздо меньше, чем в пленках, полученных методом термического напыления.

В нестехиометрическом аморфном нитриде кремния SiN_x ($x < 4/3$) избыточный кремний может либо случайным образом встраиваться в атомарную сетку, либо выделяться в кластеры. В первом случае с некоторой вероятностью образуются тетраэдрические группы $\text{Si}-\text{SiN}_3$, $\text{Si}-\text{Si}_2\text{N}_2$, $\text{Si}-\text{Si}_3\text{N}$ и $\text{Si}-\text{Si}_4$. Этот случай описывается моделью случайной сетки (random bonding (RB) model) [1,2]. Во втором случае пленка нестехиометрического нитрида кремния представляет собой смесь из аморфных Si_3N_4 и Si. Этот случай описывается моделью смеси фаз (random mixture (RM) model) [1,2]. Реальная структура пленок SiN_x не описывается строго этими двумя моделями, а по некоторым экспериментальным данным может быть представлена как смесь этих двух крайних подходов [1,2]. В пленках присутствуют и различные тетраэдрические группы, и выделения фаз, а структура их сильно зависит от способов изготовления [2].

Известно, что электрические и оптические свойства материалов определяются их структурой. Таким образом, цель данной работы заключалась в исследовании некоторых структурных параметров пленок $\text{SiN}_x:\text{H}$, полученных по низкотемпературной технологии осаждения, и влияния этих параметров на оптические свойства пленок.

2. Описание эксперимента

Пленки $\text{SiN}_x:\text{H}$ различного состава были получены с применением метода стимулированного плазмой низкочастотного (55 кГц) разряда осаждения из газовой фазы (НЧ СПФФ) смеси силана (SiH_4) и аммиака (NH_3). Отличительными чертами этого метода являются высокая энергия ионов, бомбардирующих поверхность роста при достаточно высокой интенсивности ионного потока. Формированию материала со встроенными

кремниевыми кластерами способствует природа низкочастотного разряда. В газовой фазе энергия электронов в среднем существенно превышает порог диссоциации для силана, что приводит к образованию радикалов SiH_n , с $n < 3$, склонных к полимеризации. От соотношения потоков моносилана и аммиака зависит состав пленки SiN_x ($0 < x < 4/3$), для получения нитрида кремния, близкого к стехиометрическому, используется смесь с избытком аммиака. Для улучшения равномерности пленок по подложке применялся пульсирующий режим горения газового разряда.

Время роста всех пленок составляло 16 мин, мощность газового разряда составляла 400 Вт, скважность разряда составляла 1.2/2.4 мс. Все пленки осаждались на подложку кремния с ориентацией (001). Использовались два режима осаждения, с температурой 100 и 380°С. В каждом режиме варьировалось соотношение потоков моносилана и аммиака. Параметры роста приведены в таблице.

Для определения толщины пленок и показателя преломления использовался метод эллипсометрии. Использовались как сканирующий лазерный эллипсометр „Микроскан“ (оборудован He–Ne-лазером, длина волны 632.8 нм), так и спектральный эллипсометр. Диапазон спектрального эллипсометра составлял от 250 до 800 нм, в качестве источника света использовалась ксеноновая лампа, разрешение по длине волны составляло 2 нм. Все эллипсометры производства ИФП СО РАН.

Структурные свойства пленок были исследованы с помощью методов комбинационного рассеяния света и ИК-спектроскопии. Спектры комбинационного рассеяния света регистрировались при комнатной температуре в геометрии обратного рассеяния, для возбуждения использовалась линия Ar^+ -лазера с длиной волны 514.5 нм. Использовалось оборудование научно-образовательного комплекса „Наносистемы и современные материалы“ Новосибирского государственного университета — спектрометр с тройным монохроматором Т64000 производства Horiba Jobin Yvon. Разрешение составляло не хуже 0.5 см^{-1} . В качестве детектора использовалась крем-

ниевая матрица фотоприемников, охлаждаемая жидким азотом. Применялась приставка для микроскопических исследований комбинационного рассеяния света. Латеральное разрешение определялось размерами лазерного пучка в фокусе (до 1 мкм). Мощность лазерного пучка, доходящего до образца, составляла 10 мВт. Для того чтобы избежать нагрева и кристаллизации структур под лазерным пучком, образец помещался чуть ниже фокуса и размер пятна составлял 2–4 мкм. Спектры ИК-поглощения регистрировали при комнатной температуре на инфракрасном фурье-спектрометре Perkin-Elmer 2000 при спектральном разрешении 4 см^{-1} .

Спектры ФЛ регистрировали при комнатной температуре. В качестве источника накачки служили импульсный азотный лазер (длина волны 337 нм) или ультрафиолетовая линия ртутной лампы. В первом случае использовалась установка на базе монохроматора СДЛ-1 производства ЛОМО, Санкт-Петербург. Регистрация сигнала происходила с применением фотоэлектронного умножителя ФЭУ-79. Во втором случае использовался монохроматор производства Horiba Jobin Yvon, в качестве детектора использовалась кремниевая матрица фотоприемников. Спектральное разрешение в обоих случаях составляло 2 нм. Данные нормировались на спектральную чувствительность регистрирующей аппаратуры. Были предприняты попытки регистрировать время тушения ФЛ при возбуждении импульсным YAG-лазером (на второй гармонике) с регистрацией фотодиодом на основе InGaAs. Разрешение по времени составляло 10 нс.

3. Результаты и обсуждение

По данным эллипсометрии были определены толщины пленок и их комплексный коэффициент преломления. Толщина пленки 611 (с составом, близким к стехиометрическому нитриду) составляла 240 нм. С уменьшением соотношения потоков NH_3/SiH_4 до значения 0.9 толщина увеличивалась до 450 нм и при соотношении потоков 0.5 уже практически не менялась. Пленки, выращенные при более высокой температуре, были толще на 10–20%. Состав пленок (стехиометрический параметр x) можно оценить по реальной части показателя преломления [2,9], по его мнимой части (коэффициенту экстинкции) [9], а также по сдвигу края поглощения [10]. На рис. 1 представлена спектральная зависимость коэффициента экстинкции некоторых образцов. В образце 611 поглощение практически отсутствовало. Из рисунка видно, что поглощение растет, а край его сдвигается в длинноволновую область при уменьшении потока аммиака. Наблюдался также заметный рост реальной части показателя преломления пленок при уменьшении потока аммиака. Были предприняты попытки оценить состав пленок из этих данных. В нашем случае необходимо было сделать поправку на то, что пленки, полученные при низкой температуре, содержат много водорода. Увеличение концентрации водорода в пленках $\text{SiN}_x:\text{H}$

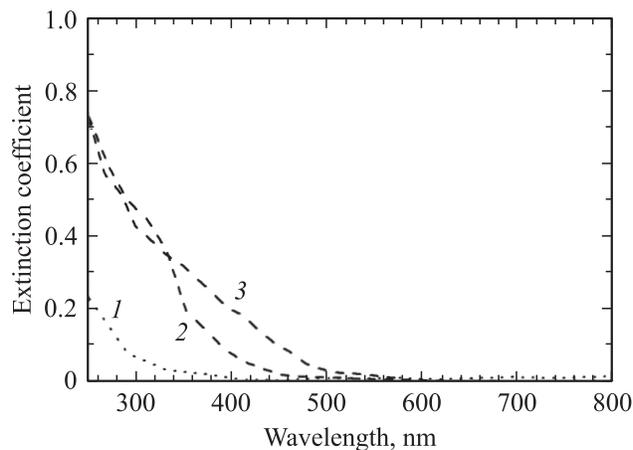


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициентов экстинкции пленок $\text{SiN}_x:\text{H}$: 1 — образец 612, 2 — образец 613, 3 — образец 614.

приводит к уменьшению их показателя преломления в широком диапазоне частот [9]. В таблице даны данные по составу пленок. Следует отметить, что вследствие методических сложностей (учет влияния водорода) точность определения состава невелика — примерно 10% (кроме образцов 611 и 621, по составу близких к стехиометрическому нитриду).

Помимо параметра x , определяющего количество избыточного кремния, важно знать, в каком виде он находится в пленке — в кластерах либо случайно распределен по атомарной сетке. Ответ на этот вопрос дают данные спектроскопии комбинационного рассеяния света, представленные на рис. 2. Так как пленки были осаждены на подложку кремния с ориентацией (001), в некоторых спектрах присутствует сигнал от подложки. В геометрии $Z(X'Y')$ — Z продольные оптические фононы от подложки кремния с ориентацией (001) неактивны в комбинационном рассеянии света. Здесь направление поляризации падающего света (ось X') совпадает с кристаллографическим направлением (110), а направление поляризации рассеянного света (ось Y') совпадает с кристаллографическим направлением $(1\bar{1}0)$. Ось Z направлена вдоль кристаллографического направления (001), Z и $-Z$ — это направления волнового вектора падающего и рассеянного света соответственно (рассеяние обратное). В выбранной геометрии сигнал от подложки в 15–20 раз меньше, чем в разрешенной геометрии. Тем не менее полностью его подавить невозможно, и он присутствует в спектрах почти всех пленок. Исключение составляет пленка 625, самая толстая и содержащая наибольшее количество кластеров кремния, а потому непрозрачная для возбуждающего комбинационного рассеяния света лазера.

Вследствие отсутствия трансляционной симметрии оптические переходы в аморфном кремнии не ограничены законом сохранения квазиимпульса, поэтому его спектр комбинационного рассеяния света в оптической

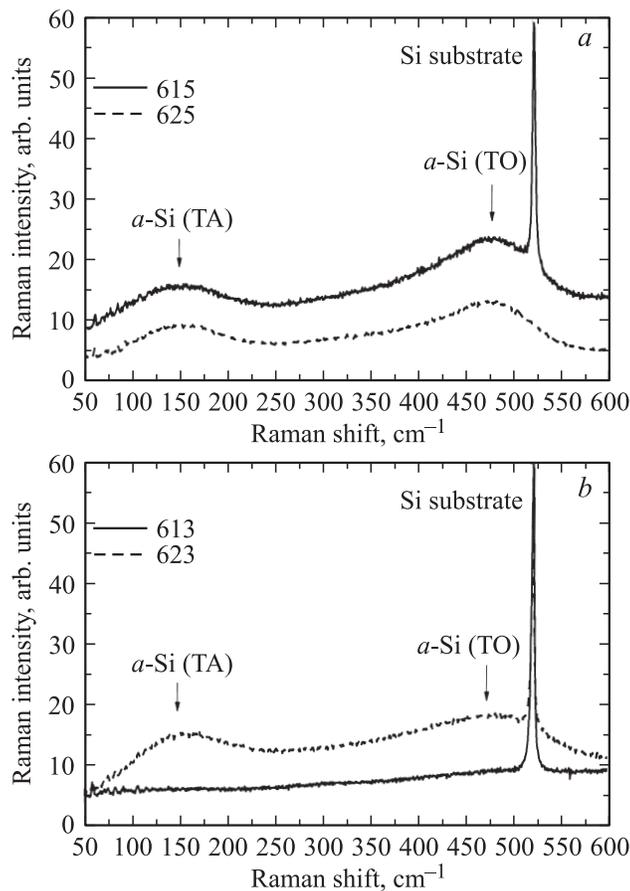


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния света пленок $\text{SiN}_x\text{:H}$: *a* — соотношение потоков NH_3/SiH_4 составляет 0.5; *b* — соотношение потоков NH_3/SiH_4 составляет 1.5.

области характеризуется эффективной плотностью колебательных состояний и представляет собой широкий пик с максимумом в районе $475\text{--}480\text{ см}^{-1}$. В акустической области максимум плотности колебательных состояний находится в районе 150 см^{-1} . Так как поперечных фоновых мод в 2 раза больше, чем продольных, а дисперсия их узкая по сравнению с дисперсией продольных фононов, пики обусловлены рассеянием именно на этих модах. В области оптических колебательных мод пик помечен стрелкой как поперечный оптический (ТО), в области акустических колебательных мод пик помечен как поперечный акустический (ТА). В спектрах также присутствует широкая подкладка, обусловленная рассеянием на продольных оптических (ЛО) колебательных модах. Узкие пики в акустической области (до 120 см^{-1}) вызваны рассеянием на вращательных и колебательно-вращательных модах в молекулах азота и кислорода, содержащихся в атмосфере. Таким образом, из спектров явно видно, что пленки содержат кластеры аморфного кремния.

Спектры комбинационного рассеяния света образцов 614 и 624 похожи на спектры, представленные на рис. 2, *a*. А в образцах 613 и 623 (пленки осаждены

при разных температурах) видны существенные различия. В спектре образца 613, выращенного при низкой температуре, не присутствуют пики, связанные с наличием кластеров кремния. Вероятно, количество кремния, собравшегося в кластеры, меньше порога обнаружения с применением метода спектроскопии комбинационного рассеяния света. В спектрах образцов 612, 622, 611 и 621 также нет пиков от кластеров кремния.

Если стехиометрический параметр x известен, то можно определить молярную долю избыточного кремния y :

$$v \cdot \text{SiN}_x = y \cdot \text{Si} + (1 - y)\text{Si}_3\text{N}_4,$$

отсюда

$$y = (4 - 3x)/(4 - 2x).$$

Тогда для пленки 613 молярная доля избыточного кремния должна быть примерно 0.55. Плотности кремния и аморфного нитрида кремния различаются не более чем в 1.5 раза, и если бы весь избыточный кремний выделился в кластеры, то эффективная толщина слоя кремния была бы в данной пленке примерно 200 нм. От пленок аморфного кремния толщиной в 20 нм в спектрах комбинационного рассеяния света присутствуют уже вполне обнаружимые пики. Поэтому можно предположить, что в данном случае лишь малая часть избыточного кремния (менее 10% от общего количества) собралась в кластеры. Для образца 623, выращенного при том же соотношении потока аммиака и силана, но при более высокой температуре, большее количество избыточного кремния собралось в кластеры. По-видимому, образование кластеров кремния при соотношении потоков NH_3/SiH_4 , равном 1.5 и более, идет не столько в газовой фазе, а в основном на поверхности. Диффузия атомов предположительно идет по поверхности, так как в объеме материала она существенно затруднена. При диффузионно-лимитируемом росте кластеров их образование будет происходить быстрее при большем коэффициенте диффузии, который сильно растет с температурой. Именно поэтому в образцах, полученных при повышенной температуре, образование кластеров наблюдается уже при соотношении потоков NH_3/SiH_4 , равном 1.5. При соотношении потоков NH_3/SiH_4 , равном 2.6 и более, в обеих сериях образцов, по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света, не обнаружено кластеров кремния. В данном случае избыточный кремний в основном рассеян случайно по атомной сетке, модель структуры пленок более близка к RM модели.

Известно, что наличие водорода сильно влияет на свойства пленок. Водород пассивирует оборванные связи, уменьшая плотность состояний в щели подвижности и оптической щели. ИК-спектроскопия позволяет анализировать состояние и количество водорода в пленках $\text{SiN}_x\text{:H}$ [11]. Данные по ИК-поглощению пленок представлены на рис. 3. Видны пики поглощения на валентных колебаниях („stretching modes“) связей Si–N, Si–H, N–H, имеющие максимумы приблизительно 850 , 2150 и 3350 см^{-1} соответственно. Плечо в районе

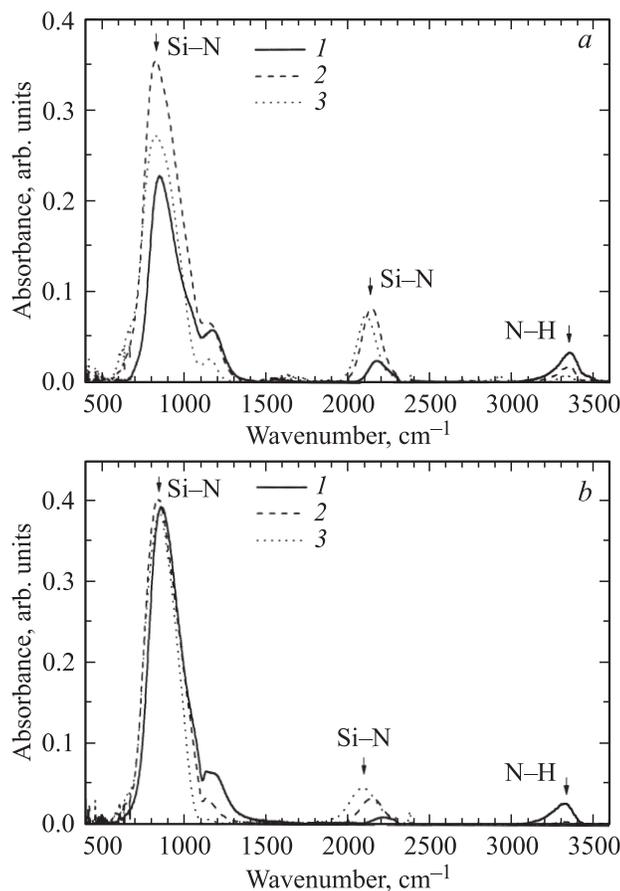


Рис. 3. Спектры ИК-поглощения пленок $\text{SiN}_x:\text{H}$: *a* — температура роста 100°C , 1 — образец 611, 2 — образец 613, 3 — образец 615; *b* — температура роста 380°C , 1 — образец 621, 2 — образец 623, 3 — образец 625.

$1100\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ обусловлено поглощением на валентных колебаниях связей кремния и азота, находящихся в окружении одного или нескольких атомов водорода [11]. Рост пика поглощения на колебаниях Si–N-связей при увеличении содержания избыточного кремния в пленках, выращенных при температуре 100°C (рис. 3, *a*), по-видимому, связан с увеличением толщины пленок (пики не нормированы к толщине). Из сравнения спектров ИК-поглощения пленок, выращенных при разных температурах, видно, что концентрация водорода уменьшается при увеличении температуры роста. Это очевидный результат, так как связь Si–H слаба и процесс дегидрогенизации начинается при температурах от 350°C . Связь N–H более прочна, что наиболее ярко проявляется в спектре образца 621, где пик поглощения на колебаниях N–H-связей заметно больше пика поглощения на колебаниях Si–H-связей. Из рис. 3 также видно, что концентрация Si–H-связей растет с увеличением содержания избыточного кремния, а концентрация N–H уменьшается.

Известно, что частота локальных колебаний зависит от ближайшего атомного окружения. Зависимость ча-

стоты колебаний Si–H-связей в пленках разной стехиометрии, выращенных при разной температуре, приведена на рис. 4. Необходимо отметить, что частота колебаний N–H-связей не сдвигалась в пленках с разной стехиометрией и составляла 3350 и 3325 cm^{-1} в пленках, выращенных при температуре 100 и 380°C . Частота колебаний Si–H-связей зависит от ближайшего окружения этой пары атомов — это может быть кремний, азот или водород. Известно, что в аморфном кремнии частота валентных колебаний Si–H-связей меняется от 2000 cm^{-1} в случае тетраэдра $\text{Si}_4\text{--H}$ до $2090\text{--}2120\text{ cm}^{-1}$ в случае тетраэдров $\text{Si}_3\text{--H}_2$, $\text{Si}_2\text{--H}_3$ [12]. Нам не удалось найти литературных данных о зависимости частоты колебаний Si–H-связей от количества ближайших атомов азота. По нашим данным, в почти стехиометрических пленках $\text{SiN}_x:\text{H}$ частота этих колебаний возрастает до почти 2240 cm^{-1} (рис. 4). В работе [13] авторы пытались связать наличие кластеров кремния в пленках $\text{SiN}_x:\text{H}$ и соотношение интенсивностей пиков поглощения на колебаниях различного типа. Они также подтвердили наличие кластеров кремния в пленках, выращенных при соотношении потоков аммиака и силана 2 и менее, из прямых данных электронной микроскопии [13]. Если применить их подход, то, по нашим данным, пленки 611 и 621 почти не содержат кластеров кремния. А в пленках 612 и 622 поглощение на колебаниях Si–H-связей в 2 раза больше поглощения на колебаниях N–H-связей. Это говорит о присутствии в них кластеров кремния, хотя по данным комбинационного рассеяния света их не обнаружено.

На рис. 5 представлены спектры ФЛ пленок при возбуждении импульсным азотным лазером. ФЛ была

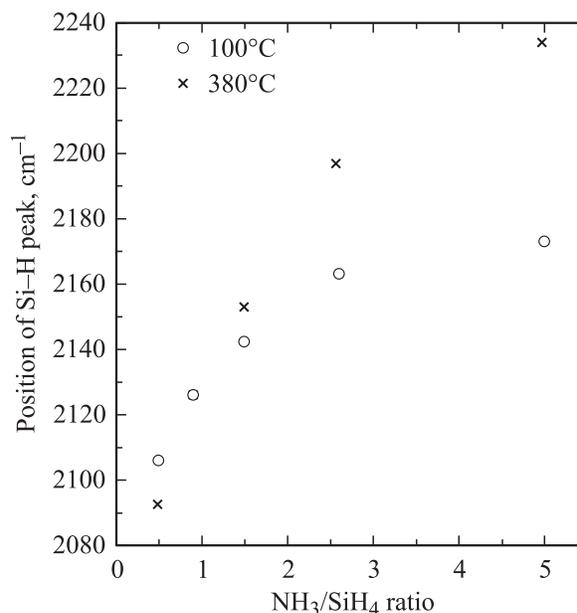


Рис. 4. Положение пика поглощения на колебаниях Si–H-связей в пленках $\text{SiN}_x:\text{H}$, выращенных при различной температуре, в зависимости от соотношения потоков аммиака и силана при росте.

сильная, в некоторых случаях заметная невооруженным глазом. Общая зависимость ФЛ в пленках $\text{SiN}_x:\text{H}$ при увеличении количества избыточного кремния — смещение максимума сигнала в длинноволновую область. Подобная зависимость наблюдалась другими авторами и ранее [3]. В случае почти стехиометрического нитрида ФЛ может быть обусловлена в основном дефектами [1,14]. Это могут быть и дефекты, связанные с избыточным кремнием, такие как Si-Si „мостики“ [1,14]. Если предположить, что ФЛ в пленках $\text{SiN}_x:\text{H}$ с параметром $x = 1.2$ и менее обусловлена экситонами, локализованными в кластерах кремния, то наблюдаемый сдвиг можно объяснить квантово-размерным эффектом [5,6]. Логично предположить, что в пленках с большим количеством избыточного кремния кластеры кремния крупнее и пик ФЛ соответственно сдвигается в них в красную область спектра. Из данных релаксации ФЛ по времени не удалось измерить время ее релаксации (тушения), так как, по-видимому, оно было меньше, чем время быстрого действия регистрирующей системы. Тогда, по нашим оценкам, время жизни экситона меньше 10 нс. Следует отметить, что скважность импульсного азотного лазера составляла $3 \cdot 10^{-6}$, а время релаксации очень мало, значит, соотношение сигнала к шуму при импульсной накачке также мало. ФЛ в образцах с

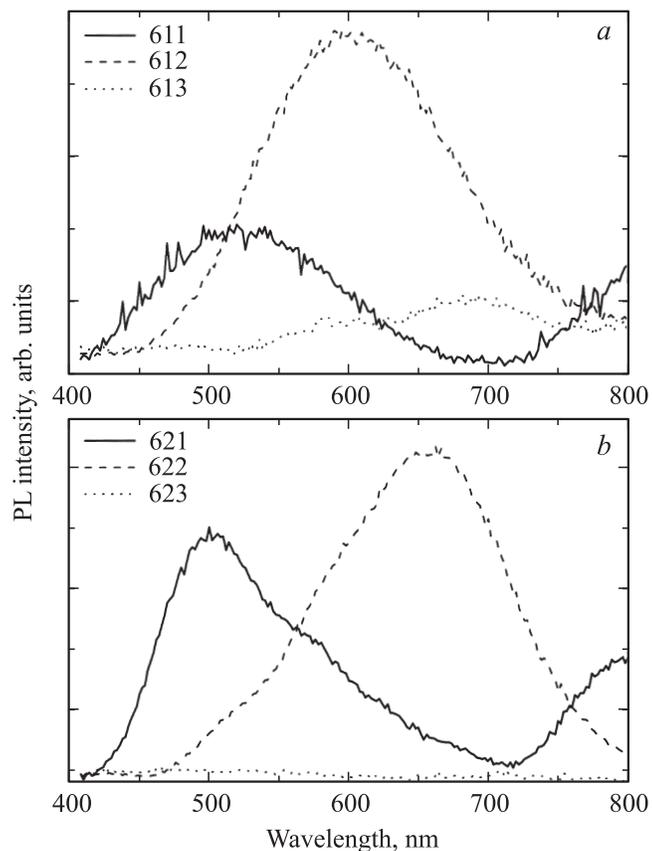


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции образцов при возбуждении импульсным азотным лазером. Температура роста, °C: *a* — 100, *b* — 380.

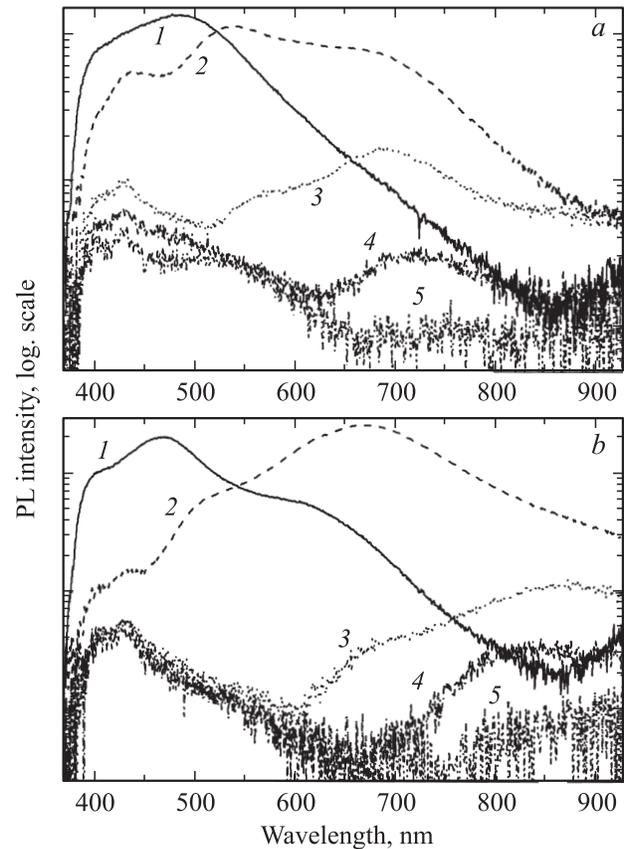


Рис. 6. Спектры фотолюминесценции образцов при возбуждении ртутной лампой. Вверху — пленки, выращенные при температуре 100°C, образцы: 1 — 611, 2 — 612, 3 — 613, 4 — 614, 5 — 615. Внизу — пленки, выращенные при температуре 380°C, образцы: 1 — 621, 2 — 622, 3 — 623, 4 — 624, 5 — 625. Шкала интенсивностей — логарифмическая.

самым высоким содержанием кремния была слаба и не приведена на рис. 5. Для увеличения сигнала была использована схема с постоянной накачкой излучением ртутной лампы. Результаты представлены на рис. 6. Качественно они подтверждают предположения о наличии квантово-размерного эффекта. Излучение в синей области спектра и в области ближнего УФ диапазона может быть обусловлено дефектами, а red-shift излучения может быть обусловлен увеличением размеров аморфных нанокластеров кремния, как в модели Парка [5,6].

4. Заключение

В пленках $\text{SiN}_x:\text{H}$, осажженных методом НЧ СПГФО при соотношении потоков аммиака к силану 1.5 и менее, по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света, обнаружены кластеры аморфного кремния. При понижении температуры подложки при осаждении меньшее количество избыточного кремния собирается в кластеры. По оценкам, сделанным из анализа данных комбинационного рассеяния света, только часть избы-

точного кремния собирается в кластеры. Из анализа спектров ИК-поглощения можно предположить, что кластеры кремния присутствуют в пленках, осажденных при соотношении потоков аммиака к силану 2.6. Количество кремния в кластерах в данном случае, по-видимому, меньше предела обнаружения методом спектроскопии комбинационного рассеяния света. В пленках SiN_x :H был обнаружен интенсивный сигнал ФЛ в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Был обнаружен сдвиг максимума ФЛ в область больших длин волн при увеличении количества избыточного кремния. По-видимому, это связано с увеличением размеров нанокластеров кремния, что позволяет утверждать о проявлении квантово-размерного эффекта.

Список литературы

- [1] А.В. Ржанов. *Нитрид кремния в электронике* (Новосибирск, Наука, СО, 1982).
- [2] В.А. Гриценко. УФН, **178**, 727 (2008).
- [3] I.G. Austin, W.A. Jackson, T.M. Searle, P.K. Bhat. Phil. Mag. B, **52**, 271 (1985).
- [4] V.V. Vasilev, I.P. Mikhailovskii, K.K. Svitashv. Phys. Status Solidi A, **95**, K37 (1986).
- [5] Nae-Man Park, Chel-Jong Choi, Tae-Yeon Seong, Seong-Ju Park. Phys. Rev. Lett., **86**, 1355 (2001).
- [6] Nae-Man Park, Tae-Soo Kim, Seong Ju Park. Appl. Phys. Lett., **78**, 2575 (2001).
- [7] Tae-Youb Kim, Nae-Man Park, Kyung-Nyun Kim, Gun-Yong Sung, Young-Woo Ok, Tae-Yeon Seong, Chel-Jong Choi. Appl. Phys. Lett., **85**, 5355 (2001).
- [8] K. Yamaguchi, K. Mizushima, K. Sassa. Appl. Phys. Lett., **77**, 3773 (2000).
- [9] E.A. Davis, N. Piggins, S.D. Bayliss. J. Phys. C: Sol. St. Phys., **20**, 4415 (1987).
- [10] М.Д. Ефремов, В.А. Володин, Д.В. Марин, С.А. Аржанникова, Г.Н. Камаев, С.А. Кочубей, А.А. Попов. ФТП, **42**, 202 (2008).
- [11] M. Molinary, H. Rinnert, M. Vergnat. Physica E, **16**, 445 (2003).
- [12] M.H. Brodsky, M. Cardona, J.J. Coumo. Phys. Rev. B, **16**, 3556 (1977).
- [13] A. Zerga, M. Carrada, M. Amann, A. Slaoui. Physica E, **38**, 21 (2007).
- [14] В.А. Гриценко. *Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП-структурах* (Новосибирск, Наука, СО, 1993).

Редактор Л.В. Беляков

Structure and optical properties of SiN_x :H films with Si nanoclusters grown with the use of low frequency PECVD

T.T. Korchagina*, D.V. Marin**+, V.A. Volodin**+, A.A. Popov*, M. Vergnat \neq

* Institute of Semiconductor Physics,
Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

+ Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

• Yaroslavl Department of Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
150007 Yaroslavl, Russia

\neq Laboratoire de Physique des Matériaux (LPM),
Nancy-Université, CNRS,
54506 Vandoeuvre lès Nancy, France

Abstract SiN_x :H films of different stoichiometry were grown with the use of low frequency PECVD at temperatures 100 and 380°C. The stoichiometry was varied via varying of ammonia to monosilane flow ratio from 0.5 up to 5. The films were studied using ellipsometry, Raman scattering spectroscopy, IR-absorbance spectroscopy and photoluminescence techniques. According to Raman scattering data, the SiN_x :H films ($x < 4/3$) contain clusters of amorphous silicon. According to our estimations, only little part of additional silicon is gathered to clusters, and rising of substrate temperature stimulates formation of the clusters. The red shift of photoluminescence maxima is observed with rising of additional silicon concentration.