

Вариация края поглощения света в пленках SiN_x с кластерами кремния

© М.Д. Ефремов[¶], В.А. Володин, Д.В. Марин, С.А. Аржанникова,
Г.Н. Камаев, С.А. Кочубей, А.А. Попов*

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

* Институт микроэлектроники и информатики,
Ярославль, Россия

(Получена 24 мая 2007 г. Принята к печати 6 июня 2007 г.)

С помощью оптических методов исследования получены данные об оптических константах пленок нитрида кремния, синтезированных методом плазмохимического осаждения. Рассмотрены модели расчета диэлектрической проницаемости в концепции неоднородной смеси фаз кремния и нитрида кремния. Обнаружено, что край поглощения света (E_g) и максимум пика фотолуминесценции сдвигаются в красную область спектра с уменьшением атомной доли азота в пленках SiN_x . При приближении x к значению $4/3$, характерному для стехиометрического нитрида кремния Si_3N_4 , наблюдается нелинейное, резкое увеличение E_g . Методом комбинационного рассеяния света обнаружено наличие связей Si–Si, что подтверждает формирование кластеров кремния непосредственно в процессе осаждения пленок. Установлена взаимосвязь состава нестехиометричных пленок нитрида кремния, значений диэлектрической проницаемости и ширины оптической зоны пропускания света.

PACS: 61.43.Dq, 64.70.Nd, 78.20.Ci, 81.05.Ge

1. Введение

Интерес к кремниевым нанокристаллам, обусловленный их возможным применением при создании элементов памяти [1], поясняет направленность представляемого исследования. Ранее было показано, что лазерные обработки являются применимым инструментом модификации кремниевых кластеров в пленках нитрида кремния, полученных методом пиролитического разложения [2]. Плазмохимическое осаждение обеспечивает существенно более низкие температуры получения пленок, что может иметь значение для ряда приложений, в частности в области технологий создания плоских экранов. Кроме того, возможность вариации ширины запрещенной зоны диэлектрических слоев SiN_x за счет введения избыточных атомов кремния может позволить оптимизировать высоту потенциальных барьеров для электронов и дырок, а также и проводимость пленок SiN_x . К тому же избыток кремниевых атомов при осаждении может приводить к появлению кремниевых кластеров, которые могут являться центрами хранения заряда.

2. Методика эксперимента

Пленки SiN_x толщиной около 0.5 мкм были осаждены на кварцевую подложку, используя плазмохимический реактор конденсаторного типа с низкой частотой возбуждения (LF-PECVD). Время осаждения около 20 мин, давление 240 Па, температура процесса 380°C. В табл. 1 указаны параметры процесса осаждения, в том числе соотношения рабочих газов.

Экспериментальная технологическая установка включает в себя плазмохимический реактор и низкочастотный генератор (55 кГц). Система электродов в реакторе состоит из 4 графитовых параллельных пластин. Расстояние между соседними пластинами 14 мм, размер пластин — 180 × 360 мм. Подложки размещаются на поверхности электрода. Система электропитания позволяет реализовать как непрерывный, так и импульсный режим генерации плазмы. В импульсном режиме время активного разряда 1.2 мс, а длительность задержки между импульсами варьируется от 1.2 до 4.8 мс. Импульсный режим позволяет управлять соотношением между потоками ионизованных и нейтральных прекурсоров на поверхность подложки.

3. Результаты

Чтобы оценить соотношения между диэлектрической проницаемостью, шириной запрещенной зоны, стехиометрическим составом и параметрами осаждения, были

Таблица 1. Параметры осаждения пленок SiN_x

Номер образца	$[\text{SiH}_4]/[\text{NH}_3]$	SiH_4 , sccm	NH_3 , sccm	Время осаждения, мин	Натекание, sccm
ЯН10-1	1 : 10	50	500	20	< 10
ЯН10-2	1 : 5	60	300	20	< 1
ЯН10-3	1 : 3	80	240	20	< 10
ЯН10-4	1 : 2	100	200	20	< 1
ЯН10-5	1 : 1.5	120	180	20	< 1
ЯН10-6	1 : 1	160	160	20	< 1
ЯН10-7	1 : 0.5	200	100	20	< 1

[¶] E-mail: efremov@isp.nsc.ru

проведены оптические измерения методами: эллипсометрии, спектроскопии пропускания и фотолуминесценции. Для определения наличия Si–Si-связей применялась спектроскопия комбинационного рассеяния света.

3.1. Эллипсометрические измерения

Измерения оптических параметров полученных пленок были проведены с помощью метода эллипсометрии при комнатной температуре. Измерения эллипсометрических углов Δ_i и ψ_i осуществлялись для трех значений угла падения пучка света (45, 56.6, 70°) лазерного излучения на длине волны 632.8 нм. Для вычисления толщины пленок d и коэффициента преломления n использовался метод наименьших квадратов. Основное уравнение эллипсометрии для нашего случая не решается аналитически относительно искомых параметров (n, k и d), поэтому подбирались такие значения n, k и d , чтобы расчетные углы Δ и ψ из основного уравнения эллипсометрии были наиболее близкими к измеренным углам Δ и ψ . Минимизировалось отклонение расчетных и экспериментальных данных

$$\sum_i \{[\Delta(\varphi_i) - \Delta_i]^2 + [\psi(\varphi_i) - \psi_i]^2\}$$

по трем измерениям для различных углов. Таким образом были получены величины коэффициентов преломления и экстинкции на длине волны 632.8 нм и толщина пленок для всех семи образцов. В табл. 2 приведены значения полученных параметров и оцененная скорость роста пленок по толщине (v_{gr}).

Из измеренных величин коэффициентов преломления n и экстинкции k может быть оценена диэлектрическая проницаемость пленок ϵ , в которой ввиду малости коэффициента экстинкции действительная компонента превалирует.

Таблица 2. Параметры пленок, полученные по данным эллипсометрии и спектров пропускания света

Номер образца	Данные эллипсометрии				Данные и расчет по спектрам пропускания	
	$d, \text{Å}$	n	k	$v_{gr}, \text{Å/с}$	Край поглощения, эВ	Коэффициент преломления, n_{calc}
ЯН10-1	4619	1.97	0.0000	3.85	3.32	1.792
ЯН10-2	4279	2.02	0.0000	3.57	2.42	1.946
ЯН10-3	3842	2.17	0.0000	3.20	2.11	2.063
ЯН10-4	3830	2.51	0.0000	3.19	1.86	2.525
ЯН10-5	3629	2.74	0.0010	3.02	1.75	2.654
ЯН10-6	3912	3.18	0.0040	3.26	1.71	3.224
ЯН10-7	3061	3.30	0.0250	2.55	1.66	2.653

Примечание. d — толщина пленки, n — коэффициент преломления, k — коэффициент экстинкции, v_{gr} — оценка скорости роста пленки.

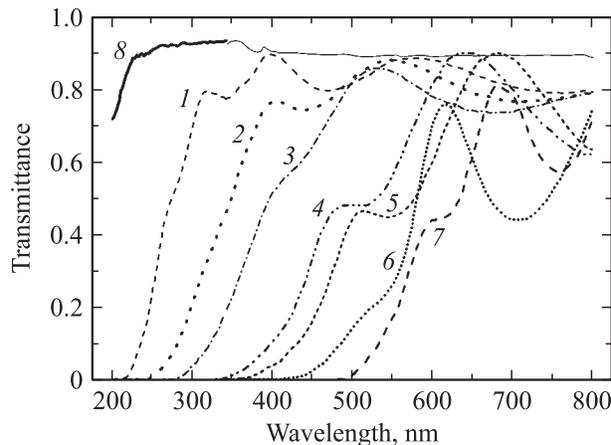


Рис. 1. Спектральные зависимости пропускания пленок SiN_x на кварцевой подложке, полученных методом PCVD (1–7), и кварцевой подложки (8). Спектры образцов: 1 — ЯН10-1, 2 — ЯН10-3, 3 — ЯН10-4, 4 — ЯН10-4, 5 — ЯН10-5, 6 — ЯН10-6, 7 — ЯН10-7.

3.2. Спектрометрическое исследование пропускания света

Методом спектроскопии пропускания света были измерены коэффициенты пропускания в диапазоне длин волн 200–800 нм при комнатной температуре. Спектры пропускания отражены на рис. 1 в сопоставлении с пропусканием света кварцевой подложкой. Видно, что спектр пропускания подложки имеет небольшой завал в ультрафиолетовой области для длин волн около 200 нм, а в остальной области приведенного спектра наблюдается коэффициент пропускания около 100%. Это позволило измерить спектры без учета поглощения света в подложке. Спектры пропускания пленок SiN_x демонстрируют, что с увеличением потока моносилана край зоны поглощения сдвигается в инфракрасную область, что хорошо видно на рис. 1 (см. кривые 1–7 и табл. 1).

Изменение ширины запрещенной зоны нитрида кремния за счет вариации концентрации избыточного кремния охватывает практически весь видимый диапазон спектра. Видна также интерференция света в пленке, выражающаяся в квазипериодической модуляции пропускания света на фоне зависимости собственного поглощения света от длины волны. Поскольку амплитуда модуляции зависит от коэффициента поглощения света, в тех случаях, когда наблюдается большая величина модуляции пропускания, можно говорить, что при этих длинах волн поглощение еще слабо. Расчет ширины запрещенной зоны нитрида кремния необходимо делать с учетом интерференции в пленке. Исходя из экспериментальных данных о пропускании подложки и отсутствия видимых короткопериодических интерференционных колебаний интенсивности можно было не учитывать интерференцию в кварцевой подложке, что свидетельствует о том, что

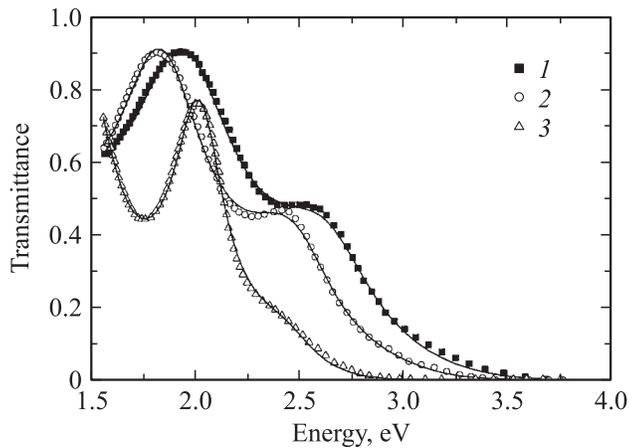


Рис. 2. Результаты подгонки (сплошные линии) спектральных кривых пропускания для образцов: 1 — ЯН10-4, 2 — ЯН10-5, 3 — ЯН10-6.

продольная длина когерентности использовавшегося источника света была меньше толщины подложки.

Был проведен расчет спектров пропускания для модели однородной плоскопараллельной пленки на прозрачной подложке [3]. Коэффициенты преломления и поглощения для подложки не зависели от длины волны света ($n = 1.53$, $k = 0$). Это связано с тем, что пропускание подложки практически не зависело от длины волны падающего света в исследовавшейся области длин волн (рис. 1, кривая 8). Коэффициент преломления пленки считался слабо изменяющимся в зависимости от энергии падающего света, и эта зависимость подгонялась в линейном виде:

$$n_1 = A + B(E - 1.96 \text{ эВ}), \quad (1)$$

где A и B — подгоночные параметры, а 1.96 эВ — энергия фотонов, излучаемых He-Ne-лазером.

В виду того что температура осаждения пленок была сравнительно низка, они считались аморфными. Спектральную зависимость коэффициента поглощения α для аморфных материалов на основании работ [4,5] можно принять равной:

$$\alpha = 0 \text{ при } E \leq E_g, \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(E - E_g)^3}{E} \text{ при } E > E_g, \quad (3)$$

где α_0 и E_g — подгоночные параметры, при этом величина E_g рассчитывалась по краю поглощения исследуемых пленок SiN_x (см. табл. 2).

Подгонка спектров пропускания к экспериментальным данным выявила следующие закономерности: рост содержания кремния в образцах приводит к сдвигу края поглощения в красную область спектра, при этом коэффициент преломления растет.

Рассчитанный из спектров пропускания коэффициент преломления неплохо согласуется с данными эллипсометрии, существенное отличие видно только у образца ЯН10-7. Это, скорее всего, связано с тем, что линейная модель для коэффициента преломления не подходит для данного образца. На рис. 2 приведены экспериментальные и расчетные спектры пропускания.

3.3. Фотолюминесценция пленок SiN_x

Измерения спектров фотолюминесценции были проведены при комнатной температуре с применением двойного спектрофотометра СДЛ-1 при возбуждении излучением импульсного азотного лазера с длиной волны 337 нм . Сигнал фотолюминесценции регистрировался в режиме счета одиночных фотонов. Полученные спектры показаны на рис. 3. Фотолюминесценция (ФЛ) в видимой области спектра наблюдалась для образцов от ЯН10-1 до ЯН10-4. При увеличении концентрации атомов кремния в пленках SiN_x максимум пика фотолюминесценции сдвигался в красную область спектра. На рис. 3 приведены спектры без учета спектральной фоточувствительности фотоприемника, которая резко падает в области длин волн, больших 800 нм . С учетом спектральной зависимости фоточувствительности в видимой области спектра интенсивность фотолюминесценции была приблизительно равна в пике интенсивности для исследованных образцов (см. рис. 3). Следует отметить, что для длин волн, больших 750 нм , в спектрах фотолюминесценции мог наблюдаться вклад от подложки, что выявили спектральные измерения ФЛ от подложки без пленок SiN_x . Пики фотолюминесценции весьма широки, так для образца ЯН10-1 ширина спектра покрывает практически весь видимый диапазон от 450 до 750 нм . Сдвиг максимума сигнала фотолюминесценции качественно соответствует наблюдавшемуся смещению края поглощения в пленках.

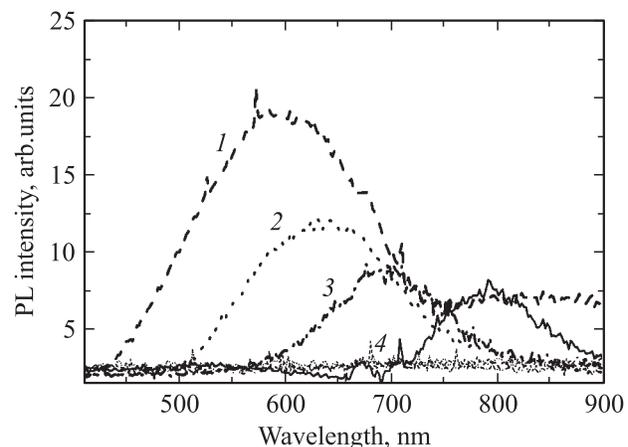


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции образцов: 1 — ЯН10-1, 2 — ЯН10-2, 3 — ЯН10-3, 4 — ЯН10-4.

3.4. Оценка величины E_g в зависимости от содержания азота в пленках SiN_x

Для того чтобы выяснить взаимосвязь края поглощения и состава пленок SiN_x, может быть полезным применение модели описания диэлектрической среды. В данной работе была выбрана модель описания диэлектрической среды как двухкомпонентной смеси кремния и стехиометричного Si₃N₄, для которых уже известны значения диэлектрической проницаемости. Расчетное значение диэлектрической проницаемости двухкомпонентной среды может быть вычислено, используя подход самосоогласованности расчетной и базовой диэлектрических сред. В соответствии с выведенными в работах [6,7] формулами диэлектрическая проницаемость смеси SiN_x в зависимости от объемной доли (ω) фазы кремния в ней может быть оценена из выражения

$$\omega \frac{\epsilon_{Si} - \epsilon}{\epsilon_{Si} + 2\epsilon} + (1 - \omega) \frac{\epsilon_{Si_3N_4} - \epsilon}{\epsilon_{Si_3N_4} + 2\epsilon} = 0. \quad (4)$$

Значение параметра ε_{Si} было выбрано равным 15.2, что соответствует диэлектрической проницаемости кремния на длине волны 628 нм [8], а параметр ε_{Si₃N₄} = 3.84. Из уравнения (4) можно выразить диэлектрическую проницаемость двухкомпонентной среды:

$$\epsilon_1(\omega) = \frac{1}{4} b(\omega) + \frac{1}{4} [b(\omega)^2 + 8c(\omega)]^{1/2}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} b(\omega) &= 3\omega\epsilon_{Si} - 3\omega\epsilon_{Si_3N_4} - \epsilon_{Si} + 2\epsilon_{Si_3N_4}, \\ c(\omega) &= \epsilon_{Si}\epsilon_{Si_3N_4}, \\ \omega(\epsilon) &= \frac{(\epsilon - \epsilon_{Si_3N_4})/(\epsilon_{Si_3N_4} + 2\epsilon)}{\frac{\epsilon - \epsilon_{Si_3N_4}}{\epsilon_{Si_3N_4} + 2\epsilon} + \frac{\epsilon_{Si} - \epsilon}{\epsilon_{Si} + 2\epsilon}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Считается, что объемная доля фазы Si₃N₄ составляет величину (1 - ω). Из объемных фазовых долей можно вычислить атомарные фазовые доли как отношение числа атомов, находящихся в какой-либо фазе, к общему числу атомов. Для кремния фазовая атомарная доля у для композиции (Si)_y(Si₃N₄)_{1-y} может быть вычислена как

$$y(\omega_{Si}) = \frac{1}{1 + 7 \frac{m_{Si}}{3m_{Si} + 4m_N} \frac{\rho_{Si_3N_4}}{\rho_{Si}} \frac{(1 - \omega_{Si})}{\omega_{Si}}}. \quad (7)$$

Подсчитывая количество атомов в одной и той же смеси, но используя для ее обозначения выражения SiN_x, Si_zN_{1-z}, можно получить взаимно однозначное соответствие между параметрами x, y, z:

$$x(y) = 4 \frac{y - 1}{2y - 3}, \quad (8)$$

$$z(y) = \frac{3 - 2y}{7 - 6y}. \quad (9)$$

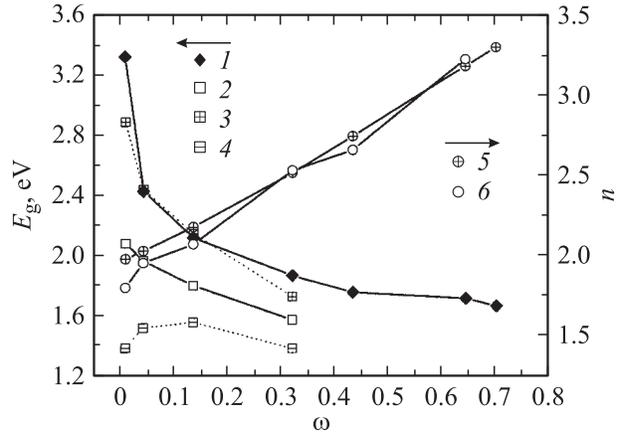


Рис. 4. Энергия края поглощения E_g (кривые 1-4) и коэффициент преломления n (кривые 5,6) в зависимости от объемной доли фазы Si ω в пленках SiN_x. Данные получены из: 1, 6 — спектров пропускания, 2-4 — фотолюминесценции, 5 — эллипсометрии. 2 — энергия максимума пиков фотолюминесценции, 3 и 4 — верхняя и нижняя границы этих пиков соответственно.

Имея в виду рассмотрение модификации среды от чистого кремния до стехиометричного нитрида кремния, у может варьироваться от 1 до 0, а для того же состава смеси вариация x простирается от 0 до 4/3. Поскольку значения диэлектрической проницаемости были получены из эксперимента, используя приведенные выражения, можно рассчитать значения x в сформулированной модели для состава пленок SiN_x.

Рассчитав ω по измеренным значениям диэлектрической проницаемости, можно построить графики зависимостей края поглощения (E_g) и коэффициента преломления n от параметра ω. Данные приведены на рис. 4. На этом же рисунке показаны энергии максимумов пиков фотолюминесценции (2), верхняя (3) и нижняя (4) энергетические границы этих пиков в спектре. Из сопоставления результатов измерений пропускания света и фотолюминесценции видно, что ход кривых согласуется, а верхняя граница спектра фотолюминесценции количественно соответствует энергии края поглощения. Обращает на себя внимание нелинейный характер энергетических зависимостей от состава пленок. При приближении параметра x к стехиометрическому значению 4/3 (ω → 0) наблюдается существенно более быстрый рост величины E_g. В то время как для значений ω от 0.3 до 0.7 ход кривой E_g(ω) более плавный и значения E_g находятся в пределах от 1.6 до 1.9 эВ. Следует подчеркнуть, что нелинейность хода энергетических кривых от состава пленок наблюдалась и ранее. Так, в частности, в работе [9], посвященной *ab-initio* расчету ширины энергетического зазора в кластерах SiN_x, приводятся данные других авторов, среди которых замечены характерные нелинейные обсуждаемые зависимости.

Следует упомянуть и другую модель оценки диэлектрической проницаемости смеси фаз, приведенную

в [10]. Выражение для диэлектрической проницаемости смеси

$$\varepsilon_{\text{mix}}(\omega) = \varepsilon_{\text{av}}(\omega) - \frac{1}{3} \frac{[\delta\varepsilon(\varepsilon)]_{\text{av}}^2}{\varepsilon_{\text{av}}(\omega)}, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{\text{av}}(\omega)$ — усредненное значение диэлектрической проницаемости по объему:

$$\varepsilon_{\text{av}}(\omega) = \omega\varepsilon_{\text{Si}} + (1 - \omega)\varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}, \quad (11)$$

а $[\delta\varepsilon(\omega)]_{\text{av}}^2$ — усредненный квадрат отклонения от среднего значения диэлектрической проницаемости, равный

$$[\delta\varepsilon(\omega)]_{\text{av}}^2 = \omega[\varepsilon_{\text{Si}} - \varepsilon_{\text{av}}(\omega)]^2 + (1 - \omega)[\varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4} - \varepsilon_{\text{av}}(\omega)]^2. \quad (12)$$

Кривые зависимости $\varepsilon_{\text{mix}}(\omega)$, построенные по данной модели, хорошо согласуются с зависимостями, полученными из уравнения (4). Расхождение в значениях диэлектрической проницаемости смеси фаз, полученных в рамках этих моделей, не превышает 2%.

4. Обсуждение результатов

Выражения, использованные для оценки диэлектрической проницаемости, представляют пленки SiN_x как неоднородную среду, состоящую из включений кластеров кремния и островков нитрида. Для расчета спектров пропускания была использована кубическая зависимость коэффициента поглощения от превышения энергии фотонов над энергией запрещенной зоны. Такая форма зависимости, по мнению авторов работы [4], соответствует пространственно неоднородным аморфным материалам. Неоднородность полученных пленок SiN_x подтверждается проведенным исследованием морфологии их поверхности, представленной на рис. 5. Характерная неоднородность по толщине пленок была оценена как 5 нм, а то, что пленки неоднородны по площади, явно видно на рисунке.

Следует обратить внимание на то, что пленки осаждались при достаточно низкой рабочей температуре 380°С. Это обстоятельство может приводить к тому, что за счет ограниченной поверхностной диффузии реагентов и за счет локальных особенностей реакций реагентов с уже выращенными пленками, в каких-то областях может предпочтительно формироваться фаза кремния, а в других фаза нитрида кремния. Механические напряжения, возникающие при неоднородном распределении фаз, приводят к повышению энергии пленок, что не исключает смены пространственного размещения фаз. Интересным вопросом является определение масштаба пространственных неоднородностей при конкретных режимах осаждения. Так, при определенных условиях могут формироваться достаточно малые кластеры кремния, на концентрацию которых может влиять поток моносила при осаждении. Если характерные размеры кластеров кремния сопоставимы с размерами квантования электронов в зоне проводимости и дырок в валентной

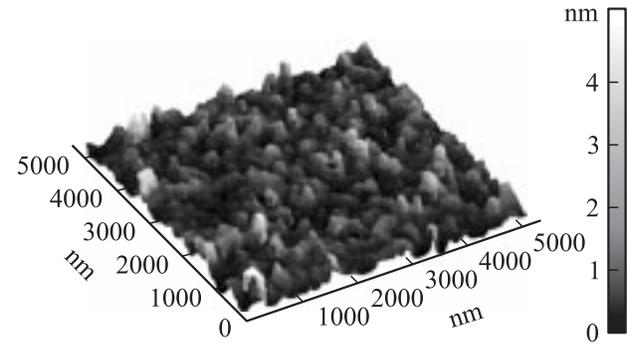


Рис. 5. AFM-изображение поверхности неоднородных пленок SiN_x .

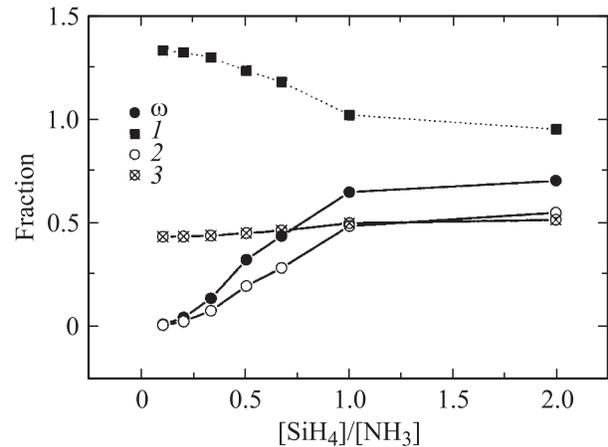


Рис. 6. Параметры ω , x , y , z для полученных пленок SiN_x в зависимости от соотношения газов при их осаждении.

зоне, то на результирующий электронный спектр смеси фаз могут оказывать влияние и квантово-размерные эффекты. Такое рассуждение может объяснить то, что в эксперименте наблюдаются значения E_g существенно большие, чем ширина запрещенной зоны кремния даже тогда, когда содержащие фазы кремния составляют около половины фазового состава пленок. При приближении x к значению 4/3 расчетная величина E_g резко возрастает, что может быть объяснено уменьшением количества и размеров кремниевых кластеров ввиду недостатка атомов кремния. Уменьшение поглощения за счет отсутствия кремния и возрастание энергий электронных переходов в оставшихся кластерах кремния из-за окружения малых кластеров более широкозонным материалом может приводить к расширению ширины запрещенной зоны интегрально во всей пленке. Наблюдение в полученных пленках методом комбинационного рассеяния света пика, характерного для аморфного кремния, подтверждает применимость модели с разделением фаз. Кроме того, следует отметить, что использование такой модели позволяет опираться на полученные ранее данные об оптических константах кремния и нитрида кремния, рассчитывая оптические параметры

для их смеси. Рассмотрение другого крайнего случая, когда пленки SiN_x описываются как твердый раствор с произвольным местоположением атомов, наталкивается на ряд описательных трудностей и недостаток известных параметров.

Оценка параметров ω , x , y , z из измерения диэлектрической проницаемости пленок позволяет установить взаимосвязь между соотношением потоков газов в процессе осаждения и содержанием кремния и азота в полученных пленках SiN_x . Оцененная зависимость приведена на рис. 6. Из рисунка видно, что при уменьшении потока моносилана уменьшается и содержание кремния. Характер кривых нелинейный. Но следует подчеркнуть, что полученные кривые отражают условия эксперимента, проведенного в конкретных режимах осаждения. Несмотря на высказанное обстоятельство, полученные результаты могут использоваться для оценки состава пленок, исходя из соотношения потоков газа.

5. Заключение

Таким образом, в статье приведены экспериментальные данные об оптических свойствах пленок SiN_x , полученных методом низкочастотного плазмохимического осаждения. Проведено исследование оптических свойств пленок SiN_x с кластерами кремния методами: эллипсометрии, спектроскопии пропускания света и фотолюминесценции. Обнаружено, что край поглощения света (E_g) и максимум пика фотолюминесценции сдвигаются в красную область спектра с уменьшением величины x . При приближении x к значению $4/3$, характерному для стехиометрического нитрида кремния Si_3N_4 , наблюдается нелинейное, резкое увеличение E_g . Указанная нелинейность объясняется в рамках неоднородного распределения кремния в пленке и присутствием в ней кластеров кремния. Использование модели смеси фаз кремния и нитрида кремния для комбинированной диэлектрической проницаемости позволило оценить значения x и установить соотношение между составом пленок и потоками моносилана и аммиака, использовавшихся в качестве прекурсоров при осаждении пленок. Методом комбинационного рассеяния света обнаружено наличие связей Si-Si, что подтверждает формирование кластеров кремния непосредственно в процессе осаждения пленок [11]. Достигнутые результаты могут быть важны при создании элементов памяти и оптоэлектронных устройств, использующих проводимость обогащенных кремнием пленок нитрида кремния.

Список литературы

- [1] М.Д. Ефремов, С.А. Аржанникова, В.А. Володин, Г.Н. Камаев, Д.В. Марин. Вестник НГУ. Сер. Физика, **2**, 51 (2007).
- [2] V.A. Volodin, M.D. Efremov, V.A. Gritsenko, S.A. Kochubei. Appl. Phys. Lett. **73** (9), 1212 (1998).
- [3] М.М. Горшков. Эллипсометрия (М., Сов. радио, 1974).

- [4] В.Н. Новиков, А.П. Соколов, О.А. Голикова, В.Х. Кудоярова, М.М. Мездрогина. ФТТ, **32** (5), 1515 (1990).
- [5] J. Tauc. In: *Optical properties of solids*, ed. by F. Abeles (North-Holland Publ. Co, 1972) P. 277.
- [6] D.E. Aspnes. Thin Sol. Films, **89**, 249 (1982).
- [7] D.A.G. Bruggeman. Ann. Phys. (Leipzig), **24**, 636 (1935).
- [8] В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко. *Оптические свойства полупроводников* (Киев, Наук. думка, 1987).
- [9] Fernando Alvarez, Ariel A. Valladares. Phys. Rev. B, **68**, 205 203 (2003).
- [10] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред* (М., Наука, 1982) гл. 9, с. 67.
- [11] S.A. Arzhannikova, M.D. Efremov, V.A. Volodin, G.N. Kamaev, D.V. Marin, S.A. Soldatenkov, V.S. Shevchuk, S.A. Kochubei, A.A. Popov, Yu.A. Minakov. Sol. St. Phenomena, **108–109**, 53 (2005).

Редактор Т.А. Полянская

Variation of optical-absorption edge in SiN_x layers with silicon clusters

M.D. Efremov, V.A. Volodin, D.V. Marin,
S.A. Arzhannikova, G.N. Kamaev, S.A. Kochubei,
A.A. Popov*

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

* Institute of Microelectronics and Informatics,
Yaroslavl, Russia

Abstract Using optical methods, the optical parameters have been extracted for silicon nitride films, deposited by means of PCVD techniques. The models for calculation of dielectric permittivity have been considered in the concept of a non-uniform phase mixture of Si and Si_3N_4 . It is revealed, that light absorption edge (E_g) and maximum of photoluminescence are red-shifted with reduction of factor x for SiN_x films. Where x approaching value $4/3$ the nonlinear, sharp increase of E_g was observed. Owing to Raman scattering on Si-Si bonds phonon, evidence of silicon clusters formation in deposition process was detected. The interrelation of contents and both dielectric susceptibility and optical gap for light transmission has been established.