

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 621.382

DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-2-138-146

Зависимость механических напряжений в пленках нитрида кремния от режимов плазмохимического осаждения

А.В. Новак^{1,2}, В.Р. Новак³, А.А. Дедкова¹, Е.Э. Гусев¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

²ОАО «Ангстрем», г. Москва, Россия

³ФГУП «НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина», г. Москва,
Россия

novak-andrei@mail.ru

Пленки плазмохимического нитрида кремния SiN_x , получаемые из газов моносилана SiH_4 и аммиака NH_3 , широко используются в микроэлектронике, микро- и нанoeлектромеханических системах. Для многих применений важными характеристиками являются остаточные механические напряжения и состав пленок. Свойства пленок SiN_x , в частности механические напряжения и состав, существенно зависят от условий получения: соотношения расходов реагирующих газов, состава газовой смеси, мощности и частоты генератора плазмы, температуры и давления при осаждении. Несмотря на большой объем исследований, данные о зависимости свойств и состава пленок SiN_x от условий получения не являются достаточно полными.

Изучено влияние отношения расходов реагирующих газов на механические напряжения и состав пленок плазмохимического нитрида кремния SiN_x , получаемых из газовой смеси моносилана SiH_4 и аммиака NH_3 при использовании низкочастотной плазмы. Установлено, что с ростом отношения расходов газов SiH_4 к NH_3 от 0,016 до 0,25 сжимающие механические напряжения уменьшаются на 31%, стехиометрический коэффициент уменьшается от 1,40 до 1,20, показатель преломления возрастает от 1,91 до 2,08, концентрация связей N–H уменьшается в 7,4 раз, концентрация связей Si–H возрастает в 8,7 раз, а концентрация атомов водорода убывает в 1,5 раза.

Результаты можно использовать для контролируемого получения пленок SiN_x с такими заданными характеристиками, как остаточные механические напряжения, показатель преломления, стехиометрический коэффициент и концентрация водородсодержащих связей.

Ключевые слова: пленки плазмохимического нитрида кремния SiN_x ; механические напряжения; ИК-фурье-спектроскопия; оптическая профилометрия.

Для цитирования: Новак А.В., Новак В.Р., Дедкова А.А., Гусев Е.Э. Зависимость механических напряжений в пленках нитрида кремния от режимов плазмохимического осаждения // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №2. – С. 138–146. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-2-138-146

Dependence of Mechanical Stress in Silicon Nitride Films on Conditions of Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition

A.V. Novak^{1,2}, V.R. Novak³, A.A. Dedkova¹, E.E. Gusev¹

¹*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

²*OJSC «Angstrom», Moscow, Russia*

³*Lukin State Research Institute of Physical Problems, Moscow, Russia*

novak-andrei@mail.ru

Plasma-enhanced CVD silicon nitride films SiN_x obtained from the gases of SiH₄ and NH₃ are widely used in microelectronics, micro- and nanoelectromechanical systems. For many applications, the residual mechanical stresses and composition of films are important characteristics. The properties of SiN_x films (in particular mechanical stresses and composition) significantly depend on deposition conditions: the reacting gases ratio, gas mixture composition, power and frequency of plasma generator, temperature and pressure at deposition. Despite the large amount of research, the obtained data on dependence of the properties and composition of SiN_x films on the deposition conditions are not sufficiently complete.

In the present work, the influence of the reacting gases ratio on the mechanical stresses and composition has been studied for the PECVD silicon nitride films SiN_x, obtained from a gaseous mixture of SiH₄ and NH₃ using a low-frequency plasma. It was found that for PECVD SiN_x films with increasing of the reacting gases ratio (SiH₄ to NH₃) from 0,016 to 0,25 the compressive mechanical stress decreases by 31%, the stoichiometric coefficient decreases from 1,40 to 1,20, the refractive index increases from 1,91 to 2,08, the concentration of N-H bonds decreases 7,4 times, the concentration of Si-H bonds increases 8,7 times and the concentration of hydrogen atoms decreases by 1,5 times.

The obtained dependences can be used for controlled production of SiN_x films with specified characteristics: residual mechanical stresses, refractive index, stoichiometric coefficient and concentration of hydrogen-containing bonds.

Keywords: PECVD silicon nitride films; mechanical stresses; FTIR spectroscopy; optical profilometry.

For citation: Novak A.V., Novak V.R., Dedkova A.A., Gusev E.E. Dependence of Mechanical Stress in Silicon Nitride Films on Conditions of Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition // Proc. of universities. Electronics. – 2017. – Vol.22. – №2. – P. 138–146. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-2-138-146

Введение. Пленки плазмохимического нитрида кремния SiN_x, полученные методом химического осаждения из газовой фазы с активацией плазмой (PECVD) из смеси газов моносилана SiH₄ и аммиака NH₃ при температурах 300–450 °С, широко применяются в

микроэлектронике, нанoeлектронных устройствах, микро- и нанoeлектромеханических системах [1, 2]. В производстве интегральных схем плазмохимический SiN_x используется в качестве слоя пассивации для полупроводниковых приборов, так как является хорошим барьером для ионов натрия и влаги и обеспечивает защиту металлизации от механических повреждений. При изготовлении тонкопленочных транзисторов плазмохимический SiN_x применяется в качестве подзатворного диэлектрика.

Важной характеристикой пленок плазмохимического SiN_x являются значения остаточных механических напряжений σ . При этом для одних применений необходимы пленки с малым значением механических напряжений [3], а для других, – с большим значением механических напряжений [4, 5]. Физико-химические свойства пленок плазмохимического SiN_x , в частности механические напряжения, а также состав пленок сильно зависят от условий получения: отношения расходов реагирующих газов R (SiH_4 , NH_3 , N_2), состава газовой смеси, мощности и частоты генератора, используемого для возбуждения плазмы, температуры и давления при осаждении.

Отношение расходов реагирующих газов – один из параметров, который влияет на механические напряжения, а также на состав получаемых пленок SiN_x . В работах [6–12] исследованы пленки SiN_x , полученные при разных значениях отношения расходов реагирующих газов R , состава газовой смеси и других технологических параметров. Так, зависимость механических напряжений пленок SiN_x от отношения расходов реагирующих газов $R = [\text{SiH}_4]/[\text{NH}_3]$ для газовой смеси состава SiH_4 , NH_3 и N_2 изучена в [6] при $R = 0,2...0,48$ с использованием ВЧ-плазмы, в [7] – при $R = 1,0...2,0$ с использованием ВЧ- и НЧ-плазмы, в [8] для газовой смеси состава SiH_4 , NH_3 и He_2 при $R = 0,4...1,33$ с использованием ВЧ- и НЧ-плазмы. Состав пленок SiN_x , полученных из газовой смеси SiH_4 и NH_3 при $R = 0,025...0,1$ с использованием ВЧ-плазмы, приведен в [9]. Состав пленок, полученных из газовой смеси SiH_4 и N_2 при $R = [\text{SiH}_4]/[\text{N}_2] = 1:1,3$ в зависимости от мощности генератора и давления с использованием ВЧ-плазмы, рассмотрен в [10]. В [11] исследованы зависимость механических напряжений и состава пленок SiN_x , полученных методом ECR-PECVD (ECR – Electron cyclotron resonance), для газовой смеси SiH_4 и N_2 при $R = 0,3...1,25$. Состав и механические напряжения пленок SiN_x , полученных из газовой смеси SiH_4 , NH_3 и N_2 при $R = [\text{SiH}_4]/[\text{NH}_3] = 1$, в зависимости от значения и отношения мощностей ВЧ- и НЧ-генераторов, используемых для возбуждения плазмы, рассмотрены в [12].

Несмотря на большой объем исследований пленок SiN_x и значительное количество данных о зависимости свойств пленок SiN_x от различных условий осаждения, эти данные являются недостаточно полными. В частности, в работах, в которых изучалась зависимость механических напряжений в пленках SiN_x , получаемых из газовой смеси SiH_4 и NH_3 , от отношения расходов газов, данные о составе пленок имеют качественный характер или неполные, количественные характеристики, например концентрации связей Si–N, N–H, Si–H и водорода, в исследуемых пленках SiN_x не приводятся.

В настоящей работе с помощью ИК-фурье-спектроскопии и оптической профилометрии изучается зависимость механических напряжений и состава пленок плазмохимического SiN_x , полученных из газовой смеси SiH_4 и NH_3 , от отношения расходов реагирующих газов при использовании НЧ-плазмы.

Методика эксперимента. Пленки SiN_x получали методом химического осаждения из газовой фазы с активацией плазмой (PECVD) из газовой смеси SiH_4 и NH_3 при разном отношении расходов реагирующих газов $R = [\text{SiH}_4]/[\text{NH}_3]$, где $R = 0,016...0,25$. Температура осаждения составляла 350 °С, давление 1,43 торр. Для возбуждения плазмы использовался генератор мощностью 50 Вт и частотой 110 кГц. Пленки осаждались

на лицевую сторону кремниевых пластин КДБ (100) диаметром 100 мм, толщиной 460 мкм. Время осаждения варьировали от 8 до 55 мин в зависимости от толщины пленок, которая составляла 220–1600 нм. Толщина осажденных пленок определялась эллипсометром SENDURO (SENTECH Instruments GmbH).

Механические напряжения в пленках плазмохимического SiN_x определялись по изгибу кремниевой пластины, возникающему после осаждения на лицевую сторону пленки SiN_x . Для каждой кремниевой пластины с помощью оптического профилометра Veeco WykoNT 9300 измерялся профиль до и после осаждения в четырех направлениях. Далее по измеренным профилям поверхности на основе методов, предложенных в работах [13–15], рассчитывались механические напряжения σ . Анализ состава полученных пленок плазмохимического SiN_x проводился с помощью ИК-спектроскопии и метода определения стехиометрического параметра x по измерениям показателя преломления n [16]. Для измерения показателя преломления n использовался эллипсометр SENDURO (SENTECH Instruments GmbH), для проведения ИК-измерений – ИК-фурье-спектрометр Vector 22 (Bruker). Для кремниевых пластин со слоями плазмохимического SiN_x , осажденными при разных значениях R , измерялись ИК-спектры пропускания в диапазоне волновых чисел 400–4000 см^{-1} . С учетом анализа полос поглощения, соответствующих связям Si–N, Si–H и N–H, рассчитывалась концентрация этих связей на основе метода, приведенного в работах [9, 17].

Результаты и обсуждение. Механические напряжения в пленках плазмохимического SiN_x рассчитывались по формуле [13]

$$\sigma = \frac{\delta}{r^2} \frac{E}{3(1-\nu)} \frac{T^2}{t},$$

где δ – отклонение профиля на некоторое расстояние r от центра пластины; E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала подложки соответственно; t и T – соответственно толщина пленки и подложки. При расчетах для кремниевых пластин КДБ (100) $E/(1-\nu) = 1,81 \cdot 10^{11}$ Па [14].

На рис.1 для одного выборочного направления показаны профили поверхности до и после осаждения на лицевую сторону кремниевой пластины слоя SiN_x . Видно, что осажденный слой изгибает пластину. Такой изгиб характерен для пленок, имеющих сжимающие (отрицательные) механические напряжения. Для остальных трех направлений сканирования профили поверхности до и после осаждения имеют аналогичный вид. После расчета механических напряжений σ для каждого профиля, соответствующего определенному направлению, проведено усреднение по всем четырем направлениям.

Изучалась зависимость механических напряжений σ от толщины осажденной пленки SiN_x d , полученной при фиксированном отношении расходов газов $R = [\text{SiH}_4] / [\text{NH}_3] = 0,09$ (рис.2,а). Видно, что с ростом толщины пленки от 220 до 1600 нм механические напряжения практически не меняются и составляют приблизительно $-1,25 \cdot 10^9 \pm \pm 7,6 \cdot 10^7$ Па.

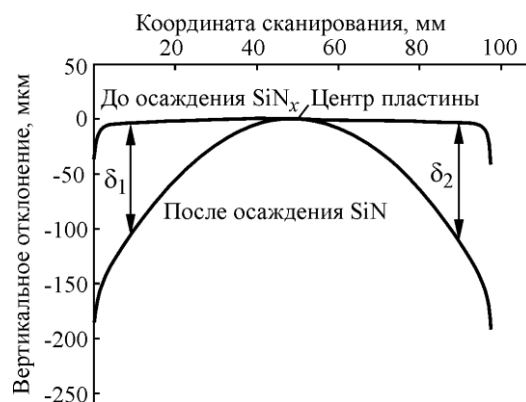


Рис.1. Профиль поверхности кремниевой пластины до и после осаждения плазмохимического SiN_x

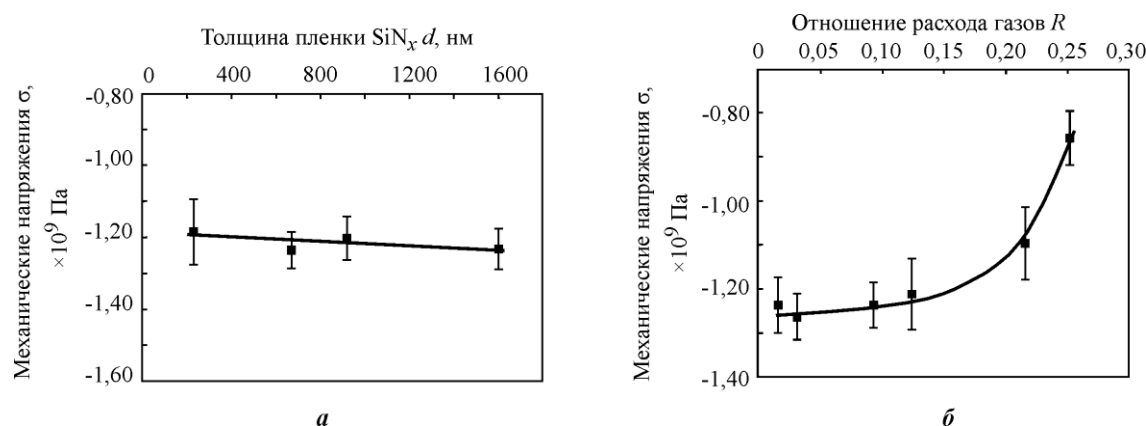


Рис.2. Зависимость механических напряжений σ в пленках плазмохимического SiN_x от толщины d (а) и отношения расхода газов (б)

Зависимость механических напряжений σ от отношения расхода реагирующих газов $R = [\text{SiH}_4]/[\text{NH}_3]$ исследовалась для пленок SiN_x , полученных при $R = 0,016...0,25$ (рис.2,б). Видно, что с ростом R сжимающие (отрицательные) механические напряжения σ уменьшаются. Сначала в интервале $R = 0,016...0,12$ механические напряжения уменьшаются незначительно (от $-1,25 \cdot 10^9$ до $-1,21 \cdot 10^9$ Па), далее в интервале $R = 0,12...0,25$ происходит их более сильное уменьшение (от $-1,21 \cdot 10^9$ до $-8,57 \cdot 10^8$ Па).

Отметим, что исследованные пленки SiN_x получены с применением НЧ-плазмы (110 кГц). Как видно из полученных зависимостей для механических напряжений (см. рис.2), пленки SiN_x имеют отрицательные (сжимающие) механические напряжения, что согласуется с данными, приведенными в работах [7, 8, 12] для пленок плазмохимического SiN_x , полученных с применением НЧ-плазмы (300...380 кГц). При использовании ВЧ-плазмы (13,56 МГц) пленки SiN_x имеют положительные (растягивающие) механические напряжения [6–8,12], однако наличие в составе газовой смеси гелия приводит к образованию пленок, имеющих отрицательные (сжимающие) напряжения [7]. Образование сжимающих напряжений связывают с тем, что при использовании НЧ-плазмы образуются высокоэнергетичные ионы N_2^+ . В результате бомбардировки ионы N_2^+ имплантируются в пленку, которая «уплотняется», и возникают сжимающие напряжения [7, 8, 12]. Следовательно, полученную зависимость механических напряжений σ от отношения расходов газа R (см. рис.2,б) можно объяснить следующим образом. Рост отношения R соответствует уменьшению NH_3 в составе газовой смеси, что ведет к уменьшению концентрации ионов N_2^+ в плазме. Это, в свою очередь, уменьшает количество ионов N_2^+ , имплантированных в пленку, что приводит к уменьшению сжимающих напряжений в пленке.

Полученные зависимости показателя преломления n и стехиометрического параметра x пленок SiN_x от отношения расхода газов $R = 0,016...0,25$ приведены в таблице. Стехиометрический параметр x пленок SiN_x рассчитывался из показателя преломления n на основе зависимости n от x [16].

Как видно из таблицы, с ростом отношения расходов газов R происходит увеличение показателя преломления n . При этом содержание кремния в пленке увеличивается, а азота уменьшается. Так, для образца пленки SiN_x , осажденной при $R = 0,016$, имеем $n \approx 1,91$, $x \approx 1,40$, что соответствует пленке SiN_x , обогащенной азотом. Для пленки SiN_x , полученной при $R = 0,12$, имеем $n \approx 1,98$, $x \approx 1,32$, т.е. состав осажденной пленки наиболее близок к стехиометрическому. При $R = 0,25$ показатель преломления $n \approx 2,08$, $x \approx 1,20$, что соответствует пленке SiN_x , обогащенной кремнием.

Значения полученных технологических параметров пленок SiN_x , осажженных при различном отношении расхода газов

Отношение расхода газа R	Механическое напряжение σ , Па	Показатель преломления n	Стехиометрический параметр x	$N_{\text{Si-N}}$, см^{-3}	$N_{\text{N-H}}$, см^{-3}	$N_{\text{Si-H}}$, см^{-3}	N_{H} , см^{-3}
0,016	$-1,25 \cdot 10^9$	1,91	1,40	$9,70 \cdot 10^{22}$	$2,36 \cdot 10^{22}$	$1,50 \cdot 10^{21}$	$2,51 \cdot 10^{22}$
0,03	$-1,26 \cdot 10^9$	1,92	1,38	$1,01 \cdot 10^{23}$	$1,94 \cdot 10^{22}$	$3,38 \cdot 10^{21}$	$2,28 \cdot 10^{22}$
0,09	$-1,23 \cdot 10^9$	1,96	1,35	$9,87 \cdot 10^{22}$	$1,35 \cdot 10^{22}$	$6,01 \cdot 10^{21}$	$1,95 \cdot 10^{22}$
0,12	$-1,21 \cdot 10^9$	1,98	1,32	$1,07 \cdot 10^{23}$	$1,34 \cdot 10^{22}$	$7,43 \cdot 10^{21}$	$2,08 \cdot 10^{22}$
0,22	$-1,10 \cdot 10^9$	2,00	1,29	$1,00 \cdot 10^{23}$	$6,57 \cdot 10^{21}$	$1,00 \cdot 10^{22}$	$1,66 \cdot 10^{22}$
0,25	$-8,57 \cdot 10^8$	2,08	1,20	$8,72 \cdot 10^{22}$	$3,20 \cdot 10^{21}$	$1,31 \cdot 10^{22}$	$1,63 \cdot 10^{22}$

Примечание. $N_{\text{Si-N}}$, $N_{\text{N-H}}$, $N_{\text{Si-H}}$, N_{H} – соответственно концентрации связей Si-N, N-H, Si-H и водорода.

По ИК-спектрам пропускания для полученных при различных значениях R пленок SiN_x посредством анализа полос поглощения, соответствующих связям Si-N, Si-H и N-H, рассчитывалась концентрация этих связей на основе метода, приведенного в работах [9,17]. На рис.3 показаны ИК-спектры пропускания для кремниевых пластин с осажденными пленками SiN_x при $R = 0,016...0,25$. Для всех образцов пленок SiN_x на ИК-

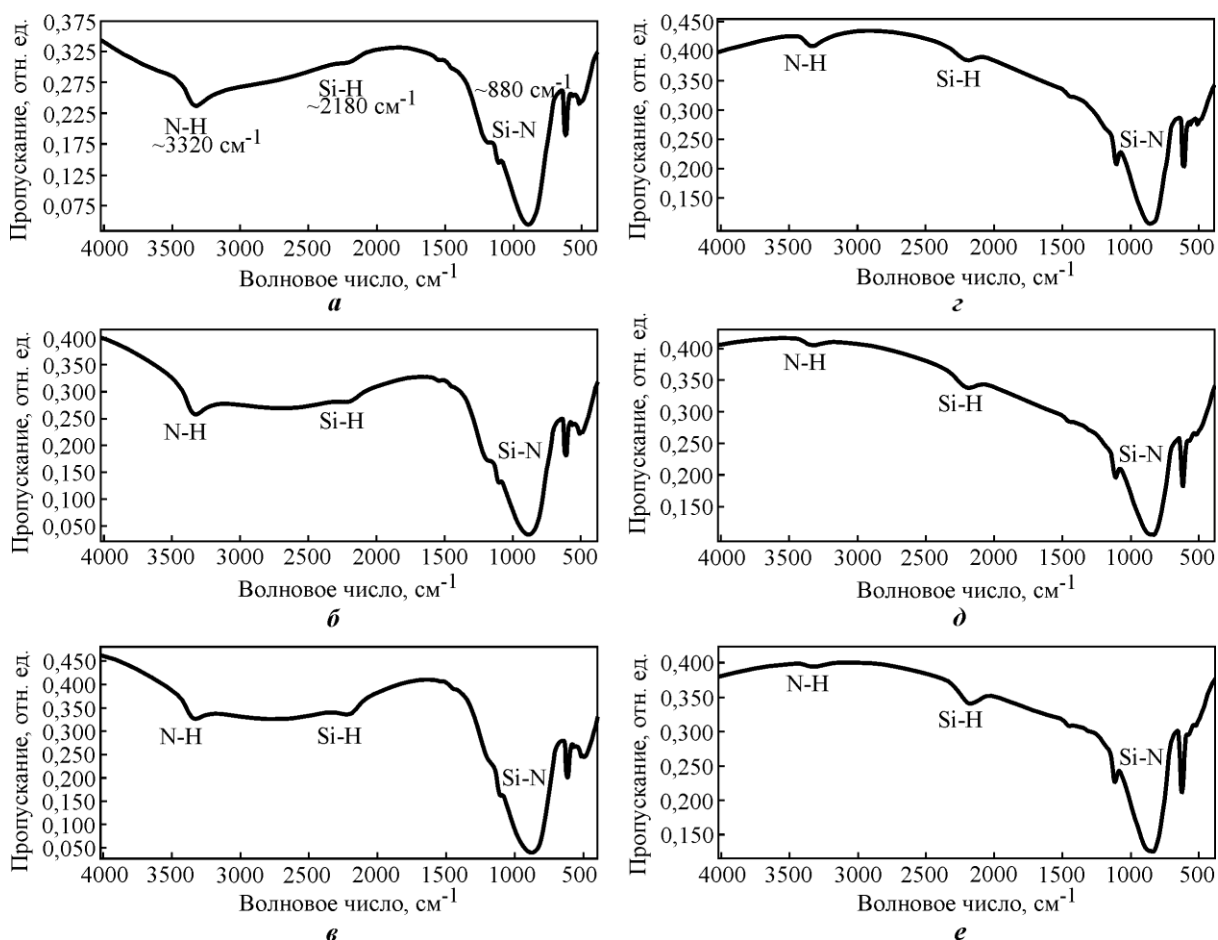


Рис.3. ИК-спектры пропускания для кремниевых пластин с осажденными пленками плазмохимического SiN_x при разном отношении расхода газов R : а – 0,016; б – 0,03; в – 0,09; г – 0,12; д – 0,22; е – 0,25

спектрах наблюдаются характерные пики поглощения. Самый большой пик $\sim 880 \text{ см}^{-1}$ соответствует связи Si–N, пик $\sim 2180 \text{ см}^{-1}$ – связи Si–H, пик $\sim 3320 \text{ см}^{-1}$ – связи N–H. Видно, что с увеличением R на ИК-спектрах пленок плазмохимического SiN_x интенсивность пика поглощения для связи Si–N практически не меняется, интенсивность пика связи N–H убывает, а для связи Si–H возрастает.

Концентрация связи Si–N и водородосодержащих связей Si–H и N–H в пленках плазмохимического SiN_x определялась из ИК-спектров согласно формуле [9, 17]

$$N_{\text{св}} = K_{\text{св}} \alpha H,$$

где $K_{\text{св}}$ – константа соответствующей связи, согласно [9] $K_{\text{Si–N}} = 1,82 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-1}$, $K_{\text{N–H}} = 8,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-1}$, $K_{\text{Si–H}} = 5,9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-1}$; α – показатель поглощения; H – полуширина полосы поглощения соответствующей связи.

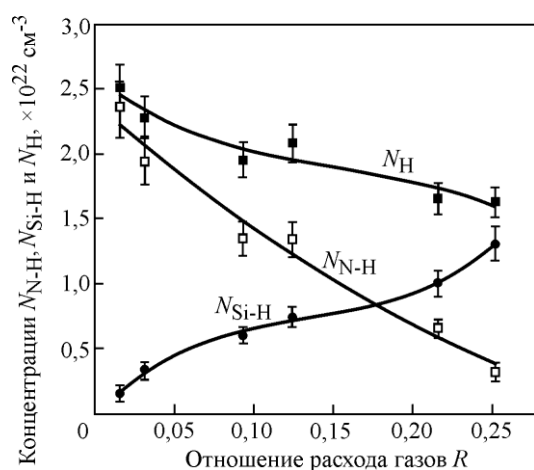


Рис. 4. Зависимости концентраций связей N–H, Si–H и водорода от отношения расхода газов R

Значения показателя поглощения α и полуширины полосы поглощения H определялись из соответствующих полос поглощения ИК-спектров по методу, изложенному в [9, 17]. Рассчитанные значения концентрации связей $N_{\text{Si–N}}$, $N_{\text{N–H}}$, $N_{\text{Si–H}}$ и водорода N_{H} для пленок SiN_x , полученных при различных значениях R , приведены в таблице и на рис. 4. Как видно из таблицы, концентрация связи Si–N для всех образцов пленок SiN_x при $R = 0,016 \dots 0,25$ меняется незначительно ($N_{\text{Si–N}} = 8,72 \cdot 10^{22} \dots 10,7 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$). Для пленки SiN_x , полученной при $R = 0,016$, на

ИК-спектре наблюдается хорошо выраженный пик связи N–H и слабый пик, соответствующий связи Si–H. Для этого образца $N_{\text{N–H}} = 2,36 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $N_{\text{Si–H}} = 1,50 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. На ИК-спектре пленки SiN_x , полученной при $R = 0,09$ оба пика для связей N–H и Si–H хорошо выражены. Здесь $N_{\text{N–H}} = 1,35 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $N_{\text{Si–H}} = 6,01 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Для пленки SiN_x при $R = 0,25$ пик, соответствующий связи N–H, очень слабый, в то же время наблюдается большой пик для связи Si–H. В этом случае $N_{\text{N–H}} = 3,20 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, $N_{\text{Si–H}} = 1,31 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$.

Заключение. В результате проведенного анализа ИК-спектров получены следующие результаты. В пленках плазмохимического SiN_x , осажденных из газовой смеси моносилана SiH_4 и аммиака NH_3 при использовании низкочастотной плазмы, с ростом отношения расхода газов $R = 0,016 \dots 0,25$ концентрация связей N–H убывает от $2,36 \cdot 10^{22}$ до $3,20 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, концентрация связей Si–H возрастает от $1,50 \cdot 10^{21}$ до $1,31 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. При этом концентрация водорода N_{H} убывает от $2,51 \cdot 10^{22}$ до $1,63 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, а концентрация связей $N_{\text{Si–N}}$ изменяется незначительно ($8,72 \cdot 10^{22} \dots 10,7 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$).

Показано, что сжимающие механические напряжения σ убывают от $-1,25 \cdot 10^9$ до $-8,57 \cdot 10^8 \text{ Па}$, показатель преломления n возрастает от 1,91 до 2,08, стехиометрический коэффициент x убывает от 1,40 до 1,20.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.578.21.0188, уникальный идентификатор RFMEFI57816X0188). Часть измерений проведена с использованием оборудования ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Литература

1. Plasma-assisted chemical vapor deposition of dielectric thin films for ULSI semiconductor circuits / *Cote D.R., Nguyen S.V., Stamper A.K. et al.* // IBM Journal of Research and Development. – 1999. – Vol. 43. – № 1/2. – P. 5–38.
2. *Liang L., Wei-guo L., Na C., Chang-long C.* Study on the performance of PECVD silicon nitride thin films // Defence Technology. – 2013. – Vol. 9. – № 2. – P. 121–126.
3. *Tokunaga Kenji, Sugawara Katsuro.* The influence of plasma silicon nitride passivation film quality on aluminum void formation // J. Electrochem. Soc. – 1991. – Vol. 138. – № 1. – P. 176–180.
4. *Пруиц В.Я., Голод С.В.* Упругие нанооболочки на основе кремниевых пленок: формирование, свойства и практическое применение // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47. – № 6. – С. 114–128.
5. *Thompson Scott E., Sun Guangyu, Choi Youn Sung, Nishida Toshikazu.* Uniaxial-process-induced strained-Si: extending the CMOS roadmap // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2006. – Vol. 53. – № 5. – P. 1010–1020.
6. Исследование свойств пленок нитрида и оксида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения на кремниевую подложку / *И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, В.Б. Высоцкий и др.* // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. – № 4. – С. 29–32.
7. Stress control of Si-based PECVD dielectrics / *K.D. Mackenzie, D.J. Johnson, M.W. DeVre et al.* // 207th Electrochemical Society Meeting (Quebec City, Canada, May 2005). – 2005.
8. Stress control of silicon nitride films deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition / *Li Dong-ling, Feng Xiao-fei, Wen Zhi-yu et al.* // Optoelectron. Lett. – 2016. – Vol. 12. – № 4. – P. 0285–0289.
9. *Yin Z., Smith F.W.* Optical dielectric function and infrared absorption of hydrogenated amorphous silicon nitride films: Experimental results and effective-medium-approximation analysis // Physical Review B. – 1990. – Vol. 42. – № 6. – P. 3666–3675.
10. *Кутков И.В., Пехтелев М.И.* Качественный и количественный анализ пленок нитрида кремния методом ИК-спектроскопии // Докл. ТУСУРа. – 2014. – Вып. 31. – № 1. – С. 92–94.
11. *Cianci E., Pirola F., Foglietti V.* Analysis of stress and composition of silicon nitride thin films deposited by electron cyclotron resonance plasma-enhanced chemical vapor deposition for microfabrication processes // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2005. – Vol. 23(1). – P. 168–172.
12. Correlation between silicon-nitride film stress and composition: XPS and SIMS analyses / *L.L. Vanzetti, M. Barozzi, D. Giubertoni et al.* // Surf. Inter. Analysis. – 2006. – Vol. 38. – P. 723–726.
13. *Glang R., Holmwood R.A., and Rosenfeld R.L.* Determination of stress in films on single crystalline silicon substrates // Review of Scientific Instruments. – 1965. – Vol. 36. – № 1. – P. 7–10.
14. *Sinha A.K., Levinstein H.J., Smith T.E.* Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN, Si₃N₄, and SiO₂) on Si substrates // J. of Appl. Phys. – 1978. – Vol. 49. – № 4. – P. 2423–2426.
15. *Дюжнев Н.А., Дедкова А.А., Гусев Е.Э., Новак А.В.* Методика измерения механических напряжений в тонких пленках на пластине с помощью оптического профилометра // Изв. вузов. Электроника. – 2016. – Т. 21. – № 4. – С. 367–372.
16. *Гриценко В.А.* Атомная структура аморфных нестехиометрических оксидов и нитридов кремния // УФН. – 2008. – Т. 178. – № 7. – С. 727–737.
17. *Lanford W.A., Rand M.J.* The hydrogen content of plasma-deposited silicon nitride // J. of Appl. Phys. – 1978. – Vol. 49. – № 4. – P. 2473–2477.

Поступила после доработки 01.12.2016 г.; принята к публикации 24.01.2017 г.

Новак Андрей Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории осаждения АО «Ангстрем» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 2), ассистент кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), novak-andrei@mail.ru

Новак Виктор Рудольфович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «НИИФП им. Лукина» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский проспект, д.5).

Дедкова Анна Александровна – инженер Научно-технологического центра «Нано-и микросистемной техники» МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Гусев Евгений Эдуардович – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ, инженер Научно-технологического центра «Нано- и микросистемной техники» МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

References

1. Cote D.R., Nguyen S.V., Stamper A.K. et al. Plasma-assisted chemical vapor deposition of dielectric thin films for ULSI semiconductor circuits. *IBM Journal of Research and Development*, 1999, vol. 43, no. 1/2, pp. 5–38.
2. Liang L., Wei-guo L., Na C., Chang-long C. Study on The Performance of PECVD Silicon Nitride Thin Films. *Defence Technology*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 121–126.
3. Tokunaga Kenji, Sugawara Katsuro. The Influence of Plasma Silicon Nitride Passivation Film Quality on Aluminum Void Formation. *J. Electrochem. Soc.*, 1991, vol. 138, no. 1, pp. 176–180.
4. Prints V.Ya., Golod S.V. Uprugie nanooobolochki na osnove kremnievykh plenok: formirovanie, svoystva i prakticheskoe primeneniye [Elastic silicon-film-based nanoshells: formation, properties and applications]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, vol.47, no. 6, pp. 114–128. (In Russian).
5. Thompson Scott E., Sun Guangyu, Choi Youn Sung, Nishida Toshikazu. Uniaxial-Process-Induced Strained-Si: Extending the CMOS Roadmap. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, vol. 53, no 5, pp. 1010–1020.
6. Rubtsevich I.I., Solov'ev Ya.A., Vysotskij V.B. et al. Issledovanie svoystv plenok nitrida i oksida kremniya, poluchennykh metodom plazmokhimicheskogo osazhdeniya na kremnievuyu podlozhku [Investigation of properties of nitride and silicon oxide films grown by plasma-chemical deposition on a silicon substrate]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature – Technology and design in electronic equipment*, 2011, no. 4, pp. 29–32. (In Russian).
7. Mackenzie K.D., Johnson D.J., DeVre M.W., Westerman R.J., and Reelfs B.H. Stress control of Si-based PECVD dielectrics. *207th Electrochemical Society Meeting*. Quebec City, Canada, 2005.
8. Li Dong-ling, Feng Xiao-fei, Wen Zhi-yu, Shang Zheng-guo, She Yin. Stress control of silicon nitride films deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Optoelectron. Lett.*, 2016, vol.12, no. 4, pp. 0285–0289.
9. Yin Z., Smith F.W. Optical dielectric function and infrared absorption of hydrogenated amorphous silicon nitride films: Experimental results and effective-medium-approximation analysis. *Physical Review B*, 1990, vol. 42, no. 6, pp. 3666–3675.
10. Kutkov I.V., Pekhtev M.I. Kachestvennyy i kolichestvennyy analiz plenok nitrida kremniya metodom IK-spektroskopii [Qualitative and quantitative analysis of silicon nitride films using by IR spectroscopy]. *Dokl. TUSUR – Proceedings of TUSUR University*, 2014, vol. 31, no.1, pp. 92–94. (In Russian).
11. Cianci E., Pirola F., Foglietti V. Analysis of stress and composition of silicon nitride thin films deposited by electron cyclotron resonance plasma-enhanced chemical vapor deposition for microfabrication processes. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2005, vol. 23(1), pp. 168–172.
12. Vanzetti L. L., Barozzi M., Giubertoni D., Kompocholis C., A. Bagolini A. and P. Bellutti P. Correlation between silicon-nitride film stress and composition: XPS and SIMS analyses. *Surf. Inter. Analysis*, 2006, vol. 38, pp. 723–726.
13. Glang R., Holmwood R.A., Rosenfeld R.L. Determination of Stress in Films on Single Crystalline Silicon Substrates. *Review of Scientific Instruments*, 1965, vol. 36, no. 1, pp. 7–10.
14. Sinha A.K., Levinstein H.J., Smith T.E. Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN, Si₃N₄, and SiO₂) on Si substrates. *J. of Appl. Phys.*, 1978, vol. 49, no. 4, pp. 2423–2426.
15. Dyuzhev N.A., Dedkova A.A., Gusev E.EH., Novak A.V. Metodika izmereniya mekhanicheskikh napryazhenij v tonkikh plenkakh na plastine s pomoshh'yu opticheskogo profilometra [Method for Measurement of Mechanical Stresses in Thin Films on Wafer Using an Optical Profilometer]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of universities. Electronics*, 2016, vol. 21, no.4, pp. 367–372. (In Russian).
16. Gritsenko V.A. Atomnaya struktura amorfnykh nestekhiometricheskikh oksidov i nitridov kremniya [Atomic structure of the amorphous nonstoichiometric oxides and nitrides of silicon]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk – Physics-Uspekhi*, 2008, vol. 178, no. 7, pp. 727–737. (In Russian).
17. Lanford W.A., Rand M.J. The hydrogen content of plasmadeposited silicon nitride. *J. of Appl. Phys.*, 1978, vol. 49, no. 4, pp. 2473–2477.

Submitted 01.12.2016; accepted 24.01.2017