



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-52-60>

УДК 539.25, 538.91, 538.97

СИНТЕЗ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ МЕТОДОМ ICPCVD

Н. С. КОВАЛЬЧУК¹, С. А. ДЕМИДОВИЧ¹, Л. А. ВЛАСУКОВА², И. Н. ПАРХОМЕНКО²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Приведены результаты исследования уровня остаточных механических напряжений и стойкости к обработке в кислотных и щелочных травителях пленок SiN_x, полученных методом плазменно-активируемого осаждения из газовой фазы в реакторе индуктивно-связанной плазмы. Процесс осаждения проводился из смеси газов SiH₄-N₂-Ar-He при 400–500 °С. Обычно осаждение диэлектрических пленок в плазме высокой плотности осуществляется при давлении в рабочей камере в диапазоне 0,13–4,00 Па. В проведенных исследованиях за счет увеличения давления до 12–18 Па удалось существенно снизить уровень остаточных механических напряжений в пленках SiN_x. При этом компактная микроструктура пленок обеспечивала их высокую химическую стойкость. Значения показателя преломления пленок варьировали от 2,06 до 1,93 в зависимости от режима осаждения. Скорость травления пленок в 50%-ной фтористоводородной кислоте составляла 25–32 нм/мин, что сравнимо со значениями для нитридных пленок, полученных высокотемпературным методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении. Синтезированные пленки SiN_x также были устойчивы к воздействию 40%-ного раствора гидроксида калия при 90 °С.

Ключевые слова: пленки SiN_x, индуктивно-связанная плазма, механические напряжения, жидкостное травление, фтористоводородная кислота, гидроксид калия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Синтез пленок нитрида кремния с улучшенными механическими и химическими свойствами методом ICPCVD / Н. С. Ковальчук [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 52–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-52-60>.

SYNTHESIS OF SILICON NITRIDE FILMS WITH IMPROVED MECHANICAL AND CHEMICAL PROPERTIES BY ICPCVD METHOD

NATALIA KOVAL'CHUK¹, SERGEY DEMIDOVICH¹, LIUDMILA VLASUKOVA²,
IRINA PARKHOMENKO²

¹JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of a study of the residual mechanical stress level and resistance to processing in acid and alkaline etchants of SiN_x films obtained by plasma-activated vapor deposition in an inductively coupled plasma reactor. The deposition process was carried out from a SiH₄-N₂-Ar-He gas mixture at 400–500 °C. Typically, the deposition of dielectric films in high-density plasma is carried out at a pressure in the working chamber in the range of 0.13–4.00 Pa. In the conducted studies, by increasing the pressure to 12–18 Pa, it was possible to significantly reduce the level of residual mechanical stresses in the SiN_x films. At the same time, the compact microstructure of the films ensured their high chemical resistance. The refractive index of the films varied from 2.06 to 1.93, depending on the deposition mode. The etching rate of the films in 50 % hydrofluoric acid was 25–32 nm/min, which was comparable to values for nitride films obtained by high-temperature chemical vapor deposition at low pressure. The synthesized SiN_x films were also resistant to exposure to a 40 % potassium hydroxide solution at 90 °C.

Keywords: SiN_x films, inductively coupled plasma, mechanical stresses, wet etching, hydrofluoric acid, potassium hydroxide.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Koval'chuk N., Demidovich S., Vlasukova L., Parkhomenko I. (2026) Synthesis of Silicon Nitride Films with Improved Mechanical and Chemical Properties by ICP-CVD Method. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 52–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-52-60> (in Russian).

Введение

Нитрид кремния (SiN_x) – ключевой диэлектрический материал в микроэлектронике, используемый при производстве МЭМС-датчиков (для микроэлектромеханических систем), оптоэлектронных и КМОП-приборов [1]. Традиционно пленки SiN_x получают методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) или методом плазменно-активированного осаждения из газовой фазы (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD). Методом LPCVD при 750–800 °С получают пленки стехиометрического состава (Si₃N₄). Плазменная активация процесса осаждения позволяет снизить температуру синтеза SiN_x до 200–400 °С, при этом в качестве газов-прекурсоров используются моносилан (SiH₄) и аммиак (NH₃). Недостатком PECVD-метода является высокая (до 40 ат.%) концентрация водорода в пленках в виде связей Si–H и N–H. Это снижает плотность и химическую стойкость пленок и ухудшает характеристики приборов [2, 3]. Устойчивость нитридных пленок к травлению в кислотах и щелочах критична, если их используют как «стоп-слои» [4]. Синтез SiN_x с пониженным содержанием водорода (8–10 ат.%) и составом, близким к стехиометрическому, при температурах 200–400 °С возможен в плазме высокой плотности, в которой скорость диссоциации N₂ достаточно высока, чтобы использовать его в качестве прекурсора вместо NH₃ для снижения концентрации водорода в растущей пленке.

Для создания плазмы высокой плотности используется метод химического осаждения из газовой фазы с индуктивно-связанной плазмой (Inductively-Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition, ICP-CVD). Показателем качества нитридных пленок является скорость их травления $v_{\text{травл}}$ в растворах фтористоводородной кислоты (HF) и гидроксида калия (KOH). Существует корреляция между $v_{\text{травл}}$ в HF и плотностью SiN_x [5], что позволяет качественно оценивать плотность нитридных пленок по скорости травления в 50%-ном водном растворе HF. Процессы травления в кислотных и щелочных травителях и их связь с режимами осаждения и физическими свойствами пленок PECVD-SiN_x исследованы в [2, 4, 6, 7]. Однако данных по химической стойкости пленок SiN_x, полученных в плазме высокой плотности из смеси SiH₄+N₂, в литературе немного.

В [8] изучалась устойчивость ICP-CVD-SiN_x к HF в зависимости от соотношения SiH₄/N₂, мощности ICP-электрода и давления в рабочей камере. Показано, что устойчивость к травителю высока при малых скоростях осаждения SiN_x (~10 нм/мин), что связывается с более компактной микроструктурой пленок. Осаждение нитридных пленок в [8] проводилось при давлениях в рабочей камере 0,5–1,3 Па. В [9] показано, что увеличение давления в камере до 2,5–3,5 Па способствует уплотнению микроструктуры пленок SiN_x и устраняет дрейф остаточных напряжений со временем. Уровень механических напряжений в нитридных пленках имеет существенное значение для ряда применений. Так, для использования в МЭМС необходимы нитридные пленки с минимизированными напряжениями [10]. С другой стороны, пленки нитрида кремния с высокими растягивающими напряжениями улучшают подвижность носителей заряда в полевых транзисторах (MOSFET) [11].

С учетом вышесказанного выполнена оценка параметров нитридных пленок, полученных методом ICP-CVD в условиях повышенного давления в реакционной камере. Исследованы механические напряжения, показатель преломления и стойкость к обработке в растворах HF и KOH для пленок ICP-CVD-SiN_x, осажденных при давлениях в рабочей камере до 18 Па. Цель проведенных экспериментов – получение нитрида кремния с низким уровнем механических напряжений для использования в изделиях МЭМС, а также в качестве маски при травлении в кислотах и щелочах.

Методика проведения эксперимента

Пленки SiN_x осаждались методом химического вакуумного осаждения на установке STE ICP200D (SemiTEq, Санкт-Петербург) при 400 и 500 °С. Пластины кремния КДБ-10 (111)

обрабатывались в растворе Каро (перекисно-сернокислотный раствор), ПАР-5 (перекисно-аммиачный раствор), затем в реакторе проводилась ионная очистка в аргоне в течение 30 с. Расход SiH_4 поддерживался на постоянном уровне 15 $\text{см}^3/\text{мин}$, расход N_2 варьировался от 9 до 11 $\text{см}^3/\text{мин}$. В качестве газа-носителя использовалась смесь аргона и гелия с расходами 350 и 120 $\text{см}^3/\text{мин}$ соответственно. Мощность ИСР-электрода изменялась от 600 до 1200 Вт при частоте 13,56 МГц, давление в камере p варьировалось в диапазоне 5–18 Па.

Визуальный контроль, измерение толщины пленок и контроль рельефа поверхности пластин проводились на конфокальном датчике CFM 100× установки оптической метрологии FRT MicroProf 200 (Германия), для измерения остаточных механических напряжений σ использовался быстрый оптический датчик CWL. Подробно измерение остаточных напряжений описано в [9]. Показатель преломления n измерялся на лазерном эллипсомере ЛЭФ-3М-1. Измерения σ и n выполнялись для пленок толщиной ~ 100 нм, в особо отмеченных случаях использовались пленки толщиной 1000 нм.

Обработка в 50%-ной HF проводилась при комнатной температуре в течение 120 с, обработка в 40%-ном водном растворе KOH – при 90 °C в течение 20 мин. Использовались реагенты квалификации «осч» (особо чистые вещества) и деионизированная вода. Скорость травления определялась по отношению толщины удаленного слоя ко времени травления.

Результаты исследований и их обсуждение

Повышение давления в рабочей камере при прочих равных условиях приводит к существенному уменьшению скорости травления пленки SiN_x в HF. На рис. 1, *a* изображена зависимость скорости травления пленки в HF от давления в реакционной камере при соотношении $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2] = 1,37$ в процессе осаждения. Так, увеличение давления от 5 до 15 Па приводит к уменьшению скорости травления SiN_x в HF почти в четыре раза.

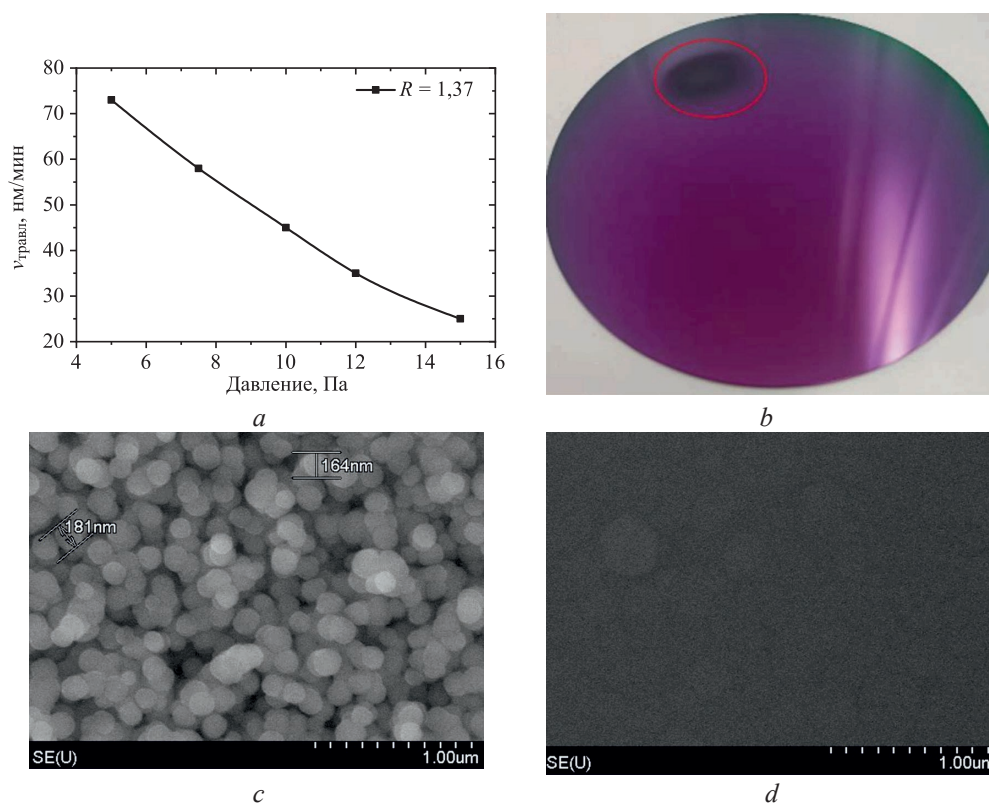


Рис. 1. Зависимость скорости травления SiN_x в HF от давления в реакционной камере (*a*); вид матового пятна на пленке, осажденной при давлении 17,5 Па (*b*) [12]; СЭМ-изображение поверхности пленки в области пятна (*c*) и в чистой области (*d*) [12]
Fig. 1. Dependence of the etching rate of SiN_x in HF on the pressure in the reaction chamber (*a*); appearance of a matte spot on a film deposited at a pressure of 17.5 Pa (*b*) [12]; SEM image of the film surface in the spot region (*c*) and in the clean region (*d*) [12]

Как отмечено в [12], дальнейшее увеличение давления может приводить к появлению на поверхности пленки макродефектов роста в виде матовых пятен (рис. 1, *b*). В этих областях наблюдаются скопления дефектов роста в сочетании с микроотверстиями (рис. 1, *c*) вместо сплошного покрытия, как на бездефектных участках (рис. 1, *d*), а концентрация кислорода существенно выше в сравнении с неповрежденной поверхностью пленки. Увеличение мощности ИСР-источника препятствует появлению матовых пятен. Однако, чем выше рабочее давление, тем большую мощность нужно подавать, чтобы предотвратить появление макродефектов. Таким образом, мы упираемся в «потолок» подаваемой мощности, которую может обеспечить установка.

В экспериментах осаждение пленок проводилось при давлении ≤ 18 Па. Наибольшее влияние на механические напряжения, показатель преломления, скорость роста и травления пленок SiN_x в HF оказывают соотношение реагирующих газов $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2]$ (R) и мощность ИСР-источника. На рис. 2 приведены характеристики пленок SiN_x в зависимости от мощности для различных R и уровней давления в рабочей камере. При $p = 12$ Па мощность источника варьировалась в диапазоне 700–900 Вт, при $p = 15$ Па – от 900 до 1200 Вт.

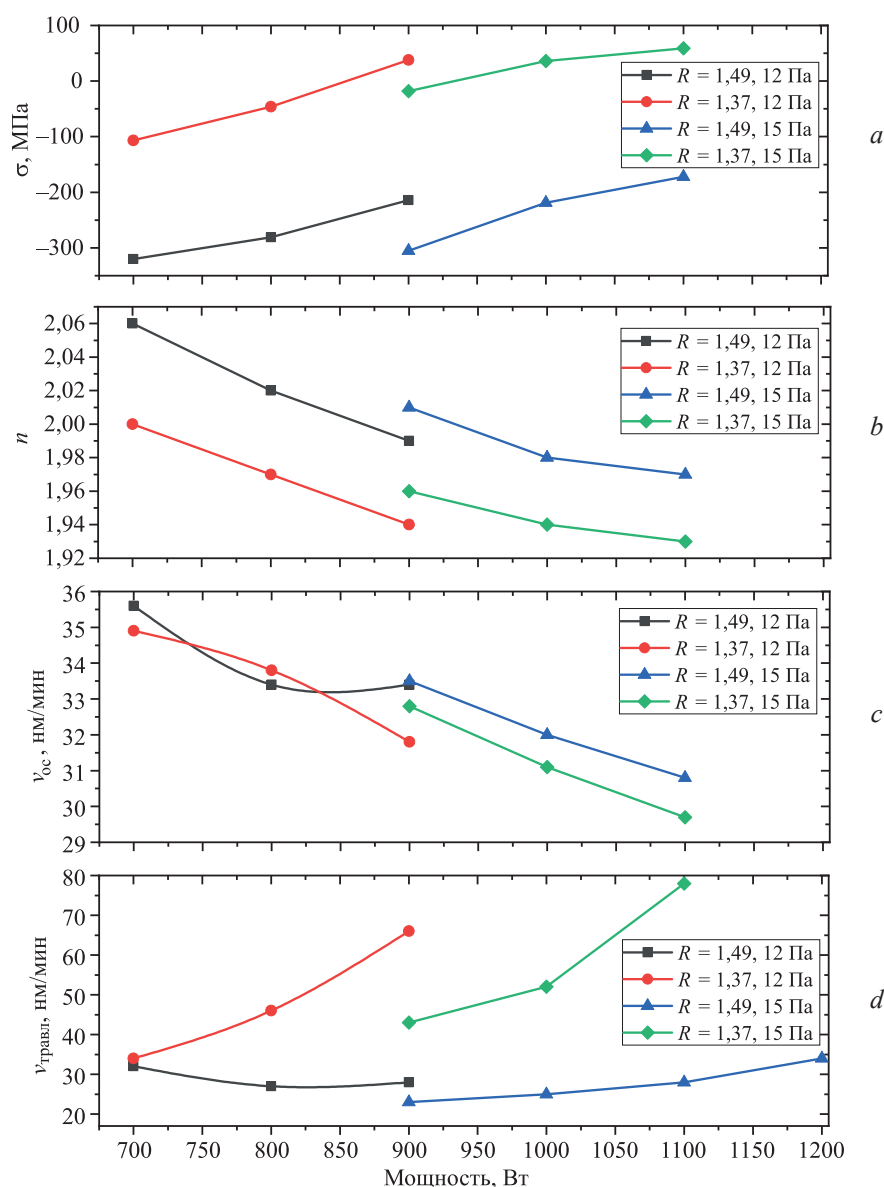


Рис. 2. Зависимость остаточных механических напряжений (*a*), показателя преломления (*b*), скорости осаждения (*c*) и скорости травления в HF (*d*) от мощности ИСР-источника для различных соотношений R и давлений в камере

Fig. 2. Dependence of residual mechanical stresses (*a*), refractive index (*b*), deposition rate (*c*) and etching rate in HF (*d*) on the ICP source power for different R ratios and chamber pressures

Как видно из рис. 2, а, при меньшем R (1,37) напряжения σ минимальны и варьируются от (-100) до (+50) МПа, если процесс проводится при $p = 12$ Па, и от (-25) до (+50) МПа – при $p = 15$ Па. С увеличением мощности источника происходит переход от сжимающих напряжений к растягивающим. С ростом содержания SiH_4 в газовой смеси ($R = 1,49$) сжимающие напряжения возрастают до значений (-300)–(-150) МПа, при этом увеличение мощности источника приводит к уменьшению уровня напряжений. Тенденцию к снижению уровня сжимающих напряжений в пленке и/или изменению знака напряжений (от сжимающих к растягивающим) с повышением мощности источника можно объяснить эффектом бомбардировки поверхности растущей пленки ионами аргона и гелия и активными радикалами азота из газовой смеси. Как показано в [11], обработка в плазме N_2 , аргона или гелия приводит к повышению уровня растягивающих напряжений в PECVD- SiN_x -пленке за счет разрыва связей Si-H и N-H и восстановления связей Si-N . Это запускает химическую перестройку в растущей пленке, приводя к ее уплотнению и сжатию.

Таким образом, плазменная бомбардировка позволяет снизить содержание водорода в растущей пленке. С увеличением мощности источника энергия и концентрация активных частиц в смеси возрастают, усиливая эффект. В рассматриваемом эксперименте за счет увеличения давления в рабочей камере удалось существенно снизить уровень остаточных напряжений в пленках SiN_x в сравнении с данными [1] для PECVD- SiN_x .

Химический состав SiN_x качественно оценивался по показателю преломления. Для стехиометрического материала $n = (2,02 \pm 0,02)$. Большие значения n соответствуют обогащению пленки кремнием, меньшие – обогащению азотом и нежелательными примесями типа водорода и кислорода. В проводимом эксперименте максимальные значения n наблюдались при $R = 1,49$ и составляли 2,06–1,99 при $p = 12$ Па и 2,01–1,97 при $p = 15$ Па. Снижение $[\text{SiH}_4]$ ожидаемо приводило к уменьшению n с минимальными значениями 1,96–1,93 при $p = 15$ Па и $R = 1,37$. Повышение мощности источника уменьшало значения как n , так и соотношения Si/N .

Скорость осаждения пленки при варьировании мощности, давления в камере и соотношения реагентов изменялась незначительно. При $p = 12$ Па ее значения были в диапазоне 35,5–31,5 нм/мин, при $p = 15$ Па она снижалась до минимального значения 29,5 нм/мин при $R = 1,37$ и мощности источника 1100 Вт.

Характер изменения скорости травления нитридных пленок в HF в зависимости от мощности источника определялся соотношением расходов прекурсоров и давлением в камере. При $R = 1,37$ с ростом мощности скорость $v_{\text{травл}}$ увеличивалась от 35 до 65 нм/мин при $p = 12$ Па и от 45 до 80 нм/мин – при $p = 15$ Па. При $R = 1,49$ $v_{\text{травл}}$ изменялась незначительно (от ~25 до 32 нм/мин) во всем исследованном диапазоне мощности. По данным [8], при обработке ICPCVD- SiN_x -пленок в смеси 50%-ной HF и воды (1:7) $v_{\text{травл}} \approx 10$ нм/мин. Такие малые значения получены для пленок с повышенным содержанием кремния, показатель преломления которых варьировался от 2,7 до 2,2. В [13] отмечено, что для пленок ICPCVD- SiN_x $v_{\text{травл}}$ в смеси 50%-ной HF и воды (1:5) также составляла ~10 нм/мин. Нужно учитывать, что в [8, 13] оценивалась устойчивость пленок к разбавленным растворам HF, а в рассматриваемом эксперименте измерялась $v_{\text{травл}}$ в неразбавленной 50%-ной HF.

Скорость травления SiN_x увеличивается линейно с повышением концентрации HF. В [3] показано, что для пленок PECVD- SiN_x , осажденных при 380 °C, $v_{\text{травл}}$ в разбавленной смеси HF(50 %): $\text{H}_2\text{O} = 1:100$ составляла 1–2 нм/мин, а растворение пленки в смеси HF(50 %): $\text{H}_2\text{O} = 1:10$ происходило со скоростью 10–17 нм/мин. Для сравнения, $v_{\text{травл}}$ в 50%-ной HF для LPCVD-пленок, полученных при температурах 700–900 °C, и полученных методом PECVD при 350 °C, составляют 8 и 150–300 нм/мин соответственно [14]. Таким образом, в рассматриваемом эксперименте при $p = 15$ Па, $R = 1,49$ и температуре осаждения 400 °C получены пленки с повышенной стойкостью к HF, сравнимой со стойкостью LPCVD-пленок.

При использовании SiN_x в качестве маски для глубокого травления кремния применяют травители на основе KOH [7, 15]. Одной из проблем при этом является неконтролируемое травление через микропоры в маскирующем покрытии нитрида кремния. При обработке раствор щелочи проникает через микроотверстия в пленке к поверхности подложки и начинает травить кремний с образованием локальных областей травления, форма которых определяется кристаллографической ориентацией подложки. В проводимом исследовании химическая стойкость пленок SiN_x к раствору KOH оценивалась из анализа количества локальных областей травления кремния на единицу площади, их размеров и глубины. Толщина пленок SiN_x в этом случае составляла ~1000 нм. Следует отметить, что под воздействием щелочи области матовых пятен (рис. 1, б)

на пленках нитрида кремния разрушаются гораздо быстрее в сравнении неповрежденными участками пленки.

В табл. 1 приведены результаты травления в KOH в зависимости от режимов формирования пленок SiN_x: лучшими по устойчивости к воздействию щелочи оказались пленки SiN_x, полученные при P = 16 Па и T_{осажд} = 500 °С. Соотношение SiH₄/N₂ в меньшей степени влияет на устойчивость нитрида кремния к щелочи. Однако увеличение содержания кремния в пленке улучшает ее химическую стойкость.

Таблица 1. Результаты травления пленок SiN_x в растворе 40%-ного KOH (90 °С, 20 мин) в зависимости от режимов осаждения

Table 1. Results of etching SiN_x films in a 40 % KOH solution (90 °C, 20 min) depending on the deposition modes

Номер режима	SiH ₄ /N ₂	p, Па	T _{осажд} , °С	Результат травления
1	1,67	18	500	Скопление локальных областей травления различных размеров, но не более 20 мкм
2	1,49	18	500	Единичные локальные области травления размером <7 мкм
3	1,49	15	400	
4	1,37	16	500	
5	1,49	15	400	
6	1,49	16	500	Локальных областей травления на поверхности кремния не обнаружено
7	1,67	16	500	

Примечание – Для всех режимов мощность источника составляла 1000 Вт.

Следует отметить, что оптимальные по стойкости к воздействию раствора щелочи режимы осаждения нитридных пленок сходны с режимами, для которых наблюдались минимальные скорости растворения SiN_x в 50%-ной HF. Показатели для режимов из табл. 1 показаны на рис. 3.

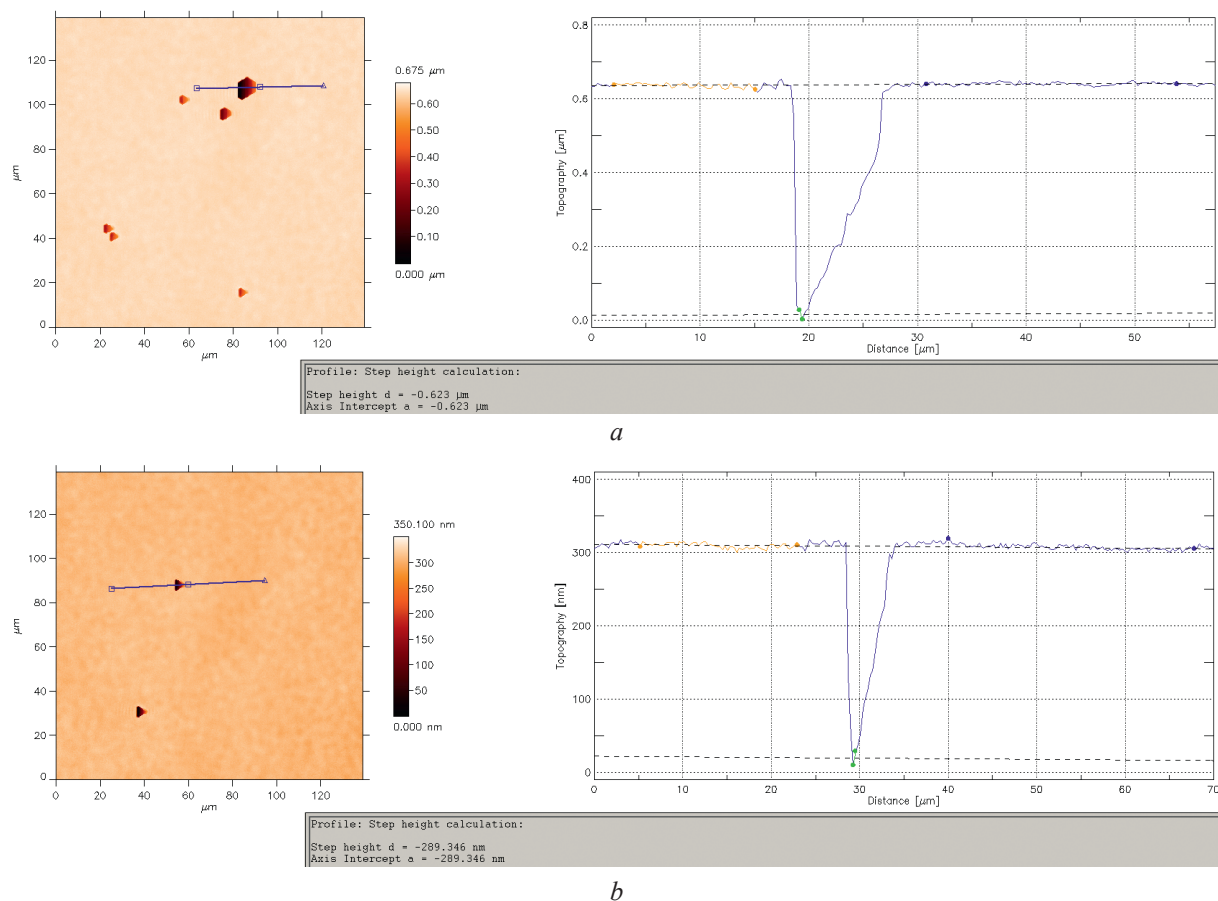


Рис. 3. Вид поверхности кремния после травления и профили поверхности для режимов из табл. 1: а – № 1; б – № 2–5

Fig. 3. Appearance of the silicon surface after etching and surface profiles for the modes from Tabl. 1: а – No 1; б – No 2–5

Заключение

1. Исследованы параметры нитридных пленок, полученных в плазме высокой плотности методом плазменно-активируемого осаждения из газовой фазы с индуктивно-связанной плазмой в условиях повышенного (12–18 Па) давления в рабочей камере при 400–500 °С. Определены режимы осаждения нитрида кремния с малыми механическими напряжениями. Показано, что при соотношении реагирующих газов $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2] = 1,37$ остаточные напряжения в пленке нитрида минимальны и варьируются от (–100) до (+50) МПа, если процесс проводится при давлении 12 Па, и от (–25) до (+50) МПа – при 15 Па. С повышением мощности источника наблюдается переход от сжимающих напряжений к растягивающим. При $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2] = 1,49$ и температуре осаждения 400 °С скорость травления SiN_x в 50%-ном растворе фтористоводородной кислоты составляла 25–32 нм/мин, что сравнимо с результатами для пленок, полученных методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении и температуре 700–900 °С. Лучшими по устойчивости к воздействию щелочи оказались пленки SiN_x , полученные при мощности ICP-источника 1000 Вт, рабочем давлении 16 Па и температуре 500 °С.

2. Использование метода плазменно-активируемого осаждения из газовой фазы с индуктивно-связанной плазмой в условиях повышенного давления в рабочей камере позволяет получать пленки SiN_x с компактной микроструктурой, пригодные для применения в качестве как конструкционного материала в МЭМС-датчиках, так и маски при травлении в растворах фтористоводородной кислоты и гидроксида калия.

Список литературы

1. Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: State-of-the-Art Processing Technologies, Properties, and Applications / A. E. Kaloyeros [et al.] // ECS J. of Solid-State Science and Technology. 2020. Vol. 9. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/aba447>.
2. Васильев, В. Ю. Технология получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Ч. 8. Влияние водорода в пленках на их свойства / В. Ю. Васильев // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. С. 352–367. <https://doi.org/10.17587/nmst.21.352-367>.
3. Differences in HF Wet Etching Resistance of PECVD $\text{SiN}_x\text{:H}$ Thin Films / M. Barcellona [et al.] // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 306. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128023>.
4. Investigation of the Physical Properties of Plasma Enhanced Atomic Layer Deposited Silicon Nitride as Etch Stopper / H. S. Kim [et al.] // ACS Applied Materials & Interfaces. 2018. Vol. 10. P. 44825–44833. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b15291>.
5. Correlation of Film Density and Wet Etch Rate in Hydrofluoric Acid of Plasma Enhanced Atomic Layer Deposited Silicon Nitride / J. Provine [et al.] // AIP Advances. 2016. Vol. 6. <https://doi.org/10.1063/1.4954238>.
6. Dependence of Wet Etch Rate on Deposition, Annealing Conditions and Etchants for PECVD Silicon Nitride Film / T. Longjuan [et al.] // Journal of Semiconductors. 2009. Vol. 30. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/30/9/096005>.
7. Improved PECVD Si_xN_y Film as a Mask Layer for Deep Wet Etching of the Silicon / J. Han [et al.] // Materials Research Express. 2017. Vol. 4. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa8782>.
8. Fundamental Properties of a- $\text{SiN}_x\text{:H}$ Thin Films Deposited by ICP-PECVD for MEMS Applications / D. Dergez [et al.] // Applied Surface Science. 2013. Vol. 84. P. 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.104>.
9. Механические напряжения в пленках SiN_x при химическом осаждении из газовой фазы в плазме высокой плотности / Н. С. Ковальчук [и др.] // Неорганические материалы. 2022. Т. 58. С. 938–944. <https://doi.org/10.31857/S0002337X2209007X>.
10. The Impact of Residual Stress on Resonating Piezoelectric Devices / G. Ross [et al.] // Materials and Design. 2020. Vol. 196. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109126>.
11. Comparative Study on the Influence Mechanism of He/Ar/ N_2 Plasma Treatments on the High Tensile Stress of a Multilayer Silicon Nitride Film / J. Ning [et al.] // RSC Advances. 2025. Vol. 15. <https://doi.org/10.1039/d5ra02111a>.
12. Демидович, С. А. Особенности нанесения пленок SiN_x методом ICP CVD в области повышенного давления / С. А. Демидович, А. Д. Юник // Электронные системы и технологии: сб. матер. 60-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апр. 2024 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2024. С. 254–257.
13. Multifunctional ICP-PECVD Silicon Nitride Layers for High-Efficiency Silicon Solar Cell Applications / J. Engelhardt [et al.] // Energy Procedia. 2015. Vol. 77. P. 786–790. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.111>.

14. LPCVD and PECVD Silicon Nitride for Microelectronics Technology / B. C. Joshi [et al.] // *Indian Journal Engineering and Material Sciences*. 2000. Vol. 7. P. 303–309.
15. Fabrication of Free-Standing Nanoscale SiN_x Membranes with Enhanced Burst Pressure Via Improved Etching Process / H.-J. Shin [et al.] // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol. 297. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111538>.

Поступила 18.03.2026

Принята в печать 15.04.2026

References

1. Kaloyeros A. E., Pan Y., Goff J., Arkles B. (2020) Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: State-of-the-Art Processing Technologies, Properties, and Applications. *ECS J. of Solid-State Science and Technology*. 9. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/aba447>.
2. Vasilyev V. Yu. (2019) Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystems Technologies. Part 8. Hydrogen Influence on Basic Film Properties. *Nano- and Microsystems Technology*. 21, 352–367. <https://doi.org/10.17587/nmst.21.352-367> (in Russian).
3. Barcellona M., Samperi O., Russo D., Battaglia A., Fischer D. (2023) Differences in HF Wet Etching Resistance of PECVD SiN_x:H Thin Films *Materials Chemistry and Physics*. 306. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128023>.
4. Kim H. S., Meng X., Kim S. J., Lucero A. T., Cheng L., Byun Y.-Ch., et al. (2018) Investigation of the Physical Properties of Plasma Enhanced Atomic Layer Deposited Silicon Nitride as Etch Stopper. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 10, 44825–44833. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b15291>.
5. Provine J., Schindler P., Kim Y., Walch S. P., Kim H. J., Kim K.-H., et al. (2016) Correlation of Film Density and Wet Etch Rate in Hydrofluoric Acid of Plasma Enhanced Atomic Layer Deposited Silicon Nitride. *AIP Advances*. 6. <https://doi.org/10.1063/1.4954238>.
6. Longjuan T., Yinfang Z., Jinling Y., Yan L., Wei Z., Jing X., et al. (2009) Dependence of Wet Etch Rate on Deposition, Annealing Conditions and Etchants for PECVD Silicon Nitride Film. *Journal of Semiconductors*. 30. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/30/9/096005>.
7. Han J., Yin Y. J., Han D., Dong L. Z. (2017) Improved PECVD Si_xN_y Film as a Mask Layer for Deep Wet Etching of the Silicon. *Materials Research Express*. 4. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa8782>.
8. Dergez D., Schalko J., Bittner A., Schmid U. (2013) Fundamental Properties of a-SiN_x:H Thin Films Deposited by ICP-PECVD for MEMS Applications. *Applied Surface Science*. 84, 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.104>.
9. Koval'chuk N. S., Demidovich S. A., Vlasukova L. A., Parkhomenko I. N., Komarov F. F. (2022) Mechanical Stress in SiN_x Films Grown by High Density Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition. *Inorganic Materials*. 58, 906–911. <https://doi.org/10.1134/S0020168522090072> (in Russian).
10. Ross G., Dong H., Karuthedath C. B., Sebastian A. Th., Pensala T., Paulasto-Krücke M. (2020) The Impact of Residual Stress on Resonating Piezoelectric Devices. *Materials and Design*. 196. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109126>.
11. Ning J., Tang Z., Sun Y., Niu Ch., Yang J., Zhou D. (2025) Comparative Study on the Influence Mechanism of He/Ar/N₂ Plasma Treatments on the High Tensile Stress of a Multilayer Silicon Nitride Film. *RSC Advances*. 15. <https://doi.org/10.1039/d5ra02111a>.
12. Demidovich S., Yunik A. (2024) Features of Application of SiN_x Films by ICP CVD Method in the Area of High Pressure. *Electronic Systems and Technologies: Proceedings of the 60th Scientific Conference of Postgraduate, Master's and Undergraduate Students of BSUIR, Minsk, April 22–26*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 254–257 (In Russian).
13. Engelhardt J., Hahn G., Terheiden B. (2015) Multifunctional ICP-PECVD Silicon Nitride Layers for High-Efficiency Silicon Solar Cell Applications. *Energy Procedia*. 77, 786–790. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.111>.
14. Joshi B. C., Eranna G., Runthala D. P., Dixit B. B., Wadhavan O. P., Vyas P. (2000) LPCVD and PECVD Silicon Nitride for Microelectronics Technology. *Indian Journal Engineering and Material Sciences*. 7, 303–309.
15. Shin H.-J., Park I. S., Jang Y. J., Wi S. J., Lee G. S., Ahn J. (2019) Fabrication of Free-Standing Nanoscale SiN_x Membranes with Enhanced Burst Pressure Via Improved Etching Process. *Sensors and Actuators A: Physical*. 297. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111538>.

Received: 18 March 2026

Accepted: 15 April 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Ковальчук Н. С., канд. техн. наук, доц., зам. ген. дир. – гл. инж., ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

Демидович С. А., вед. инж. отрасл. лаб. новых технологий и материалов, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Власукова Л. А., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. НИЛ материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет (БГУ)

Пархоменко И. Н., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. НИЛ материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники, БГУ

Адрес для корреспонденции

220045, Республика Беларусь,
Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 17 209-59-29
E-mail: vlasukova@bsu.by
Власукова Людмила Александровна

Information about the authors

Koval'chuk N., Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Deputy Director – Chief Engineer, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

Demidovich S., Leading Engineer at the Branch Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL”

Vlasukova L., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher at the Research Laboratory of Materials and Device Structures for Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University (BSU)

Parkhomenko I., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher at the Research Laboratory of Materials and Device Structures for Micro- and Nanoelectronics, BSU

Address for correspondence

220045, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Tel.: +375 17 209-59-29
E-mail: vlasukova@bsu.by
Vlasukova Liudmila