

**Влияние условий плазмохимического осаждения нестехиометрического нитрида кремния на оптические свойства его слоев***Г.А. Рудаков<sup>1,2</sup>, А.А. Сизарев<sup>3,2</sup>, В.А. Федирко<sup>4,2</sup>, Е.А. Фетисов<sup>2</sup>*<sup>1</sup>НПК «Технологический центр»<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)<sup>4</sup>Московский государственный университет «СТАНКИН»

Формирование слоев нестехиометрического нитрида кремния  $\text{SiN}_x$  методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) путем разложения азота  $\text{N}_2$  или аммиака  $\text{NH}_3$  и производных моносилана  $\text{SiH}_4$  при температурах ниже  $500\text{ }^\circ\text{C}$  является альтернативным методом по отношению к химическому осаждению стехиометрического нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  из газовой фазы при низком давлении (LPCVD) при синтезе из дихлорсилана  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  и аммиака  $\text{NH}_3$ . Пленки  $\text{SiN}_x$ , полученные методом PECVD, обладают значительно меньшими и хорошо управляемыми внутренними напряжениями при сохранении механических свойств, по сравнению с пленками стехиометрического нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Это позволяет применять  $\text{SiN}_x$  как функциональный материал для приборов на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) и микрооптомеханических систем (МОМС), например, при изготовлении элементов мембран и консолей тепловых ИК-фотоприемников.

Осаждение пленок  $\text{SiN}_x$  проводилось на установке плазмохимического осаждения PlasmaLab 100 ICPCVD компании Oxford Instruments. Осаждение пленок  $\text{SiN}_x$  проводилось при следующих технологических параметрах: температура электрода  $250\text{ }^\circ\text{C}$ , давление в рабочей камере  $1.3\text{ Па}$ , мощность ICP источника  $1200\text{ Вт}$ . Было исследовано соотношение расходов газов моносилана и азота ( $\text{SiH}_4:\text{N}_2$ ) и выбрано – (1:3). В качестве исходных подложек использовались пластины легированного монокристаллического кремния КЭФ-4.5, с ориентацией поверхности (100) и диаметром  $100\text{ мм}$ . Перед процессом осаждения подложки подвергались химической отмывке в перекисно-аммиачном растворе. На одну из поверхностей пластины («фронтальную» поверхность) проводилось осаждение пленки  $\text{SiN}_x$  в диапазоне толщин от  $200\text{ нм}$  до  $1300\text{ нм}$  для различных образцов.

Измерение толщины и показателя преломления ( $n$ ) пленок  $\text{SiN}_x$  проводилось с помощью спектрального эллисометра Sentech Senduro для длины волны  $632.8\text{ нм}$  (табл. 1). Измерение инфракрасных (ИК) спектров пропускания и отражения в диапазоне волновых чисел  $500\text{--}7800\text{ см}^{-1}$  проводилось с использованием ИК Фурье-спектрометра Perkin-Elmer Spectrum 100. Интерференционные экстремумы в ИК спектрах пропускания образцов наблюдаются при различных значениях волновых чисел ( $\nu$ ) в зависимости от толщины пленки  $\text{SiN}_x$ . Зная геометрическую толщину пленки  $\text{SiN}_x$  и разность волновых чисел для соседних интерференционных максимумов, мы определили значения показателя преломления  $\text{SiN}_x$  в среднем ИК диапазоне для исследуемых пленок. В спектрах пропускания в диапазоне волновых чисел  $3000\text{--}500\text{ см}^{-1}$  наблюдаются селективные полосы поглощения нитрида и оксида кремния. В области волновых чисел  $900\text{--}820\text{ см}^{-1}$  имеется широкая и интенсивная характеристическая полоса поглощения нитрида кремния, причем волновое число для пика поглощения и спектральный профиль этой полосы зависят от толщины слоя  $\text{SiN}_x$ . Данный эффект может быть связан со структурой слоя  $\text{SiN}_x$ , зависящей от условий плазмохимического осаждения. Отчетливо выраженные полосы поглощения при  $1120\text{ см}^{-1}$ ,  $2300\text{ см}^{-1}$  и  $620\text{ см}^{-1}$  обусловлены валентными колебаниями групп Si-O, Si-N и фоннными колебаниями в кремнии, соответственно.

Для определения удельного коэффициента поглощения  $\text{SiN}_x$  в пересчете на единицу толщины пленки была рассмотрена зависимость интенсивности селективной полосы в пике полосы поглощения валентных колебаний Si-N при  $850\text{ см}^{-1}$  от толщины пленки  $\text{SiN}_x$ . На рис. 1 для различных образцов показаны спектральные зависимости функции  $A(\nu)$ , рассчитанной путем преобразования спектров пропускания канала с образцом  $T(\nu)$  и пустого канала спектрометра  $T_0(\nu)$  с использованием уравнения:

$$A(\nu) = -\log_{10}(T(\nu) / T_0(\nu)).$$

Значение  $T_0 = 100\%$  соответствует спектру пропускания пустого канала. Для полосы при  $\nu \approx 850$   $\text{см}^{-1}$  пропускание в минимуме,  $T_{\text{мин}}$ , оказывается приблизительно в 10 раз меньше фонового уровня базовой линии в спектре пропускания,  $T_{\text{фон}}$ , для слоя  $\text{SiN}_x$  толщиной 1  $\mu\text{м}$ .

Для оценки поглотительной способности пленок в ИК-диапазоне были исследованы спектры отражения указанных в табл. 1 образцов с дополнительно нанесённым на тыльную поверхность кремниевой пластины слоем алюминия. Установлено, что в спектральной области, соответствующей окну прозрачности атмосферы 8–14  $\mu\text{м}$ , наблюдается существенный дефицит отражённого излучения. Доля отражённого излучения в области 700–1150  $\text{см}^{-1}$  (9–14  $\mu\text{м}$ ) составляет в среднем от  $R \sim 35\%$  для толстой пленки (образец 6) до  $R \sim 55\%$  для тонкой (образец 1). Доля поглощённой мощности  $A \sim 1 - R$ , в соответствии с вышесказанным, оценивается равной  $\sim 65\%$  для образца 6 и  $\sim 45\%$  для образца 1. С учётом двойного прохождения излучения через структуру поглощение  $AI$  при однократном прохождении приближённо оценивается соотношением

$A \approx AI + AI(1 - AI)$ , откуда  $AI \approx 1 - \sqrt{1 - A}$ , что даёт оценку  $AI \approx 40\%$  для образца 6 и  $AI \approx 26\%$  для образца 1.

Табл. 1. Описание образцов.

№ образца	Толщина слоя $\text{SiN}_x$ , нм	$n(\lambda=632.8 \text{ нм})$	$n(\lambda=1.5-5 \text{ мкм})$
1	270	2.13	-
2	463	2.12	-
3	678	2.11	2.10
4	855	2.11	2.08
5	1063	2.11	2.06
6	1336	2.09	2.08

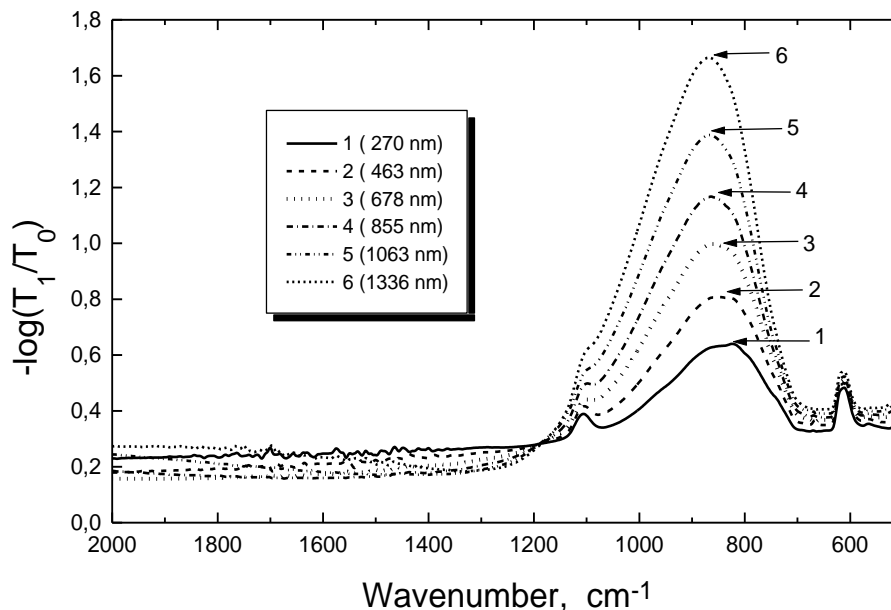


Рис.1. Спектральные зависимости функции  $A(\nu)$  для слоев  $\text{SiN}_x$  различной толщины

Полученные результаты позволяют оптимизировать условия плазмохимического осаждения слоев  $\text{SiN}_x$  для использования в качестве ИК фоточувствительного функционального материала в приборах на основе МЭМС и МОМС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор Соглашения о субсидировании RFMEFI57814X0009.