
**ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ИЗ СМЕСИ ПАРОВ
ГЕКСАМЕТИЛЦИКЛОТРИСИЛАЗАНА И АРГОНА
В ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЕ**

© 2019 г. В. Р. Шаяпов^{1, *}, М. Н. Чагин¹, А. Н. Колодин¹, М. Л. Косинова¹

¹*Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
пр. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090 Россия*

**e-mail: shayapov@niic.nsc.ru*

Поступила в редакцию 23.05.19 г.

После доработки 24.06.19 г.

Принята к публикации 07.08.19 г.

В индуктивно-связанной плазме высокочастотного разряда из смеси паров гексаметициклотрисилазана и аргона получены пленки $\text{Si}_x\text{N}_y\text{:H}$ при температурах подложек 100–400°C и мощности разряда 200 Вт. Определены простейшие компоненты плазмы (азот, циан, атомы кремния, свободные радикалы CH , димеры C_2). Исследованы некоторые физико-химические свойства пленок, скорость роста, типы химических связей, показатель преломления, интервал прозрачности, краевой угол смачивания. Синтезированные пленки имеют полимероподобное строение.

Ключевые слова: PECVD, карбонитрид кремния, гексаметициклотрисилазан, эмиссионная спектроскопия

DOI: 10.1134/S0132665119060180

ВВЕДЕНИЕ

Процессы плазмохимического осаждения (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, (PECVD)) пленок из паров кремнийорганических соединений (КОС) широко исследуются в мире [1–3]. В зависимости от условий осаждения, пленки можно разделить на два типа: полимероподобные (гидрогенизированные) [4] и неорганические [5]. Для первого типа характерно сохранение состава и химических связей исходного соединения, при этом возможно появление новых связей, отсутствующих в исходном соединении, но сформированных за счет его фрагментации в плазме. Второй тип пленок образуется в условиях сравнительно высокой мощности плазмы и/или температуры и представлен карбидами, нитридами, карбонитридами, оксинитридами кремния [5–7]. Пленки, получаемые методом PECVD из КОС, перспективны как материалы с низкой диэлектрической проницаемостью и барьерные слои для микроэлектроники, мембраны для разделения газов, биосовместимые материалы, сенсорные слои, гидрофобные пленки, ингибиторы коррозии [1–3, 8–10].

Интерес к циклическим КОС как исходным веществам для технологии PECVD обусловлен особенностями пленок, осаждаемых из паров этих соединений. В первую очередь, следует отметить сохранение циклов в строении низкотемпературных пленок или даже образование в пленках циклов больших размеров после их разрыва под воздействием плазмы [11, 12]. Одно из циклических КОС, используемых в плазмохимических процессах – 2,2,4,4,6,6-гексаметициклотрисилазан $[(\text{CH}_3)_2\text{SiNH}]_3$ (ГМЦТС). Оно может быть исходным веществом для процессов PECVD, т.к. обладает достаточ-

ной летучестью, коммерчески доступно, нетоксично. В [13, 14] представлены возможные механизмы полимеризации ГМЦТС в плазме тлеющего разряда на основе данных об энергиях химических связей в молекуле этого вещества и результатов хроматографического и масс-спектрального анализа продуктов пиролиза полимероподобных пленок. В работах [15–17] диэлектрические пленки нитрида и карбонитрида кремния получены в плазмохимических процессах осаждения из смесей паров ГМЦТС с аммиаком, азотом и водородом. В них детально охарактеризовано влияние состава исходной газовой смеси на состав и свойства получаемых пленок, предложены возможные механизмы объединения структурных фрагментов пленок, изучены процессы их окисления при хранении на воздухе.

В [18–22] выполнен термодинамический анализ процессов осаждения, определены химический и фазовый составы пленок $\text{SiN}_x\text{:H}$ и $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$, типы химических связей, построены кинетические закономерности роста пленок, установлен механизм дегидрирования пленок $\text{SiN}_x\text{:H}$. В [22] показано, что пленки, осажденные методом PECVD из паров ГМЦТС при температуре 100°C и мощности плазмы 30 Вт, имеют наименьшие значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 2.5$), а пленки, полученные с помощью гексаметилдисилазана $[\text{Si}(\text{CH}_3)_3]_2\text{NH}$ и тетраметилдисилазана $[\text{SiH}(\text{CH}_3)_2]_2\text{NH}$, при схожих условиях синтеза, демонстрируют более высокие значения этой величины.

Значительный интерес представляет возможность осаждения пленок в процессе PECVD из паров ГМЦТС в реакторе с индуктивно-связанной плазмой (ICP) высокочастотного разряда. В отличие от упомянутых выше работ, где использовали плазму тлеющего разряда постоянного тока, высокочастотного и микроволнового разрядов, индуктивно-связанная плазма обладает более высокой плотностью и однородностью, что достигается специальной геометрией индуктора и магнитной системой формирования и удержания плазменного столба [23]. До настоящего времени в публикациях отсутствует информация о составе газовой фазы в процессах PECVD с использованием ГМЦТС. В [16] приведены данные об изучении процесса плазмохимического разложения ГМЦТС в смесях с аммиаком, азотом и водородом методом масс-спектропии. В результате была установлена роль радикалов NH_x в образовании пленок и показана возможность синтеза гидрогенизированных пленок нитрида и карбонитрида кремния.

Данная работа является продолжением исследования процессов плазмохимического синтеза пленок в индуктивно-связанной плазме из паров кремнийорганических соединений. Ранее были изучены пленки $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$, синтезированные из соединений линейного строения – гексаметилдисилазана и тетраметилсилана [24–26]. Обнаружено, что скорость роста и характеристики пленок (элементный состав, ИК-спектры, спектры пропускания) не зависят или слабо зависят от задаваемых параметров процесса в изученных интервалах условий синтеза – мощности плазмы (100–500 Вт), температуры подложки ($100\text{--}450^\circ\text{C}$), потока паров исходного соединения ($3\text{--}11\text{ см}^3/\text{мин}$). Этот факт существенно отличает процессы ICP CVD от других процессов плазмохимического осаждения пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ из КОС.

Цель настоящей работы – изучение химического состава плазмы смеси ГМЦТС + Ag в процессе ICP CVD методом оптической эмиссионной спектроскопии, определение скорости роста пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$, установление закономерностей в изменении физико-химических свойств пленок при изменении температуры их осаждения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Пленки $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ синтезированы методом химического осаждения из газовой фазы с активацией индуктивно-связанной плазмы высокочастотного разряда (ICP CVD). В качестве исходного вещества использовали циклическое кремнийорганическое со-

единение — 2,2,4,4,6,6-гексаметилциклотрисилазан чистотой 97 мас. % (Sigma-Aldrich, США). Процессы осаждения пленок проводили на установке, разработанной и созданной во ФТИАН [23]. Установка оснащена стальным реактором (диаметр 300 мм) и нагреваемым пьедесталом, на который помещается подложка. Температуру подложек варьировали в диапазоне 100–400°C, мощность ВЧ-разряда частотой 13.56 МГц была равна 200 Вт. В качестве газа-активатора использовали аргон особой чистоты. Остаточное давление в реакторе составляло 10^{-4} мм рт. ст. Рабочее давление при осаждении пленок — 2.3×10^{-3} мм рт. ст., при этом давление паров ГМЦТС было 10^{-3} мм рт. ст. Осаждение проводили на полированные подложки монокристаллического кремния Si(100) и кварцевого стекла, прошедшие стандартную химическую обработку. Время осаждения всех пленок достигало 10 мин.

В процессе осаждения пленок *in situ* контролировали химический состав газовой фазы методом оптической эмиссионной спектроскопии с использованием многоканального спектрометра “Колибри-2” (разрешение 1 нм, спектральный диапазон 200–1200 нм). Излучение плазмы поступало в спектрометр через световод с коллиматором, присоединенным к кварцевому окну оптического герметичного ввода реактора. Расшифровку спектров проводили с использованием справочной литературы и базы данных по атомным спектрам Национального института стандартов и технологий США [27–29].

В работе применяли следующие методы характеристики пленок: эллипсометрия, инфракрасная (ИК) спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС), сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная спектроскопия, оптическая спектрофотометрия, измерение краевого угла смачивания.

Исследования типов химических связей в пленках проводили с помощью ИК-Фурье спектрометра SCIMITAR FTS2000 (Digilab LLC, США) в диапазоне волновых чисел 400–4000 см^{-1} . Для записи спектров КРС применяли спектрометр Triplemate (Sprex, США) в области 400–1800 см^{-1} . Сканирующий электронный микроскоп JSM 6700F (Jeol, Япония), снабженный приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДС) веществ EX-23000 BU, использовали для изучения микроморфологии и элементного состава пленок.

Показатели преломления и толщины пленок определялись методом монохроматической нулевой эллипсометрии (эллипсометр ЛЭФ-3М) на длине волны 632.8 нм. Измерения проводились при 5 углах падения, толщина и показатель преломления пленок определялись путем решения обратной задачи эллипсометрии по модели прозрачной однослойной пленки. Для определения спектральной области прозрачности записывались спектры пропускания пленок, выращенных на подложках из кварцевого стекла, с помощью сканирующего спектрофотометра UV-3101 PC (Shimadzu, Япония) в диапазоне 200–3000 нм.

Измерения краевых углов смачивания на пленках проводили на приборе OCA 15 PRO (Dataphysics, Германия), оснащенном измерительной видеосистемой с USB-камерой, а также светосильным измерительным объективом с настраиваемым углом наблюдения. Все измерения выполнены при нормальных условиях в термостатированном боксе ($T = 25 \pm 2^\circ\text{C}$, $p = 750$ мм рт. ст.). Диаметр иглы составлял 0.51 мм. В качестве тестовой жидкости использовали дистиллированную воду. Объем капель был постоянным и составлял ~ 2.5 мкл. Значения краевых углов смачивания измеряли в режиме лежащей капли. Подложки предварительно подвергались продувке сжатым воздухом в течение нескольких секунд. Расчет конечного значения наблюдаемого краевого угла проводили по уравнению Юнга–Лапласа.

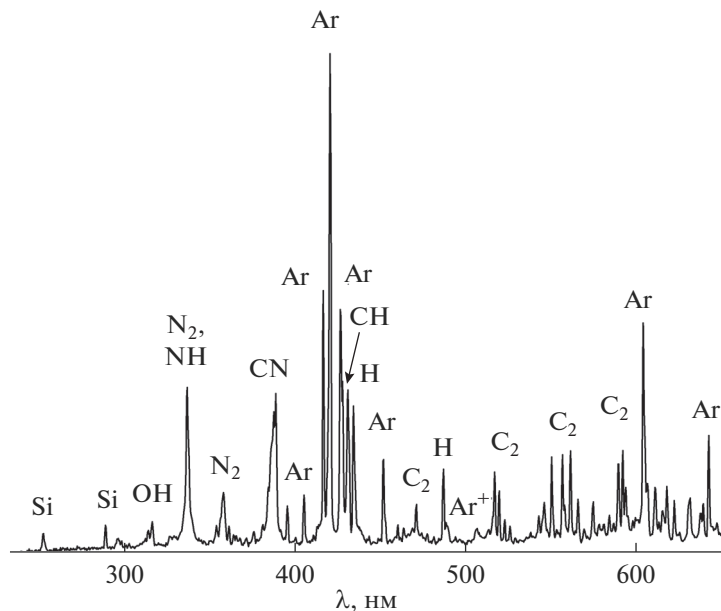


Рис. 1. Эмиссионный спектр плазмы смеси ГМЦТС/аргон.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав газовой фазы, которая образуется при разложении паров ГМЦТС в присутствии аргона в индуктивно-связанной ВЧ-плазме, изучали *in situ* методом оптической эмиссионной спектроскопии. Для области 650–1200 нм характерны линии аргона большой интенсивности, в ней также присутствует линия водорода H_{α} 656.3 нм. Рассмотрим подробно лишь область 200–650 нм (рис. 1). В общих чертах эмиссионные спектры смеси аргона с парами ГМЦТС подобны спектрам смесей аргона с парами гексаметилдисилазана и тетраметилсилана [25, 26]. В плазме присутствуют молекулярные полосы азота N_2 , циана CN, димеров углерода C_2 , гидроксила OH, сформированного, вероятно, из кислорода остаточной атмосферы в реакторе. Полосы молекулярного водорода не определяются, что типично для подобных процессов [25, 26]. Значительную интенсивность имеют линии аргона и водорода, линии атомарного кремния слабые. Основное отличие этих спектров от спектров плазмы гексаметилдисилазана с аргоном, полученных в аналогичных условиях, состоит в более высокой относительной интенсивности полос N_2 и CN [25] и несколько меньшей относительной интенсивности линий кремния и димеров C_2 . В плазме смеси тетраметилсилана с аргоном наблюдаются более интенсивные линии Si и полос C_2 [26]. Обнаруженные закономерности означают меньшую степень разложения ГМЦТС по сравнению с упомянутыми линейными КОС в подобных условиях процесса ICP CVD.

Химические связи в пленках исследовали методом ИК-спектроскопии. ИК-спектры получены для серии пленок, осажденных при разных температурах в диапазоне 100–400°C, и интерпретированы с использованием литературных данных [30–34]. На рис. 2 сопоставлены ИК-спектры пленок $SiC_xN_y:H$ со спектром исходного соединения. Сопоставление обнаруженных в ИК-спектрах полос поглощения представлено в табл. 1. На ИК-спектрах наблюдается широкий пик в области 500–1250 cm^{-1} . Имеется

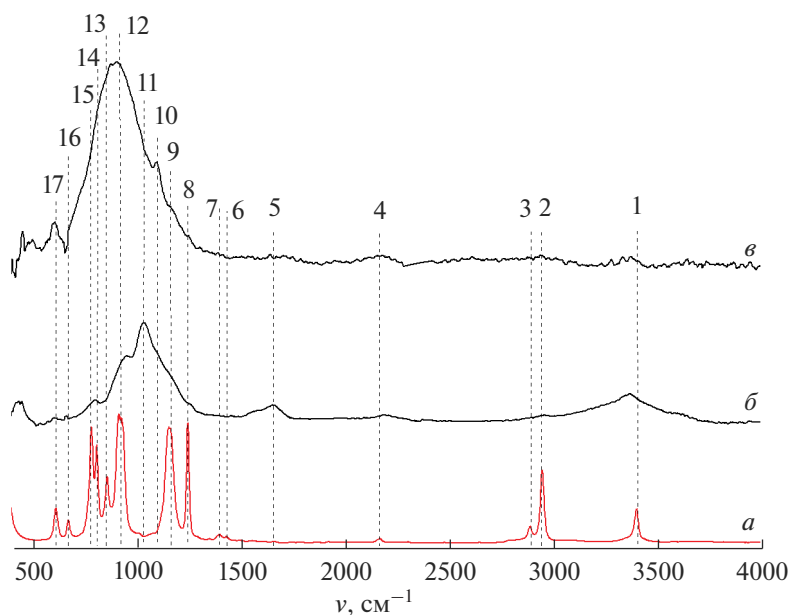


Рис. 2. ИК-спектры ГМЦТС (а) и пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$, осажденных при 100°C (б) и 400°C (е).

значительное различие характера присутствующих связей в пленках, синтезированных при разных температурах. У низкотемпературной пленки наибольшую интенсивность имеет полоса с максимумом при 1040 см^{-1} , которая соответствует деформационным колебаниям $\text{Si}-\text{CH}_2-\text{Si}$. Наличие данного уширенного пика указывает на полимеризацию исходного соединения в процессе формирования пленки. У пленок, синтезированных при более высоких температурах, максимум полосы находится при 921 см^{-1} . Эту полосу можно приписать валентным колебаниям $\text{Si}-\text{N}$. Полосы поглощения, соответствующие валентным и деформационным колебаниям метильных групп $2955, 2895, 860\text{ см}^{-1}$ в спектрах пленок имеют низкую интенсивность. Полоса 1254 см^{-1} , связанная с колебаниями метильной группы в $\text{Si}-\text{CH}_3$, не наблюдается. Отсутствие связи $\text{Si}-\text{CH}_3$ в пленках, синтезированных при 100°C , является существенным отличием полимеризации ГМЦТС в процессе ICP CVD от других плазмохимических процессов, где $\text{Si}-\text{CH}_3$ сохраняется до 700°C [35].

Низкотемпературные полимероподобные пленки окисляются при хранении на воздухе [36]. Об этом свидетельствует наличие пика при 1100 см^{-1} , соответствующего колебаниям $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ (или $\text{Si}-\text{O}-\text{C}$). Состав пленок, установленный методом ЭДС, мало отличался внутри изученной серии образцов. Содержание элементов в пленках (в атомных %): Si – 22, C – 31, N – 27, O – 20. Метод ЭДС не позволяет определить содержание водорода, таким образом, представленный состав – весьма приблизительный.

В данной работе образцы исследовали методом комбинационного рассеяния света на подложках Si(100). На спектрах наблюдается единственный максимум при 520 см^{-1} , относящийся к колебаниям кремниевой подложки. Отсутствие полос D и G в области 1340 и 1580 см^{-1} , характерных для кластеров неупорядоченного графита, указывает на их отсутствие в пленке. Аналогичное явление наблюдается и в других процессах синтеза ICP-CVD пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ при низких температурах [26].

Таблица 1. Полосы поглощения ГМЦТС и пленок, (ИК-спектроскопия)

№ полосы в спектре	Волновое число, см ⁻¹		Тип колебаний	Структурный фрагмент, в котором присутствует связь
	ГМЦТС	Пленка		
1	3410		$\nu(\text{NH})$	
2	2955		$\nu_a(\text{CH})$	CH_3
3	2895		$\nu_s(\text{CH})$	CH_3
4		2175	$\nu(\text{SiH})$	
5		1670	$\delta(\text{NH})$	NH_2
6	1435		$\delta_a(\text{C-H})$	CH_3
7	1400		$\delta_s(\text{C-H})$	CH_3
8	1254		$\delta(\text{CH}_3)$	$\text{Si}(\text{CH}_3)_2$
9	1160		$\delta(\text{NH})$	Si-NH-Si
10		1100	$\nu(\text{Si-O})$	Si-O-Si , Si-O-C
11		1040	$\omega(\text{CH}_2)$	$\text{Si-CH}_2\text{-Si}$
12	921		$\nu_a(\text{Si-N})$	Si-N-Si
13	860		$\rho_r(\text{CH}_3)$	$\text{Si}(\text{CH}_3)_2$
14	820			Колебания кольца
15	790		$\rho_r(\text{CH}_3)$	$\text{Si}(\text{CH}_3)_2$
16	680		$\nu_a(\text{SiC})$	
17	620		$\nu_s(\text{SiC})$	
		500–1250	$\nu(\text{SiC})$, $\nu(\text{Si-N})$	

Эллипсометрические измерения показали, что толщина пленок уменьшается по мере увеличения температуры при 100°C – 300 нм, при 400°C – 60 нм. Это соответствует уменьшению скорости роста от 30 до 6 нм/мин (рис. 3). Уменьшение скорости роста происходит в тех случаях, когда в процессах осаждения применялись линейные прекурсоры [24, 26]. Для гексаметилдисилазана скорость роста меняется от 30 до 22 нм/мин при повышении температуры от 100 до 450°C [24]. Показатель преломления n пленок увеличивается с ростом температуры подложки от 1.50 до 1.82. Согласно данным спектрофотометрии пропускания пленки прозрачны в видимой и ближней инфракрасной области спектра (400–2500 нм). Оптическая ширина запрещенной зоны пленок, вычисленная по спектрам пропускания, составила 3.8 ± 0.2 эВ, при этом не выявлено каких-либо закономерностей изменения этой величины при изменении температуры осаждения.

Морфология поверхности различна для пленок, полученных при разных температурах осаждения (рис. 4). На изображениях СЭМ видны морфологические особенности (глобулы), размер которых уменьшается по мере увеличения температуры осаждения. При температуре 400°C образуются пленки с практически однородной поверхностью и плохо различимыми особенностями. В настоящей работе количественные измерения шероховатости не проводили. Как правило [37, 38], имеет место уменьшение шероховатости по мере увеличения температуры синтеза, когда наблюдаются картины, подобные тем, что представлены на рис. 4. В [39] подобные явления объяснены увеличением подвижности образующих пленку адсорбированных фрагментов и химической “сшивки” с образованием плотного материала при росте температуры осаждения. Значения краевых углов смачивания всех исследованных пленок находятся в интервале 77.8°–83.3°, т.е. данные пленки являются гидрофильными.

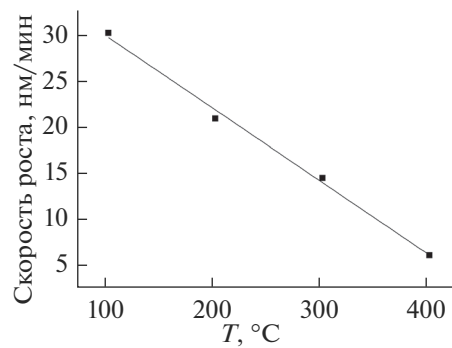


Рис. 3. Зависимость скорости роста пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ от температуры осаждения.

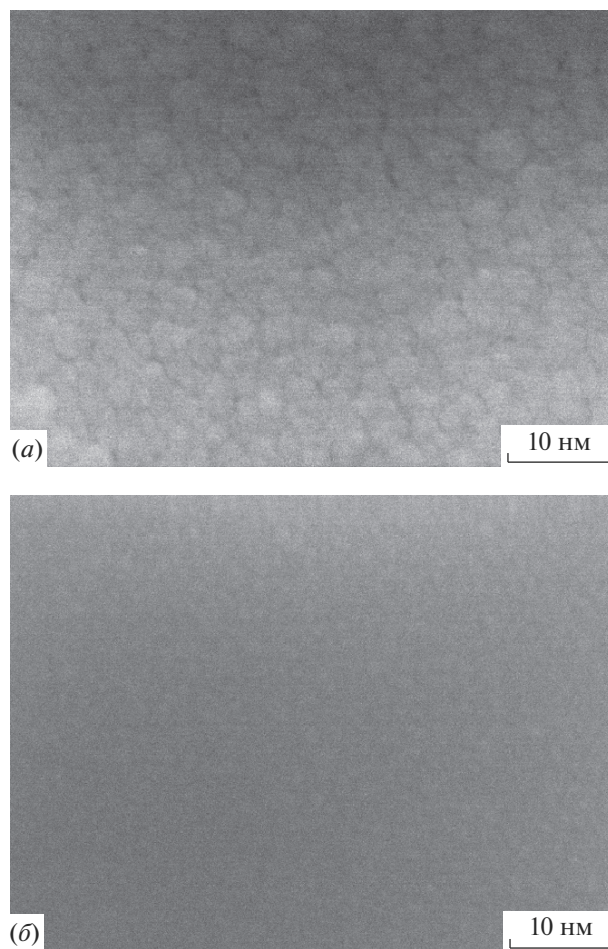


Рис. 4. Изображения сканирующей электронной микроскопии пленок $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$, осажденных при 100 (а) и 400°C (б). Увеличение $\times 200000$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из смеси паров гексаметилциклотрисилазана и аргона получены пленки $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ при температурах подложек 100–400°C. Методом оптической эмиссионной спектроскопии обнаружено, что в плазме преобладают азот, циан и аргон. Линии и полосы компонентов, образующиеся при глубоком разложении исходного вещества (атомы кремния, свободные радикалы CN , димеры C_2), имеют сравнительно низкую интенсивность. В ИК спектрах пленок имеется широкая полоса поглощения в области 500–1250 cm^{-1} , которая может быть суперпозицией полос, связанных с колебаниями связей Si-N , Si-C , $\text{Si-CH}_2\text{-Si}$, но наблюдается значительное различие в интенсивностях этих полос для пленок, синтезированных при разных температурах.

При увеличении температуры осаждения с 100 до 400°C скорость роста уменьшается в 5 раз. Морфология поверхности при этом изменяется за счет уменьшения размера характерных глобулярных особенностей. При температуре осаждения 400°C наблюдаются поверхности без выраженных особенностей. Согласно данным спектрофотометрии пропускания пленки прозрачны в видимой и ближней инфракрасной области спектра (400–2500 нм), оптическая ширина запрещенной зоны составляет 3.8 ± 0.2 эВ для всех пленок. Краевой угол смачивания пленок варьируется в диапазоне 77.8°–83.3°, что указывает на их гидрофильность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Ю.М. Румянцева за обсуждение результатов работы, а также И.В. Юшину за получение секторов пропускания образцов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНХ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berwind M.F., Hashibon A., Fromm A., Gurr M., Burmeister F., Eberl C.* Rapidly prototyping bio-compatible surfaces with designed wetting properties via photolithography and plasma polymerization // *Microfluid Nanofluid.* 2017. V. 21. P. 144–147.
2. *Ooi P.C., Wee M.F.M.R., Dee Ch.F., Yap Ch.Ch., Salleh M.M., Majlis B.Y.* Fabrication of transparent bistable switching memory device using plasma polymerized hexamethyldisiloxane layers with embedded graphene quantum dots // *Thin Solid Films.* 2018. V. 645. P. 45–50.
3. *Yan X., Li J., Yi L.* Fabrication of pH-responsive hydrophilic/hydrophobic Janus cotton fabric via plasma-induced graft polymerization // *Mater. Lett.* 2017. V. 208. P. 46–49.
4. *Wróbel A.M., Kryszewski M.* Preparation, structure, and some properties of organosilicon thin polymer films obtained by plasma polymerization // *Progr. Colloid Polym. Sci.* 1991. V. 85. P. 91–101.
5. *Wagner N.J., Gerberich W.W., Heberlein V.R.* Thermal plasma chemical vapor deposition of wear-resistant, hard Si–C–N coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2006. V. 201. P. 4168–4173.
6. *Файнер Н.И., Плеханов А.Г., Асанов И.П.* Изучение химических связей и элементного состава пленок оксикарбонитрида кремния методами РФЭ-, ИК- и рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии // *Физика и химия стекла.* 2017. Т. 43. № 5. С. 459–467.
7. *Silicon Carbide – Materials, Processing and Applications in Electronic Devices.* Ed. by Mukherjee M. Rijeka: InTech, 2011.
8. *Plasma polymer films.* Ed. by Biederman H. London: Imperial College Press, 2004.
9. *Huang Ch., Lin H.-H., Li Ch.* Atmospheric Pressure Plasma Polymerization of Super-hydrophobic Nano-films Using Hexamethyldisilazane Monomer // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2015. V. 35. P. 1015–1028.
10. *Guo S., Rochotzki R., Lundström I., Arwin H.* Ellipsometric sensitivity to halothane vapors of hexamethyldisiloxane plasma polymer films // *Sensor Actuat. B-Chem.* 1997. V. 44. P. 243–247.
11. *Grill A., Neumayer D.A.* Structure of low dielectric constant to extreme low dielectric constant SiCOH films: Fourier transform infrared spectroscopy characterization // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 94. № 10. P. 6697–6707.
12. *Grill A., Patel V.* Ultralow dielectric constant pSiCOH films prepared with tetramethylcyclotetrasiloxane as skeleton precursor // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 104. P. 024113.

13. *Wrobel A.M., Kryszewski M., Gazicki M.* Structure of glow discharge polysilazane thin films // *Polymer*. 1976. V. 17. P. 678–684.
14. *Wrobel A.M., Kryszewski M., Gazicki M.* Oligomeric products in plasma-polymerized organosilicones // *J. Macromol. Sci. Chem.* 1983. V. A20. P. 583–618.
15. *Brooks T.A., Hess D.W.* Plasma-enhanced chemical vapor deposition of silicon nitride from 1,1,3,3,5,5-hexamethylcyclotrisilazane and ammonia // *Thin Solid Films*. 1987. V. 153. P. 521–529.
16. *Brooks T.A., Hess D.W.* Deposition chemistry and structure of plasma-deposited silicon nitride films from 1,1,3,3,5,5-hexamethylcyclotrisilazane // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. P. 841–849.
17. *Brooks T.A., Hess D.W.* Characterization of Silicon Nitride and Silicon Carbonitride Layers from 1,1,3,3,5,5-Hexamethylcyclotrisilazane Plasmas. // *J. Electrochem. Soc.* 1988. V. 135(12). P. 3086–3093.
18. *Смирнова Т.П., Храмова Л.В., Белый В.И., Соловьев А.П., Таранова И.В.* Получение полимерных пленок из гексаметициклоотрисилазана в плазме высокочастотного разряда // *Высокомолекулярные соединения*. 1988. Т. 30. № 1. С. 164–169.
19. *Яковкина Л.В., Смирнова Т.П., Данилович О.В.* Механизм гидрирования слоев SiN:H, полученных из гексаметициклоотрисилазана // *Неорганические материалы*. 1996. Т. 32. № 5. С. 562–566.
20. *Файнер Н.И., Голубенко А.Н., Румянцев Ю.М., Максимовский Е.А.* Использование гексаметициклоотрисилазана для получения прозрачных пленок сложного состава // *Физика и химия стекла*. 2009. Т. 35. № 3. С. 351–364.
21. *Hoffmann P.S., Fainer N.I., Baake O., Kosinova M.L., Rumyantsev Y.M., Trunova V.A., Klein A., Pollakowski B., Beckhoff B., Ensinger W.* Silicon carbonitride nanolayers - Synthesis and chemical characterization // *Thin Solid Films*. 2012. V. 520. P. 5906–5913.
22. *Файнер Н.И.* От кремнийорганических соединений-предшественников – к многофункциональному карбонитриду кремния // *Журн. общей химии*. 2012. Т. 82. № 1. С. 47–56.
23. *Орликовский А.А., Руденко К.В., Аверкин С.Н.* Прецизионные плазмохимические процессы микроэлектроники на базе серии пилотных установок с масштабируемым ИСР-источником плазмы // *Химия высоких энергий*. 2006. Т. 40. № 3. С. 220–232.
24. *Румянцев Ю.М., Чагин М.Н., Косинова М.Л., Кузнецов Ф.А.* Синтез тонких пленок карбонитрида кремния из гексаметилдисилазана в реакторе с индуктивно связанной плазмой // *Неорганические материалы*. 2015. Т. 51. № 9. С. 974–980.
25. *Шаяпов В.Р., Чагин М.Н., Румянцев Ю.М.* Химический состав индуктивно-связанной плазмы смеси гексаметилдисилазана с аргонном и свойства пленок, образующихся в такой плазме // *Неорганические материалы*. 2016. Т. 52. № 6. С. 684–690.
26. *Румянцев Ю.М., Чагин М.Н., Шаяпов В.Р., Юшина И.В., Кичай В.Н., Косинова М.Л.* Синтез и свойства пленок, образующихся из паров тетраметилсилана в индуктивно-связанной плазме ВЧ разряда // *Физика и химия стекла*. 2018. Т. 44. № 3. С. 223–234.
27. *Лирс Р., Гейдон А.* Отождествление молекулярных спектров. М.: Издательство, 1949.
28. *Dieke G.H.* The hydrogen molecule wavelength tables of Gerhard Heinrich Dieke. Ed. by Crosswhite H. M. N.-Y.: Wiley-InterScience, 1972.
29. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.6). Available online: <https://physics.nist.gov/asd>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
30. *Anderson D.R.* Infrared, Raman, and Ultraviolet Spectroscopy. In “Analysis of Silicones”. Chap. 10. Ed. by Smith A.L. N.-Y.: Wiley-InterScience, 1974. P. 247.
31. *Rao C.N.R.* Chemical Applications of Infrared Spectroscopy. N.-Y.: Academic Press, 1963.
32. *Launer P.J.* Infrared analysis of organo silicon compounds: Spectra structure correlations. In “Silicon compounds: Register and review”. 4th edition. Ed. by Anderson R., Arkles B., Larson G.L. Bristol: Petrarch Systems, 1987. P. 100–103.
33. *Maslowsky E.* Vibrational Spectra of Organometallics: Theoretical and Experimental Data. N.-Y.: Wiley, 2019.
34. *Stuart S.* Organosilicon chemistry: Special Lectures presented at the International Symposium on Organosilicon Chemistry. London: Butterworths, 1966.
35. *Wrobel A.M., Klemberg J.E., Wertheimer M.R., Schreiber H.P.* Polymerization of Organosilicones in Microwave Discharges. II. Heated Substrates // *J. Macromol. Sci. A*. 1981. V. 15. P. 197–213.
36. *Wrobel A.M.* Aging process in plasma-polymerized organosilicon thin films // *J. Macromol. Sci. A*. 1985. V. 22. N. 8. P. 1089–1100.
37. *Guruvenket S., Andrie S., Simon M., Johnson K.W., Sailer R.A.* Atmospheric Pressure Plasma CVD of Amorphous Hydrogenated Silicon Carbonitride (a-SiCN:H) Films Using Triethylsilane and Nitrogen // *Plasma Process. Polym.* 2011. № 8. P. 1126–1136.
38. *Shayapov V.R., Khomyakov M.N., Rumyantsev Yu.M.* Scanning probe microscopy and nanoindentation studies of silicon carbonitride films obtained by PECVD from hexamethyldisilazane // *Letters on Materials*. 2014. V. 4. № 2. P. 114–116.
39. *Wrobel A.M.* Silicon carbonitride (SiCN) films by remote hydrogen microwave plasma CVD from tris(dimethylamino)silane as novel single-source precursor // *Chem. Vap. Deposition*. 2010. V. 16. P. 211–215.