

УДК 539.23+541.6+661.689

АМОРФНЫЕ ПЛЕНКИ $\text{SiC}_x\text{:H}$ И $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ ПАРОВ ГЕКСАМЕТИЛДИСИЛАНА В ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЕ ВЧ-РАЗРЯДА

© 2024 г. М. Н. Чагин¹, Е. Н. Ермакова¹, В. Р. Шаяпов¹, В. С. Суляева¹,
Е. А. Максимовский¹, И. В. Юшина¹, М. Л. Косинова^{1,*}

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
Новосибирск, Россия

*E-mail: marina@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 17.06.2024 г.

После доработки 02.07.2024 г.

Принята к публикации 03.07.2024 г.

Синтез аморфных пленок гидрогенизированного карбида $\text{SiC}_x\text{:H}$ и карбонитрида $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ кремния осуществляли в реакторе с индуктивно-связанной плазмой ВЧ-разряда с использованием паров гексаметилдисилана и дополнительных газов аргона и/или азота. Процесс осаждения проводили при температурах 50–400 °С и мощностях плазмы 100–400 Вт. Получены зависимости скорости роста, химического состава и строения пленок, коэффициента пропускания света, показателя преломления и оптической ширины запрещенной зоны от условий синтеза. Методом оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) проведены *in situ* исследования состава газовой фазы.

Ключевые слова: гексаметилдисилан, ICP CVD, пленки гидрогенизированного карбида и карбонитрида кремния, оптическая эмиссионная спектроскопия

DOI: 10.31857/S0023119324060112 EDN: THFVPG

Устойчивое внимание исследователей к системе Si–C–N является не случайным, и оно обусловлено уникальным набором свойств двойных соединений, таких как нитрид углерода, карбид и нитрид кремния, а также карбонитрида кремния SiC_xN_y . Последнее из них, имеющее переменный состав, вызывает особый интерес в связи с возможностью варьирования функциональных характеристик, в том числе показателя преломления (n), коэффициента пропускания света (T) и оптической ширины запрещенной зоны (ШЗЗ). На сегодняшний день существует значительное количество работ по получению материалов на основе $\text{SiC}_x\text{:H}$ и $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ с использованием различных методов формирования пленок. Особое внимание уделяется плазмохимическому осаждению из газовой фазы (PECVD), так как нетермическая активация смеси реагентов с помощью высокочастотного разряда и использование в качестве исходных летучих веществ кремнийорганических соединений (КОС) значительно понижают температуру синтеза [1–3]. В отличие от ранее используемых смесей силана с углеводородами, КОС содержат в своей молекуле все необходимые элементы и связи Si–C и/или Si–N для формирования пленок. Одним из таких исходных веществ является гекса-

метилдисилан $\text{Me}_3\text{Si–SiMe}_3$ (ГМДС), который в отличие от большинства КОС содержит слабую связь Si–Si, играющую важную роль при разложении прекурсора и росте пленок [4, 5].

В табл. 1 проиллюстрированы процессы получения пленок $\text{a-SiC}_x\text{:H}$ из ГМДС и некоторые их функциональные характеристики.

В упомянутых в табл. 1 работах рассматривается влияние параметров процесса роста, таких как мощность плазмы (P), температура осаждения ($T_{\text{ос}}$) и скорость потока газа (F), на кинетические характеристики процесса, состав и, следовательно, физико-химические свойства и функциональные характеристики пленок. Следует отметить, что синтезированные из ГМДС разными методами пленки $\text{a-SiC}_x\text{:H}$ имеют различное соотношение $[\text{C}]/[\text{Si}]$, например равное 2.7–1.2 [12] и 1.7–0.8 [5], при этом содержание углерода в пленках варьируется от 35 до 85 ат. %. Это может быть связано с большим содержанием углерода в молекуле прекурсора ГМДС ($\text{Si:C} = 1:3$). При проведении синтеза при низких $T_{\text{ос}}$ водород, имеющийся в молекуле исходного вещества, также входит в состав пленок в виде водородсодержащих связей C–H, Si–H. Как показано в работе [12], содержание водорода в пленках $\text{a-SiC}_x\text{:H}$ может достигать 40 ат. %.

Таблица 1. Пленки $\text{a-SiC}_x\text{:H}$, полученные из гексаметилдисилана: процессы синтеза и функциональные свойства

Метод синтеза	$T_{\text{ос}}, ^\circ\text{C}$	Р, Вт	Элементный состав, ат. %				Н, ГПа Е, ГПа	k	КУС*, $T_{\text{ос}}$	n ШЗЗ, эВ	ссыл-ка
			Si	C	O	H					
PECVD	300		15–25	62	15–25		15–19 –				6
PECVD	400, 450	200, 300		55–85				1.5–6			7
PECVD	20–200								105–110		8
PECVD	20	60–140							105–160		9
PECVD	150	30	17.75	69.64	12.61		1.37 10.18	2.8–3.1 2.6–2.8 [#]			10
PECVD	30–600	300								– 2.1–3.3	5
PECVD	200–300	200–300								2.8–2.68 –	11
MF PECVD		100	18–35	35–52	22–26	33–41	2–5.5 –				12

*КУС – краевой угол смачивания

 k – диэлектрическая постоянная

– отожженные пленки

В настоящей работе синтез пленок осуществлялся в реакторе с индуктивно-связанной ВЧ-плазмой (ICP CVD), которая ранее не применялась исследователями для разложения ГМДС. Задача исследования состояла в разработке методики синтеза и понимании особенностей осаждения пленок $\text{SiC}_x\text{:H}$ и $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ из ГМДС, в изучении зависимости кинетики роста и физико-химических свойств пленок от условий их формирования. Также внимание уделено исследованию состава газовой фазы методом оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) при плазмохимическом разложении ГМДС в различных газовых смесях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Пленки $\text{SiC}_x\text{:H}$ и $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ синтезировали из смесей ГМДС + Ag и ГМДС + N_2 +Ag в установке ICP CVD [13], в которой возбуждалась индуктивно-связанная плазма с частотой генерации 13.56 МГц. Подложку размещали на пьедестале, температуру которого изменяли от 50 до 400°C. Мощность ВЧ-разряда регулировали в пределах от 100 до 400 Вт. Остаточное давление в системе было 1×10^{-4} Торр. При подаче паров исходного ве-

щества и дополнительных газов (Ag и N_2 , ос. ч.) рабочее давление в реакторе возрастало до $(2.1–3.1) \times 10^{-3}$ Торр. Парциальное давление ГМДС в реакторе было 1×10^{-3} Торр. Кроме того, в область под подложкодержателем вводили гелий для обеспечения равномерности температуры по площади подложки. Условия проведения процессов осаждения приведены в табл. 2.

Для формирования пленок использовали подложки Si(100), Ge(111) и пластины из кварцевого стекла, прошедшие предварительно стандартную химическую обработку. В работе применяли набор современных методов характеризации пленок. Все исследования проведены на свежеприготовленных образцах. Определение толщины и показателя преломления пленок осуществляли эллипсометрическим методом. Измерения проводили на монохроматическом эллипсометре ЛЭФ-3М на длине волны 632.8 нм. ИК-спектры пленок регистрировали с помощью ИК-Фурье-спектрометра SCIMITAR FTS2000 в диапазоне волновых чисел 400–4000 см^{-1} . Сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM 6700F, снабженный приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДС) веществ EDS Bruker Quantax 200 с детектором X-Flash

Таблица 2. Условия проведения процесса ICP CVD синтеза пленок SiC_xH и $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{H}$

Серия	$T_{\text{oc}}, ^\circ\text{C}$	P, Вт	p(ГМДС), Торр	$F(\text{N}_2)$, см ³ /мин
А	50–400	200	1×10^{-3}	0
Б	200	100–400	1×10^{-3}	0
В	200	200	1×10^{-3}	0–35

6|60, использовали для изучения морфологии и элементного состава пленок. Для определения коэффициента пропускания света и оптической ширины запрещенной зоны записывали спектры пропускания пленок, выращенных на подложках из кварцевого стекла, с помощью сканирующего спектрофотометра Shimadzu UV-3101 PC в диапазоне 190–3200 нм.

В процессах ICP CVD осаждения пленок контролировали химический состав газовой фазы методом оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) с использованием многоканального спектрометра “Колибри-2” в спектральном диапазоне 200–1200 нм. Расшифровку спектров проводили с использованием справочной литературы [14–16]. Смеси ГМДС + Ar + N_2 исследовали при трех значениях доли азота в суммарном потоке ($x = F(\text{N}_2)/[F(\text{N}_2) + F(\text{Ar})] = 0, 0.5$ и 1) и при трех значениях мощности ВЧ-разряда (50, 200 и 400 Вт).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Количественное изучение процессов PECVD затрудняется большим числом факторов, влияющих на состав, структуру и свойства получаемых пленок. В большинстве случаев для определения

оптимальных условий синтеза приходится идти путем широкого варьирования параметров процесса. В данной работе изучено влияние температуры синтеза (T_{oc}), мощности плазмы (P) и состава исходной газовой смеси, определенного как соотношение скоростей потоков азота и аргона $x = F(\text{N}_2)/[F(\text{N}_2) + F(\text{Ar})]$, на скорость осаждения пленок, морфологию поверхности, элементный состав, химическое строение и некоторые функциональные характеристики.

Эмиссионные спектры плазмы для смесей ГМДС + Ar и ГМДС + Ar + N_2 при $x = 0.5$ представлены на рис. 1. В диапазоне 600–1200 нм проявляются интенсивные атомные линии аргона, полосы молекулярного азота, а также атомная линия водорода H_α (656.2 нм). В интервале 200–600 нм обнаружены атомные линии кремния, гелия и водорода, полосы азота N_2 , циана CN, димера C_2 . Заметим, что в смеси ГМДС + Ar, когда азот в реактор не подавался, интенсивность полос азота отлична от нуля из-за влияния остаточной атмосферы в реакционной камере. Наличие атомарного кремния и димера C_2 в газовой фазе указывает на глубокое разложение ГМДС в плазме. По набору частиц спектры качественно не отличаются от ис-

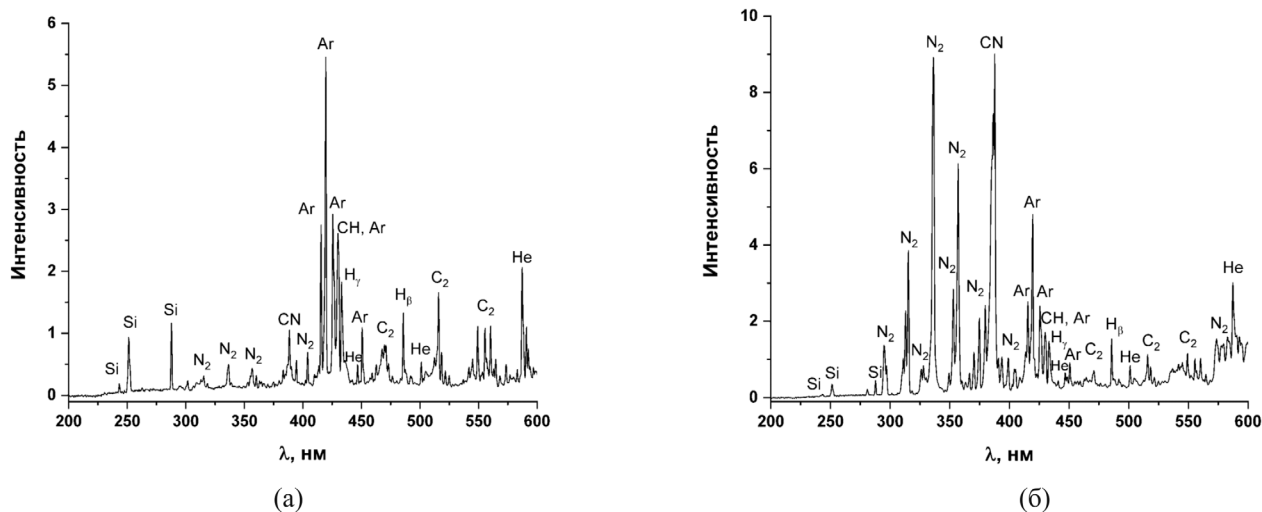


Рис. 1. Эмиссионные спектры ICP-плазмы (P = 400 Вт) смесей ГМДС+Ar (а) и ГМДС+Ar+N₂ при $F(\text{N}_2)/[F(\text{N}_2)+F(\text{Ar})] = 0.5$ (б).

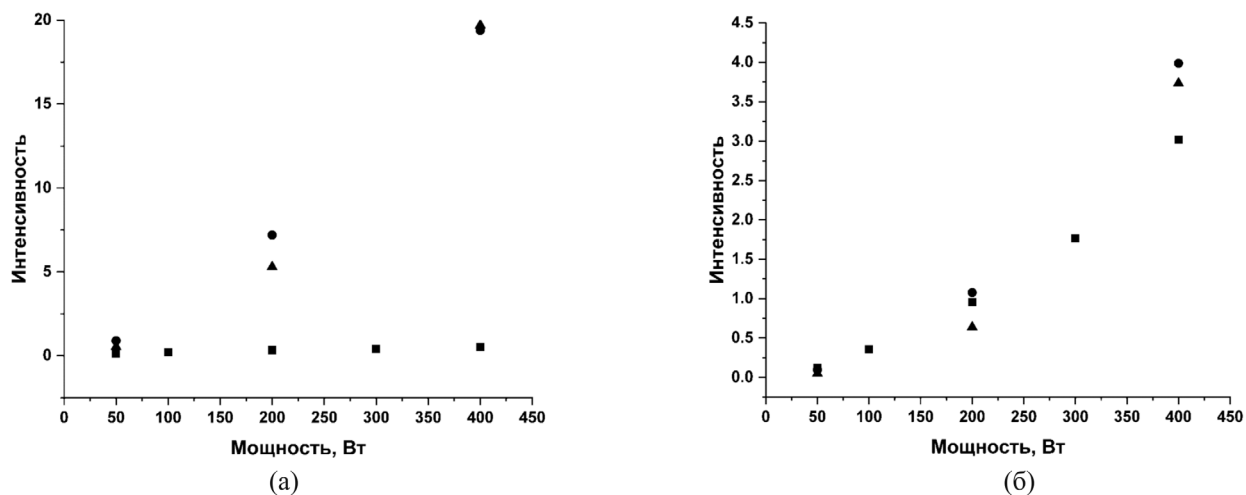


Рис. 2. Зависимости интенсивности эмиссии полосы CN (а) и линии H_β (б) от мощности ВЧ-разряда для смесей ГМДС + Ag (квадраты), ГМДС + Ag + N₂ (круги), ГМДС + N₂ (треугольники).

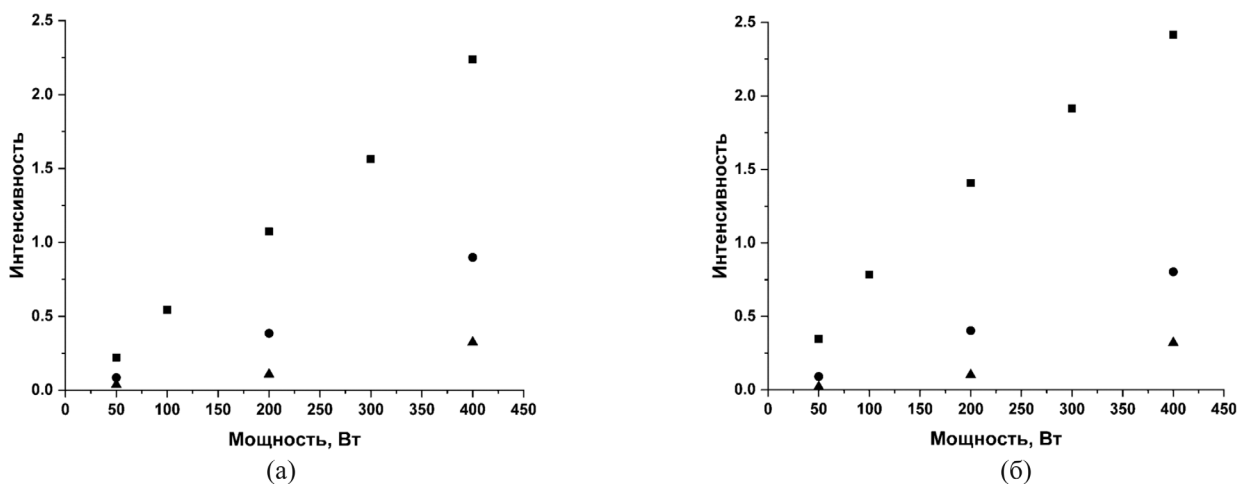


Рис. 3. Зависимости интенсивности эмиссии линии Si (а) и полосы C₂ (б) от мощности ВЧ-разряда для смесей ГМДС + Ag (квадраты), ГМДС + Ag + N₂ (круги), ГМДС + N₂ (треугольники).

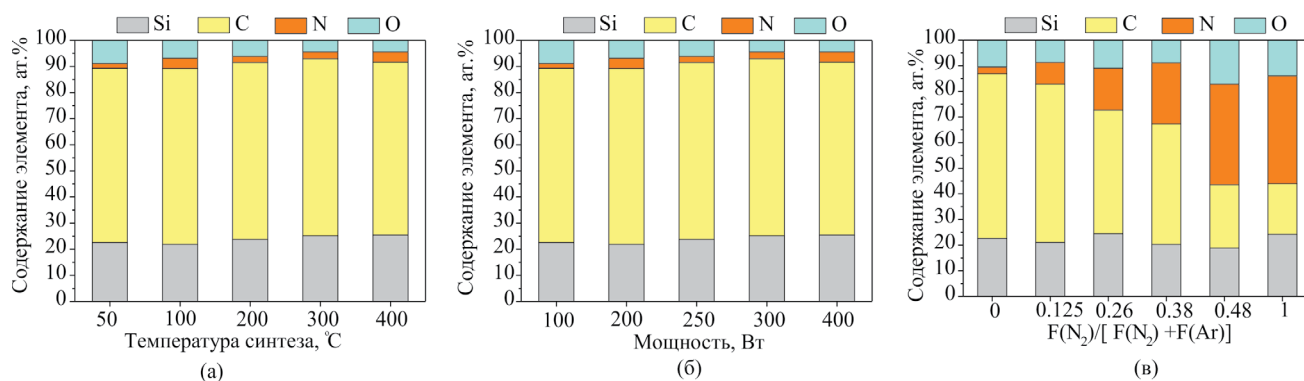


Рис. 4. Зависимость элементного состава пленок от (а) температуры осаждения, (б) мощности плазмы и (в) содержания азота в исходной газовой смеси ГМДС + Ag + N₂.

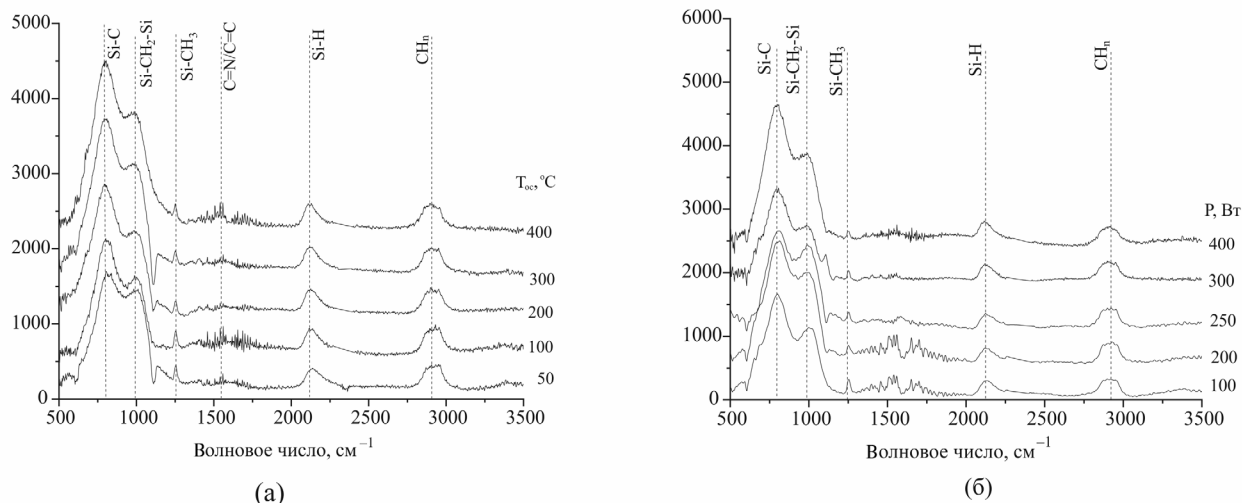


Рис. 5. Эволюция ИК-спектров пленок SiC_xH при изменении (а) температуры синтеза и (б) мощности плазмы.

следованных ранее спектров для смесей тетраметилсилана (ТМС) [5] с аргоном и азотом. Однако сравнение спектров, полученных в данной работе, со спектрами ИСР плазмы в смеси ТМС + Ar [17] показывает, что ТМС подвергается более глубокому разложению, чем ГМДС. Признаком этого является значительно большая относительная интенсивность линий Si и полос C_2 в спектрах плазмы смеси ТМС + Ar [17]. Можно предположить, что это связано с отличием строения этих соединений, а именно наличием в гексаметилдисилане сравнительно слабой связи Si–Si, при разрыве которой образуются триметилсилильные радикалы $-\text{Si}-(\text{CH}_3)_3$, но эти образующиеся фрагменты не дают полос в эмиссионных спектрах в данном диапазоне. С ростом концентрации азота в газовой смеси Ar+N₂ интенсивность эмиссии атомов Si и димеров C_2 значительно уменьшается (рис. 16).

Зависимости интенсивности полосы CN и линии водорода H_β (486.1 нм) от мощности ВЧ-разряда и доли азота показаны на рис. 2а, 2б. В смеси ГМДС + Ar + N₂ интенсивность полосы CN хотя и мала, но отличается от нуля из-за упомянутого влияния остаточного азота воздуха в реакторе. С увеличением мощности разряда интенсивность этой полосы не изменяется, оставаясь малой. При подаче азота в исходную газовую смесь наблюдается выраженный рост интенсивности полосы CN с увеличением мощности разряда. При этом наблюдается слабая чувствительность интенсивности CN к доле азота в суммарном потоке. Похожая тенденция обнаружена нами ранее в работе [18]. Интенсивность линии водорода H_β (рис. 2б) при введении различных концентраций азота при используемых мощ-

ностях ВЧ-разряда остается практически одинаковой. Это указывает на образование атомов водорода в плазме по механизму, не зависящему от соотношения скоростей потоков азота и аргона в исходной газовой смеси. Этот механизм требует дополнительных исследований. Зависимости интенсивностей атомарного кремния и димера C_2 от мощности плазмы подобны (рис. 3). Увеличение мощности ВЧ-разряда способствует образованию этих частиц, а добавление азота в исходную газовую смесь приводит к значительному уменьшению интенсивности их эмиссии. Отметим, что увеличение мощности ВЧ-разряда не приводит к появлению новых атомных линий или молекулярных полос на эмиссионных спектрах, а лишь способствует изменению интенсивности существующих линий и полос.

Исследования с помощью СЭМ показали, что все пленки являются сплошными, без трещин, с хорошей морфологической однородностью и не имеют дефектов. Микрофотографии поперечных сечений структур $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{H}/\text{Si}(100)$ подтвердили, что пленки являются однородными по толщине и имеют четкую границу раздела пленка/подложка. Контроль толщины пленок осуществляли методом эллипсометрии. Их толщина составляла 230–300 нм. Одним из важных параметров процесса является скорость осаждения ($V_{\text{ос}}$) пленок. Являясь функцией условий процесса и геометрических размеров реактора, $V_{\text{ос}}$ специфична для каждой установки и обычно определяется экспериментально как отношение толщины пленки ко времени синтеза. Обнаружено, что $V_{\text{ос}}$ снижается от 57 до 35 нм/мин (серия А) и от 32 до 25 нм/мин (серия Б) при увеличении температуры осаждения от 50 до 400°C и

мощности плазмы от 100 до 400 Вт соответственно. Для пленок серии В скорость осаждения незначительно увеличивалась в интервале 25–30 нм/мин с увеличением скорости потока азота.

Методом ЭДС подтверждено наличие элементов Si, C, N, O в пленках. Содержание водорода этим методом не определяется и не учитывается в приведенных результатах. Изменение $T_{\text{ос}}$ в интервале 50–400°C и мощности плазмы (100–400 Вт) не оказали существенного влияния на элементный состав (рис. 4а, 4б). Причиной наличия кислорода и азота в пленках $\text{SiC}_x\text{:H}$ может быть присутствие остаточного воздуха в откачиваемом реакторе.

Химическое строение пленок исследовали с помощью ИК-спектроскопии. Спектры пленок показаны на рис. 5. Отнесение полос проведено с использованием литературных данных [19–22]. Все спектры содержат хорошо выраженные полосы поглощения, форма и интенсивность которых меняются в зависимости от условий синтеза. В ИК-спектрах пленок серии А имеется широкий пик в области 650–1300 см^{-1} с максимумами при 800 и 1015 см^{-1} . Деконволюция этой полосы спектров пленок показала, что основными связями являются Si–C (805 см^{-1}) и Si–CH₂–Si (1007 см^{-1}). В этих пленках имеются также водородсодержащие связи C–H в группах CH₃ (2930 см^{-1}) и Si–CH₃ (1255 см^{-1}), Si–H (2130 см^{-1}). ИК-спектры серии Б аналогичны спектрам серии А. Добавление азота в исходную газовую смесь существенно влияет на химическую структуру пленок. С ростом F(N₂) появляется широкий интенсивный пик максимумом при 3370 см^{-1} , относящийся к колебаниям связей N–H, одновременное наличие полос при 1660 и 1170 см^{-1} может свидетельствовать о наличии групп –NH₂ и Si–NH–Si в пленках. Полоса при 1660 см^{-1} также может быть вызвана колебаниями связей C=N.

Методы эллипсометрии и спектрофотометрии были использованы для изучения оптических свойств пленок. Получены значения показателя преломления, коэффициента пропускания и оптической ширины запрещенной зоны пленок, сформированных при различных условиях синтеза. Следует отметить, что n линейно увеличился от 1.71 до 1.86 и от 1.77 до 1.85 при росте температуры синтеза (серия А) и мощности плазмы (серия Б) соответственно. Добавка азота в газовую смесь привела к снижению n от 1.76 до 1.60.

Следует отметить, что пленки $\text{SiC}_x\text{:H}$ и $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$ обладают высокой прозрачностью в широкой области спектра. Для определения коэффициента пропускания методом оптической спектрофотометрии исследовали образцы пленок на подложках из кварцевого стекла. Коэффициент пропускания света составил 85–100% в области длин волн 500–2500 нм, а кривые пропускания слабо различались для пленок, полученных при разных условиях синтеза. Оптическая ШЗЗ была рассчитана по методу Тауца. Ее значение для пленок, полученных из смеси ГМДС + Ar, линейно уменьшалось от 3.2 до 2.7 эВ и от 3.1 до 2.6 эВ при увеличении температуры осаждения и мощности плазмы соответственно. Значения оптических характеристик пленок, полученные в данной работе, соответствуют приведенным в литературе [3, 5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан процесс синтеза гидрогенизированных пленок карбида и карбонитрида кремния из смесей гексаметилдисилана с аргоном и/или азотом в процессе ICP CVD. Эмиссионные спектры показывают присутствие атомов кремния и димеров C₂ в газовой фазе и указывают на глубокое разложение ГМДС в плазме. Добавление азота в исходную газовую смесь приводит к значительному уменьшению интенсивности линий и полос, соответствующих этим частицам. Исследованы зависимости химического состава и некоторых физических свойств пленок от температуры подложки, мощности плазмы и типа газа-активатора. Характерной особенностью процесса осаждения из смесей ГМДС + Ar является то, что состав и свойства пленок не зависят или слабо изменяются при изменении задаваемых условий синтеза. Добавка азота существенным образом изменила состав и свойства пленок. Определены условия синтеза высокопрозрачных пленок.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00026, <https://rscf.ru/project/23-79-00026/>, с использованием ресурсов Центра коллективного пользования “Национальный центр исследования катализаторов”, ИК СО РАН, Новосибирск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ermakova E., Kosinova M.* // J. Organomet. Chem. 2022. V. 958. P. 122183.
2. *Гильман А.Б., Зиновьев А.В., Кузнецов А.А.* // Химия высоких энергий. 2022. Т. 56. № 6. С. 470.
3. *Файнер Н.И., Немкова А.А.* // Химия высоких энергий. 2015. Т. 49. № 4. С. 308
4. *Wróbel A.M., Wickramanayaka S., Nakanishi Y., et al.* // Diam. Relat. Mater. 1997. V. 6. P. 1081
5. *Wickramanayaka S., Hatanaka Y., Nakanishi Y., Wróbel A.M.* // J. Electrochem. Soc. 1994. V. 141. № 10. P. 2910.
6. *Neileth S. Figueroa, J.L. Nachez, F.L. et al.* // J. Ceram. Soc. Japan. 2009. V. 117. P. 558
7. *Cho S.H., Choi D.J.* // J. Ceram. Soc. Japan. 2009. V. 117. P. 558.
8. *Jun S. Lee, Su B. et al.* // Curr. Appl. Phys. 2015. V. 15. P. 1342.
9. *Choi Y.S., Lee J.S., Jin S.B., Han J.G.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. P. 315501.
10. *Shim C., Jung D.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2004. V. 43. P. 940.
11. *Klumpp A., Schaber U., Offereins H.L. et al.* // Sens. Actuators A Phys., 1994. V. 41. P. 310.
12. *Ito H., Kumakura M., Suzuki T. et al.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2016. V. 55. P. 06HC01.
13. *Орликовский А.А., Руденко К.В., Аверкин С.Н.* // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 3. С. 220.
14. *Pearse R.W.B., Gaydon A.G.* // The Identification of Molecular Spectra. Hoboken, NY, USA: J. Wiley & Sons, 1963.
15. *Dieke G.H.* // The Hydrogen Molecule Wavelength Tables of Gerhard Heinrich Dieke. Ed. Crosswhite H.M. New York, NY, USA: Wiley-InterScience. 1972.
16. NIST Atomic Spectra Database; NIST Standard Reference. Database 78, Version 5.9. Available online: <https://physics.nist.gov/asd>
17. *Rumyantsev Yu.M., Chagin M.N., Shayapov V.R. et al.* // Glass Phys. Chem. 2018. V. 44. № 3. P. 174.
18. *Chagin M.N., Sulyaeva V.S., Shayapov V.R. et al.* // Coatings. 2022. V. 12. P. 80
19. *Tolstoy V.P., Chernyshova I.V., Skryshevsky V.A.* // Handbook of Infrared Spectroscopy of Ultrathin Films. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.: 2003. 739 p.
20. *Bellamy L.J.* // The Infrared Spectra of Complex Molecules. London, United Kingdom: Springer, 1975. 433 p.
21. *Launer P.J., Arkles B.* Infrared analysis of organosilicon compounds: Spectra-structure correlations. In Silicon Compounds: Silanes & Silicones. Morrisville, PA, USA: Gelest, Inc. 2013.
22. *Stuart B.H.* Infrared spectroscopy: fundamentals and applications. John Wiley & Sons Ltd. 2004. 224 p.

AMORPHOUS SiC_xH AND $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{H}$ FILMS OBTAINED FROM HEXAMETHYLDISILANE VAPOR IN INDUCTIVELY COUPLED RF DISCHARGE PLASMA

M. N. Chagin^a, E. N. Ermakova^a, V. R. Shayapov^a, V. S. Sulyaeva^a, E. A. Maksimovskii^a,
I. V. Yushina^a, M. L. Kosinova^{a,*}

^aNikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

*E-mail: marina@niic.nsc.ru

Amorphous films of hydrogenated silicon carbide SiC_xH and carbonitride $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{H}$ have been synthesized in an RF inductively coupled plasma reactor using hexamethyldisilane vapor and additional argon and/or nitrogen gases. The deposition process was carried out at temperatures of 50–400°C and plasma powers of 100–400 W. The dependences of the growth rate, chemical composition and structure of films, light transmittance, refractive index, and optical band gap on synthesis conditions have been obtained. An in situ study of the gas phase composition was performed using optical emission spectroscopy.

Keywords: hexamethyldisilane, ICP CVD, hydrogenated silicon carbide and silicon carbonitride films, optical emission spectroscopy

REFERENCES

1. *Ermakova E., Kosinova M.* // J. Organomet. Chem. 2022. V. 958. P. 122183.
2. *Gilman A.B., Zinoviev A.V., Kuznetsov A.A.* // High Energy Chemistry. 2022. V. 56. № 6. P. 470.
3. *Fainer N.I., Nemkova A.A.* // High Energy Chemistry. 2015. V. 49. № 4. P. 308
4. *Wróbel A.M., Wickramanayaka S., Nakanishi Y., et al.* // Diam. Relat. Mater. 1997. V. 6. P. 1081
5. *Wickramanayaka S., Hatanaka Y., Nakanishi Y., Wróbel A.M.* // J. Electrochem. Soc. 1994. V. 141. № 10. P. 2910.
6. *Neileth S. Figueroa, J.L. Nachez, F.L. et al.* // J. Ceram. Soc. Japan. 2009. V. 117. P. 558.

7. *Cho S.H., Choi D.J.* // J. Ceram. Soc. Japan. 2009. V. 117. P. 558.
8. *Jun S. Lee, Su B. et al.* // Curr. Appl. Phys. 2015. V. 15. P. 1342.
9. *Choi Y.S., Lee J.S., Jin S.B., Han J.G.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. P. 315501.
10. *Shim C., Jung D.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2004. V. 43. P. 940.
11. *Klumpp A., Schaber U., Offereins H.L. et al.* // Sens. Actuators A Phys., 1994. V. 41. P. 310.
12. *Ito H., Kumakura M., Suzuki T. et al.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2016. V. 55. P. 06HC01.
13. *Orlikovskiy A.A., Rudenko K.V., Averkin S.N.* // High Energy Chemistry. 2006. V. 40. № 3. P. 220.
14. *Pearse R.W.B., Gaydon A.G.* The Identification of Molecular Spectra. Hoboken, NY, USA: J. Wiley & Sons, 1963.
15. *Dieke G.H.* The Hydrogen Molecule Wavelength Tables of Gerhard Heinrich Dieke. Ed. Crosswhite H.M., New York, NY, USA: Wiley-InterScience. 1972.
16. NIST Atomic Spectra Database; NIST Standard Reference. Database 78, Version 5.9. Available online: <https://physics.nist.gov/asd>
17. *Rumyantsev Yu.M., Chagin M.N., Shayapov V.R. et al.* // Glass Phys. Chem. 2018. V. 44. №. 3. P. 174.
18. *Chagin M.N., Sulyaeva V.S., Shayapov V.R. et al.* // Coatings. 2022. V. 12. P. 80
19. *Tolstoy V.P., Chernyshova I.V., Skryshevsky V.A.* Handbook of Infrared Spectroscopy of Ultrathin Films. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.: 2003. 739 p.
20. *Bellamy L.J.* The Infrared Spectra of Complex Molecules. London, United Kingdom: Springer, 1975. 433 p.
21. *Launer P.J.; Arkles B.* Infrared analysis of organosilicon compounds: Spectra-structure correlations. In Silicon Compounds: Silanes & Silicones. Morrisville, PA, USA: Gelest, Inc. 2013.
22. *Stuart B.H.* Infrared spectroscopy: fundamentals and applications. John Wiley & Sons Ltd, 2004. 224 p.