10

Оптические свойства композитной структуры a-SiC:H/Ag/c-Si

© К.В. Пригода, В.О. Большаков, С.А. Грудинкин, А.А. Ермина, Д.П. Марков, Ю.А. Жарова

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: piliouguina@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 04.05.2025 г.
В окончательной редакции 23.06.2025 г.
Принята к публикации 24.10.2025 г.

Методами спектральной эллипсометрии и рефлектометрии были исследованы оптические свойства композитной структуры a-SiC:H/полусферические наночастицы Ag/c-Si. Полусферические наночастицы Ag на c-Si получены методом химического осаждения из раствора $AgNO_3$+HF с последующей термообработкой на воздухе. Слой a-SiC:H (~ 50 nm) был нанесен на поверхность полусферических частиц Ag методом плазмохимического газофазного осаждения. В спектре отражения при s-поляризации в диапазоне длин волн от 701 до 717 nm наблюдался резкий провал почти до нулевого значения, величина которого зависела от угла падения света на образец.

Ключевые слова: гидрогенизированный аморфный карбид кремния, полусферические наночастицы серебра, спектральная эллипсометрия.

DOI: 10.61011/OS.2025.11.62162.8010-25

Введение

Пленки аморфного карбида кремния (a-SiC) обладают уникальными химическими и физическими свойствами, такими как широкая запрещенная зона, прозрачность в видимом диапазоне, а также термическая и химическая стабильность [1,2], благодаря чему они являются перспективным материалом для различных применений в опто- и микроэлектронных устройствах [3]. Сочетание a-SiC с различными металлами позволяет создавать новые композитные структуры с улучшенными характеристиками для оптоэлектронных, фотоэлектрических [4], плазмонных и фотолюминесцентных приложений [5,6]. Например, в работе [7] предложено использовать композитные структуры Pd/a-SiC на подложке из пористого оксида алюминия, покрытого серебром, в качестве газовых сенсоров для детектирования водорода. Комбинируя a-SiC с медью и золотом, авторы работы [8] создали энергонезависимые резистивные запоминающие устройства со сверхвысокими коэффициентами переключения. А в работе [9] была выдвинута идея о возможности применения композитных многослойных структур, состоящих из a-SiC и Ag, в качестве высокопроизводительных датчиков УФ излучения, нечувствительных к видимому свету. Исходя из вышесказанного, сочетание a-SiC с различными металлами открывает новые возможности для разработки устройств с уникальными физическими свойствами.

В настоящей работе представлено исследование структур на основе металла и гидрогенизированного аморфного SiC (a-SiC:H), которое включало создание и изучение оптических свойств таких композитов методами спектральной эллипсометрии и рефлектометрии. В качестве металла было выбрано серебро, так как оно имеет высокую отражательную способность, а также обладает плазмонными свойствами в видимом спектральном диапазоне, благодаря чему серебросодержащие структуры широко используются в разных областях [10–13]. При этом серебро значительно дешевле других благородных металлов, что делает производство устройств на его основе выгоднее. Исследуемые композитные структуры были получены в три этапа: 1) создание островковой пленки серебра на поверхности монокристаллического кремния (c-Si), 2) термообработка этой пленки и формирование полусферических наночастиц Ag (НЧAg), 3) покрытие наночастиц на c-Si слоем a-SiC:H. Покрытие наночастиц Ag слоем a-SiC:H позволило сделать структуру более устойчивой к внешним воздействиям и вредным факторам окружающей среды. В работе исследованы особенности отражения поляризованного света от полученной композиционной структуры в видимом спектральном диапазоне.

Создание композитной структуры

В качестве исходной подложки использовалась пластина c-Si p-типа с $\rho = 1-10\,\Omega\times$cm и кристаллографической ориентацией (111). Методом химического осаждения из раствора 0.02M $AgNO_3$ + 5M HF (в соотношении 1:1) в течение 30 s на поверхности чистой c-Si-пластины формировалась островковая пленка Ag. Для получения полусферических НЧAg островковая пленка подвергалась термической обработке на воздухе при 300 °C в течение 30 min. В результате был получен разупорядоченный массив полусферических НЧAg на c-Si. Затем на полученный массив НЧAg на c-Si был нанесен слой аморфного гидрогенизированного карбида

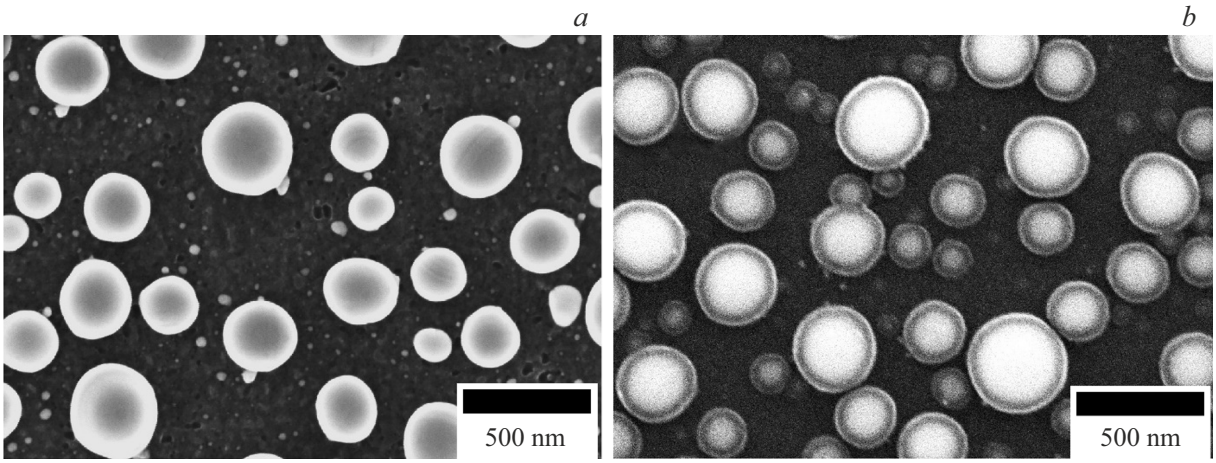

Рис. 1. РЭМ-изображения вида сверху образца: (*a*) полусферические НЧAg на *c*-Si, (*b*) полусферические НЧAg на *c*-Si после нанесения пленки a-SiC:H.

кремния (a-$Si_{1-x}C_x$:H) методом плазмохимического газофазного осаждения из смеси газов CH_4, SiH_4 и Ar. Соотношение газовых потоков углерод- и кремний-содержащих компонентов $CH_4/[CH_4 + SiH_4] = 0.8$, что примерно соответствует составу пленки с $x = 0.58$. Рабочее давление в реакторе составляло 0.1−0.2 Torr, частота высокочастотного излучения 17 MHz, высокочастотная мощность 0.05 W/cm^2. В результате была создана структура a-SiC:H/НЧAg/*c*-Si с толщиной слоя a-SiC:H $\sim$ 50 nm.

Методы исследования структуры

Растровая электронная микроскопия (РЭМ)

Для исследования морфологии полученной композитной структуры использовался растровый электронный микроскоп JSM-7001F (JEOL, Япония). Измерения проводились в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 15 kV. Обработка РЭМ-изображений позволила провести статистический анализ морфологии полученной структуры до нанесения слоя a-SiC:H.

Спектральная эллипсометрия и рефлектометрия

Спектральный эллипсометр SE-2000 (Semilab, Венгрия) использовался для изучения оптических характеристик полученной структуры в диапазоне длин волн λ от 250 до 900 nm при углах падения света φ от 30° до 79°. Было проведено измерение эллипсометрических углов Ψ и Δ, которые определяются из основного уравнения эллипсометрии:

$$\rho = r_p/r_s = \mathrm{tg}(\Psi)e^{i\Delta}, \qquad (1)$$

где ρ — относительный коэффициент отражения системы, r_p, r_s — комплексные коэффициенты отражения для *p*- и *s*-поляризованного света. Тогда, исходя из уравнения (1), $\Psi = \mathrm{arctg}(|r_p|/|r_s|)$, а $\Delta = \arg(r_p/r_s) \equiv \delta r_p - \delta r_s$, где δr_p и δr_s — фазы отраженного света. С помощью эллипсометра Semilab SE-2000 также были измерены спектры отражения в *p*- и *s*-поляризации (R_p и R_s) от полученной структуры.

Результаты и обсуждение

Морфология исследуемой структуры

На рис. 1 представлены РЭМ-изображения видов сверху полусферических НЧAg на *c*-Si (рис. 1, *a*) и этих же частиц после нанесения на них слоя a-SiC:H (рис. 1, *b*). По РЭМ-изображениям вида сверху был проведен статистический анализ исходной структуры, представляющей собой полусферические НЧAg на *c*-Si. Был рассчитан фактор заполнения поверхности подложки *c*-Si серебром, равный $f_{\mathrm{Ag}} = 35\,\%$, а также определен средний диаметр полусферических НЧAg $d_{\mathrm{Ag}} = 161$ nm.

Оптические свойства структуры

На рис. 2 представлены спектральные зависимости эллипсометрических углов Ψ и Δ при разных углах падения света для структуры a-SiC:H/НЧAg/*c*-Si. Диапазон углов измерения эллипсометрических параметров Ψ и Δ был выбран от 30° до 79°. Шаг измерения был 5° (кроме угла 79°, так как это максимальный угол измерения у используемого прибора).

При анализе спектра, представленного на рис. 2, *a*, было выявлено, что в области длин волн 701−717 nm угол Ψ стремится к 90°, что означает, что значение r_s стремится к нулю. Максимальное значение эллипсометрического угла Ψ, которое составило $\sim 89.5°$, было обнаружено при угле падения 68° в результате детального исследования спектров в диапазоне углов падения 65°−79° с шагом 1°, поэтому на зависимостях

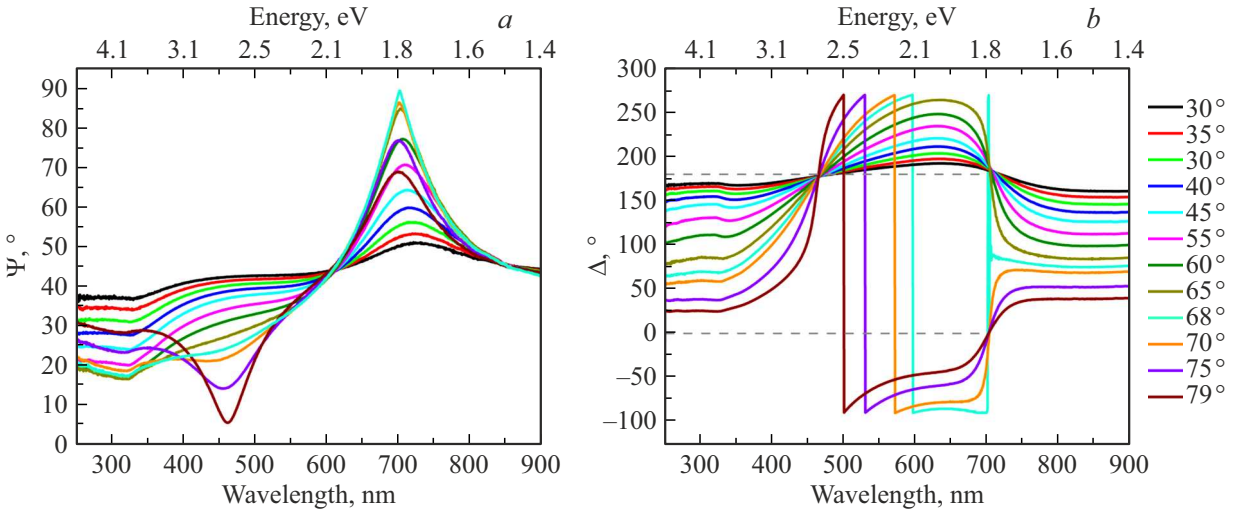

Рис. 2. Зависимости эллипсометрических углов Ψ (*a*) и Δ (*b*) от длины волны при разных углах падения света для структуры a-SiC:H/НЧAg/*c*-Si.

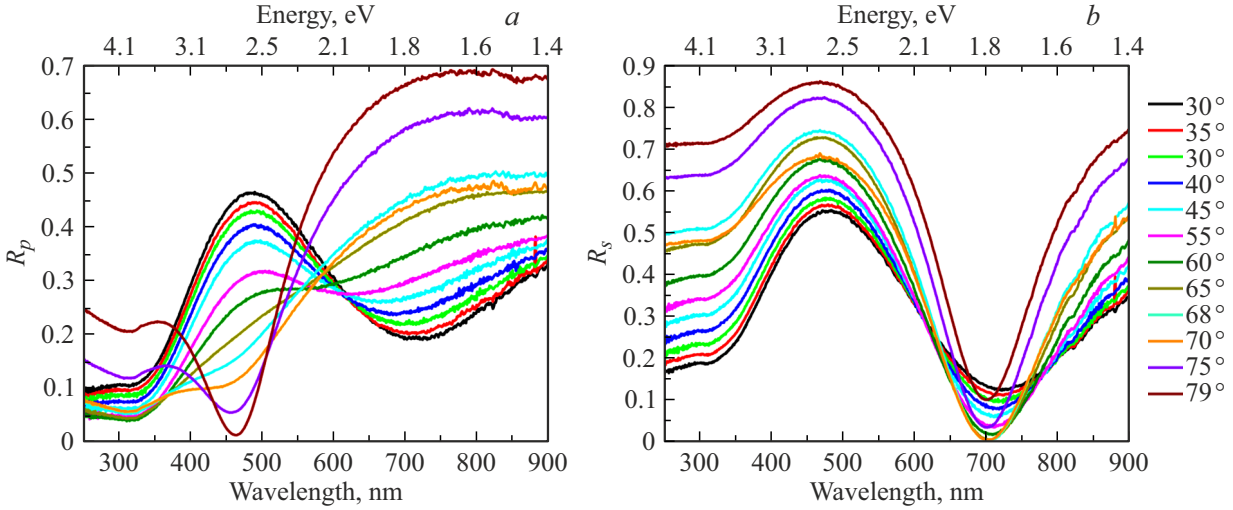

Рис. 3. Спектры коэффициентов отражения *p*- (*a*) и *s*-поляризованного (*b*) света при углах падения от 30° до 79°.

для Ψ и Δ (рис. 2) представлены спектры для угла падения 68°. Также при угле падения света 68° спектр эллипсометрического угла Δ в этом же диапазоне имеет скачкообразное поведение (рис. 2, *b*): Δ принимает значение −4° на длине волны 702 nm, при 703 nm Δ = 175°, а на длине волны 704 nm Δ становится равной 85°. Значения Δ, равные 270° и −90°, эквивалентны, поскольку соответствуют одинаковой разности фаз между векторами *p*- и *s*-поляризаций.

В диапазоне длин волн 460–482 nm при рассмотрении спектра, представленного на рис. 2, *a*, было обнаружено, что значение угла Ψ уменьшается и приближается к 0° при увеличении угла падения света (от 30° до 79°). Это связано с тем, что амплитуда *p*-компоненты поляризации больше *s*-компоненты, что также хорошо видно в спектрах отражения: при угле падения 79° R_p стремится к 0 (рис. 3, *a*). Это означает, что отраженный свет имеет линейную *s*-поляризацию. При этом эллипсометрический угол Δ при любом угле падения света в этом же спектральном диапазоне равен 180° (рис. 2, *b*). С увеличением длины волны от 460 до 482 nm поляризация отраженного света меняет направление с правой на левую.

На рис. 3 представлены спектры коэффициентов отражения *p*- и *s*-поляризованного света (R_p и R_s) при углах падения света от 30° до 79°. Анализ представленного на рис. 3, *a* спектра показал, что при углах падения света 75° и 79° в области 453–462 nm сильно падает интенсивность отражения света в *p*-поляризации (R_p). Такой узкий провал не может быть связан с отражением света при угле Брюстера, поскольку в этом случае он наблюдался бы в широком спектральном диапазоне. Также в диапазоне длин волн 482–494 nm в спектрах R_p имеется пик при углах падения света от 30° до 55°, при

этом в спектрах R_s (рис. 3, b) почти в этом же диапазоне длин волн имеется пик при всех исследуемых углах падения света. В области длин волн 701−717 nm значение R_s стремится к 0 (рис. 3, b), достигая минимального значения при угле падения света 68°. При этом R_p в этой же области имеет провал при углах падения света от 30° до 45°.

Положение и характер экстремумов спектральных зависимостей R_s слабо зависит от угла падения, поэтому поведение семейства кривых можно считать симбатным. В то же время характер экстремумов R_p совпадает с R_s при значениях углов меньше 65°, а при бóльших значениях он противоположен. Подобный оптический эффект был обнаружен на структурах типа „металл-диэлектрик-металл“ [14–16], в которых наблюдалась анизотропия оптических свойств.

Заключение

В настоящей работе были созданы композитные структуры a-SiC:H/НЧAg/c-Si, представляющие собой покрытые аморфным гидрогенизированным карбидом кремния полусферические наночастицы Ag на c-Si подложке. Уникальные оптические характеристики и устойчивость к внешним воздействиям композитных структур a-SiC:H/НЧAg/c-Si делают их перспективными и интересными для фундаментальных исследований и практических применений в таких областях как фотоника и сенсорика.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-22-00334).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] В.А. Васильев, А.С. Волков, Е. Мусабеков, Е.И. Теруков, В.Е. Челноков, С.В. Чернышев, Ю.М. Шерняков. ФТП, **24**, (4), 710 (1990).
[2] S. Greenhorn, E. Bano, V. Stambouli, K. Zekentes. Materials, **17** (5), 1135 (2024). DOI: 10.3390/ma17051135
[3] M. Barbouche, R. Benabderrahmane Zaghouani, N.E. Ben Ammar et al. J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **32**, 20598 (2021). DOI: 10.1007/s10854-021-06570-6
[4] K. Kamakshi, J.P.B. Silva, N.S. Kiran Kumar, K.C. Sekhar, M. Pereira. MRS Commun., **10**, 353 (2020). DOI: 10.1557/mrc.2020.34
[5] K. Kamakshi, K.C. Sekhar, A. Almeida, J. Agostinho Moreira, M.J.M. Gomes. Plasmonics, **10**, 1211 (2015). DOI: 10.1007/s11468-015-9915-4
[6] W. Yu, X.-Z. Wang, W.-L. Dai, W.-B. Lu, Y.-M. Liu, G.-S. Fu. Chin. Phys. B, **22** (5), 057804 (2013). DOI: 10.1088/1674-1056/22/5/057804
[7] A. Sanger, P.K. Jain, Y.K. Mishra, R. Chandra. Sensor. Actuat. B-Chem., **242**, 694 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2016.11.107
[8] L. Zhong, P.A. Reed, R. Huang, C.H. de Groot, L. Jiang. Microelectron. Eng., **119**, 61 (2014). DOI: 10.1016/j.mee.2014.02.004
[9] H. Ferhati, A. Bendjerad, F. Djeffal, A. Benhaya, A. Saidi. *2022 19th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control* (*CCE*) (IEEE, 2022), p. 1−4. DOI: 10.1109/CCE56709.2022.9975902
[10] O.E. Eremina, N.R. Yarenkov, G.I. Bikbaeva et al. Talanta, **266** (1), 124970 (2024). DOI: 10.1016/j.talanta.2023.124970
[11] A. Tabarov, K. Prigoda, E. Popov et al. Appl. Surf. Sci., **682**, 161771 (2025). DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.161771
[12] R. Abbas, J. Luo, X. Qi, A. Naz, I.A. Khan, H. Liu, S. Yu. J. Wei Nanomaterials, **14** (17), 1425 (2024). DOI: 10.3390/nano14171425
[13] F. Alzoubi, W. BaniHani, R. BaniHani, H. Al-Khateeb, M. Al-Qadi, Q. Al Bataineh. J. Clust. Sci., **35**, 2979 (2024). DOI: 10.1007/s10876-024-02708-8
[14] G.E. Lio, A. Ferraro, M. Giocondo, R. Caputo, A. DeLuca. Adv. Optical Mater., **8** (17), 2000487 (2020). DOI: 10.1002/adom.202000487
[15] N. Priscilla, D. Smith, E. Della Gaspera, J. Song, L. Wesemann, T. James, A. Roberts. Adv. Photonics Res., **3** (5), 2100333 (2022). DOI: 10.1002/adpr.202100333
[16] M. Iwanaga. *Plasmonic resonators: fundamentals, advances, and applications* (Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., Singapore, 2016), 1st ed. DOI: 10.1201/9781315364711