

УДК 537.563; 537.533.9
EDN: KCXTBH

PACS: 52.50.Dg

Скорость осаждения и температура подложки при нанесении кремний-углеродных покрытий электронно-лучевым испарением карбида кремния

© В. А. Бурдовицин*, Л. Ж. Нгон А Кики, Е. М. Окс, Ф. А. Суховольский

*Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, 634050 Россия*** E-mail: burdov@fet.tusur.ru**Статья поступила в редакцию 20.05.2026; после доработки 18.06.2026; принята к публикации 06.08.2026
Шифр научной специальности: 1.3.5*

Кремний-углеродные покрытия приготовлены путем электронно-лучевого испарения карбида кремния. Нагрев подложек происходил за счет теплового излучения мишени. Установлено, что скорость осаждения и температура подложки обратно пропорциональны квадрату расстояния до мишени. Показано, что скорость осаждения однозначно связана с температурой подложки. В отсутствие принудительного охлаждения ограничение скорости осаждения обусловлено тепловыми свойствами материала подложки, что следует учитывать при осаждении покрытия на легкоплавкие материалы.

Ключевые слова: электронно-лучевое испарение карбида кремния, кремний-углеродные покрытия, скорость осаждения, тепловое излучение, температура подложки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-93-97

Введение

Кремний-углеродные пленки, осаждаемые электронно-лучевым испарением, обладают свойствами, достаточными для их применения в качестве защитных и упрочняющих покрытий [1]. Одно из основных достоинств электронно-лучевого испарения заключается в более высокой скорости осаждения по сравнению с плазмохимическим методом [2] и магнетронным распылением [3]. Проблема нагрева подложки всеми видами излучений при магнетронном распылении рассматривалась в работах [4, 5]. В то же время считается [6], что при электронно-лучевом испарении нагрев подложек невелик, что позволяет осаждать покрытия на термочувствительные подложки. Вместе с тем в случае испарения карбида кремния достижение скоростей осаждения порядка 1 мкм/мин и более обеспечивается разо-

гревом мишени до температур, превышающих 2500 К. Это сопровождается интенсивным тепловым излучением, приводящим к заметному нагреву подложек. В случае подложек из легкоплавких материалов, например, алюминия, такой нагрев может привести к фатальным последствиям. Цель настоящей работы – анализ соотношения между скоростью осаждения покрытия и температурой, до которой нагревается подложка.

Техника и методика эксперимента

Для проведения экспериментов по установлению взаимосвязи между температурой подложки и скоростью осаждения покрытия использовалась установка, оснащенная форвакуумным электронным источником с плазменным катодом [7]. В рабочей камере распо-

лагалась оснастка, включающая в себя графитовый тигель с размещенной в нем мишенью, представляющей собой таблетку диаметром 12 мм и толщиной 3 мм, спеченную из порошка карбида кремния с зернистостью F 60 (рис. 1). На общей с тиглем платформе на стальных стойках размещались пять подложек-держателей на разных расстояниях от мишени.

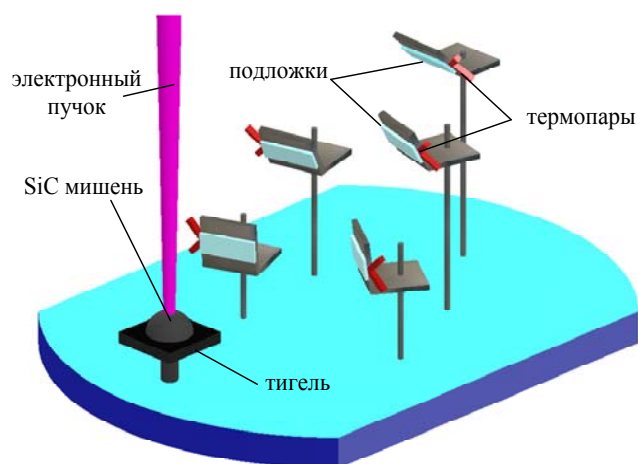


Рис. 1. Схема осаждения кремний-углеродных покрытий

В качестве подложек использовались пластинки из боросиликатного стекла размером 10×20×2 мм. Телесный угол, в котором находились подложки, не превышал 0,2 стеррад. К каждой подложке подсоединена хромель-

алюмелевая термопара. Осаждение проводили в непрерывном режиме в атмосфере гелия в течение одного часа. Толщину осажденных пленок измеряли с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

Результаты измерений

Приведенные на рис. 2 экспериментальные зависимости показывают, что в пределах разброса значений скорость v осаждения и температура T_s подложки изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния r от мишени до подложки при постоянной мощности электронного пучка. Причем с повышением мощности электронного пучка для зависимостей v от $(1/r^2)$ наклон возрастает, в то время как для прямых $T_s(1/r^2)$ наклон изменяется слабее. Обращает на себя внимание зависимость скорости осаждения от температуры подложки (рис. 3). Несмотря на то, что измерения выполнены для подложек, расположенных на разных расстояниях от мишени, экспериментальные точки неплохо укладываются в общую кривую. Применительно к легкоплавкому материалу подложки, например, алюминию, эта зависимость означает, что в отсутствие принудительного охлаждения подложки скорость осаждения имеет предел, задаваемый температурой подложки.

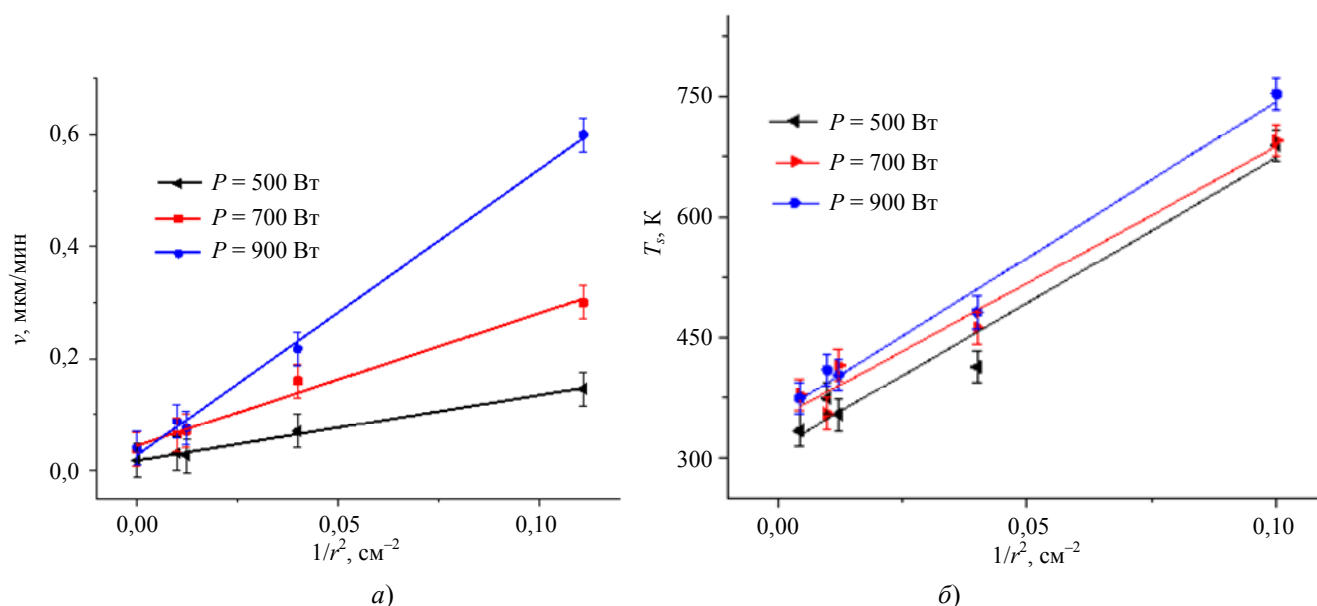


Рис. 2. Скорость v осаждения (а) и температура T_s подложки (б) как функция обратного квадрата расстояния $1/r^2$ для разных мощностей электронного пучка

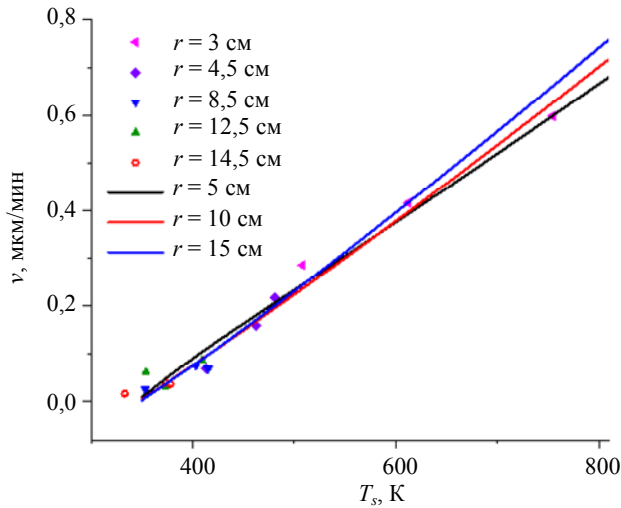


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) зависимости скорости v осаждения от температуры T_s подложки

Анализ тепловой нагрузки и скорости осаждения

Для объяснения полученных зависимостей примем допущения. Испаренные частицы летят без столкновений с газовыми молекулами и осаждаются на поверхностях, которых достигают. Мишень – абсолютно черное тело. Испарение карбида кремния подчиняется закону Клаузиуса-Клапейрона с поправкой Антуана [8]. Скорость V_{ev} испарения определим как произведение плотности насыщенного пара на среднюю скорость молекулы и площадь испарения S_t :

$$V_{ev} = S_t \sqrt{\frac{kT_t}{m}} \frac{mp_0}{kT_t} \cdot e^{-\frac{\Delta H}{R(T_t+C)}} = S_t \sqrt{\frac{\mu}{RT_t}} p_0 \cdot \exp\left[-\frac{\Delta H}{R(T_t+C)}\right] \quad (1)$$

где T_t – температура мишени; m – масса молекулы SiC; μ и ΔH – молярная масса и теплота испарения карбида кремния; R – газовая постоянная; C – поправка Антуана; p_0 и C – константы, определяемые из сравнения с экспериментом. С учетом допущений, перечисленных выше, для скорости V_{dep} осаждения получаем $V_{dep} = V_{ev}/2\pi r^2$. Температура мишени связана с мощностью P_t , приносимой на мишень электронным пучком $T_t = (P_t/S_t\sigma)^{1/4}$, где σ – постоянная Стефана-Больцмана. Для установления связи между температурой T_s подложки, площадью S_s под-

ложки и температурой T_t мишени требуется привлечь механизм установления теплового баланса подложки. Если потеря энергии подложкой осуществляется за счет теплового излучения, то из уравнения баланса энергий

$$P_t \frac{S_s}{4\pi r^2} = 2S_s\sigma T_s^4, \quad (2)$$

$$\text{следует } T_s = \left(\frac{P_t}{8\pi\sigma r^2}\right)^{1/4}. \quad (3)$$

Т.е. температура T_s подложки зависит от расстояния как $1/r^{1/2}$. Это не соответствует экспериментальной зависимости, приведенной на рис. 2. Иной путь отвода тепла – теплопроводность. При условии, что P_t есть величина порядка одного киловатта, поток P_s тепла на подложку, оцененный из выражения $P_s = \frac{P_t}{4\pi r^2} S_s$, составляет единицы ватт.

При давлении в несколько паскалей теплопроводность газа не может обеспечить такой отвод тепла. Следовательно, основной путь потока тепла – теплопроводность элементов подложкодержателя. Поскольку точные расчеты вряд ли уместны, поток тепла от подложки можно учесть выражением $\alpha(T_s - T_b)$ [4], где T_b – температура платформы, на которой расположен подложкодержатель, а коэффициент α следует определить из сравнения с экспериментом. Для подтверждения возможности отвода тепла от подложки путем теплопроводности могут быть сделаны оценки.

Поток Q тепла через стальной стержень диаметром d и длиной l , на котором размещен подложкодержатель, может быть записан как

$$Q = \frac{\lambda \pi d^2}{4l} (T_s - T_b), \quad (4)$$

где $\lambda = 45$ Вт/м·К – теплопроводность стали. Для $d = 3$ мм, $l = 5$ см, $T_s - T_b = 400$ К получаем $Q = 2,5$ Вт, что согласуется с потоком лучистой энергии на подложку. С учетом принятых допущений уравнение баланса энергий на подложке теперь выглядит как

$$S_t \sigma T_t^4 \frac{S_s}{2\pi r^2} = \alpha (T_s - T_b), \quad (5)$$

т. е. температура подложки обратно пропорциональна квадрату расстояния. Выражения (1) и (5) отражают связь скорости осаждения покрытия и температуры подложки с температурой мишени, а следовательно – и с мощностью электронного пучка. Выражая T_t из (5) и подставляя в (1), а также учитывая связь между скоростями, получаем выражение, удобное для анализа зависимости скорости V_{dep} осаждения от температуры T_s подложки

$$V_{dep} = \frac{A}{r^{9/4}} \frac{1}{(T_s - T_b)^{1/8}} \times \exp \left\{ -\Delta H / R \left[B \sqrt{r} (T_s - T_b)^{1/4} + C \right] \right\}, \quad (6)$$

$$\text{где } A = \frac{S_t}{2\pi\sqrt{B}} p_0 \sqrt{\frac{\mu}{R}}, \quad B = \left(\frac{2\pi\alpha}{\sigma S_t S_s} \right)^{1/4}.$$

На первый взгляд вытекающая из выражения (6) зависимость скорости осаждения от расстояния выглядит как $V_{dep} \sim r^{-9/4}$, т. е. отличается от $V_{dep} \sim r^{-2}$, обнаруженной в эксперименте. Однако следует учесть наличие r в показателе экспоненты (6), согласно которой V_{dep} слабо возрастает с увеличением r . Приведенные в относительных единицах расчетные кривые (рис. 3) удовлетворительно совпадают с экспериментальными точками. Причем кривые, полученные для разных расстояний, незначительно отличаются друг от друга, что

также соответствует результатам эксперимента. Малое изменение наклона прямых на рис. 2б не находит удовлетворительного объяснения в рамках предложенной модели. Можно, однако, заметить, что в одном и том же диапазоне изменений расстояния r скорость V_{dep} осаждения изменяется на порядок, а температура T_s подложки – в два раза.

Заключение

Выполненные измерения и анализ показали, что при осаждении кремний-углеродных покрытий электронно-лучевым испарением карбида кремния нагрев подложек за счет теплового излучения мишени может оказаться значительным. В случае легкоплавкого материала подложки и отсутствия принудительного охлаждения этот нагрев накладывает ограничения на мощность электронного пучка и, следовательно, на скорость осаждения покрытия. Причем, скорость осаждения однозначно определяется температурой подложки. Указанного ограничения следует ожидать при осаждении покрытий из других материалов с высокой температурой испарения.

Работа выполнена при поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
проект № FEWM-2026-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zolotukhin D. B., Kazakov A. V., Oks E. M., Tyunkov A. V., Yushkov Yu. G. / *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. P. 13890–13894.
2. Grenadyorov A. S., Oskomov K. V., Solov'ev A. A., Rabotkin S. V. / *Technical Physics*. 2016. Vol. 61. P. 690–695.
3. Najafov B. A., Abasov F. P., Ibragimov R. S., Abdullayev X. Sh. / *J. Nanosci. Res. Rep.* 2021. Vol. 3. P. 1–7.
4. Thornton A. / *Thin Solid Films*. 1978. Vol. 54. P. 23–31.
5. Shapovalov V. I., Sharkovski D. S. / *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 3599. <https://doi.org/10.3390/ma17143599>
6. <https://www.nanofab.com.cn/en/insight-2/application/what-is-electron-beam-evaporation-deposition/>
7. Burdovitsin V. A., Bakeev I. Yu., Ngou A. Kiki L. J., Oks E. M., Tyunkov A. V. / *High Temperature Materials and processes*. 2025. Vol. 29. P. 1–7.
8. Reid R., Prausnitz J., Sherwood T. / *The properties of gases and liquids*. – New York: McGraw-Hill. 1977.

Deposition rate and substrate temperature during deposition of silicon-carbon coatings by electron beam evaporation of silicon carbide

V. A. Burdovitsin*, L. J. Ngon A Kiki, E. M. Oks, and F. A. Sukhovolsky

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia

* E-mail: burdov@fet.tusur.ru

Received 20.05.2026; revised 00.00.2026; accepted 06.08.2026

Silicon-carbon coatings are prepared by electron beam evaporation of silicon carbide. The heating of the substrates occurred due to the thermal radiation of the target. The deposition rate and the substrate temperature are inversely proportional to the square of the distance to the target. It is shown that the deposition rate is uniquely related to the substrate temperature.

Keywords: Electron beam evaporation of silicon carbide, silicon-carbon coatings, deposition rate, thermal radiation, substrate temperature.

REFERENCES

1. Zolotukhin D. B., Kazakov A. V., Oks E. M., Tyunkov A. V., and Yushkov Yu. G., *Ceramics International* **48**, 13890–13894 (2022).
2. Grenadyorov A. S., Oskomov K. V., Solov'ev A. A., and Rabotkin S. V., *Technical Physics* **61**, 690–695 (2016).
3. Najafov B. A., Abasov F. P., Ibragimov R. S., and Abdullayev X. Sh., *J. Nanosci. Res. Rep.* **3**, 1–7 (2021).
4. Thornton A., *Thin Solid Films* **54**, 23–31 (1978).
5. Shapovalov V. I. and Sharkovski D. S., *Materials* **17**, 3599 (2024). <https://doi.org/10.3390/ma17143599>
6. <https://www.nanofab.com.cn/en/insight-2/application/what-is-electron-beam-evaporation-deposition/>
7. Burdovitsin V. A., Bakeev I. Yu., Ngon A. Kiki L. J., Oks E. M., and Tyunkov A. V., *High Temperature Materials and processes* **29**, 1–7 (2025).
8. Reid R., Prausnitz J., and Sherwood T. *The properties of gases and liquids*. New York: McGraw-Hill, 1977.

Об авторах

Бурдовицин Виктор Алексеевич, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник, Томский Государственный университет управления и радиоэлектроники (634050, Россия, Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: burdov@fet.tusur.ru WOS: B-9924-2014, Scopus: 55912791800, ORCID: 0000-0003-1645-6136, SPIN-код: 5044-2693, AuthorID: 36336

Нгон А Кики Лионель Жозель, аспирант, Томский Государственный университет управления и радиоэлектроники (634050, Россия, Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: joelngon52@gmail.com WOS: HRB-7794-2023, Scopus: 58140480800, AuthorID: 1273207, SPIN-код: 2617-5472, ORCID 0009-0001-1397-4846

Окс Ефим Михайлович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, Томский Государственный университет управления и радиоэлектроники (634050, Россия, Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: oks@fet.tusur.ru WOS: A-9409-2014, SCOPUS: 57201868048, ORCID 0000-0002-9323-0686, SPIN-код: 6422-5057, AuthorID: 18767

Суховольский Федор Александрович, студент, Томский Государственный университет управления и радиоэлектроники (634050, Россия, Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: spectrumz12@yandex.ru ORCID ID: 0009-0003-7346-0884, Scopus ID: 59458245500