

УДК 537.563; 537.533.9
EDN: GFPGDV

PACS: 52.50.Dg

Электрические и оптические свойства кремний-углеродных пленок, осажженных электронно-лучевым испарением карбида кремния в газовой среде

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

*Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, 634050 Россия*** E-mail: burdov@fet.tusur.ru**Статья поступила в редакцию 29.07.2025; после доработки 14.10.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 1.3.5*

Кремний-углеродные пленки приготовлены путем электронно-лучевого испарения карбида кремния в азоте, кислороде, гелии и пропане. Электронный пучок создавался источником электронов с плазменным катодом. Измерены удельное сопротивление, энергия активации проводимости, ширина оптической запрещенной зоны, а также содержание элементов в пленках, осажженных при различных температурах. Показано, что изменение свойств пленок с температурой осаждения коррелирует с изменением соотношения элементов в пленках. Результаты проведенных исследований имеют важное значение для создания технологии электронно-лучевого синтеза кремний-углеродных пленок.

Ключевые слова: форвакуумный электронный источник; электронно-лучевое испарение карбида кремния; кремний-углеродные пленки; удельное сопротивление; энергия активации; оптическая ширина запрещенной зоны.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-50-55

Введение

Кремний-углеродные (КУ) пленки, то есть пленки карбида кремния, содержащие дополнительные элементы, такие как кислород, азот и водород, используются для пассивации контактов кремниевых солнечных элементов [1, 2], а также в качестве материала для солнечных элементов [3]. Это повышает интерес к электрическим свойствам таких пленок. Среди многообразия методов нанесения кремний-углеродных пленок особое место занимают вакуумные методы и, в частности, электронно-лучевое испарение. Преимущества этого метода по сравнению с традиционным плазмохимическим осаждением заключаются в относительно высокой скорости осаждения (до нескольких микрометров в минуту), воз-

можности осаждения при низких (вплоть до комнатной) температурах подложки, а также в отсутствии токсичных металлоорганических соединений. В работах [4–6] испарение карбида кремния проводилось с использованием термокатодных электронных пушек, что накладывает ограничения как на диапазон рабочих давлений, так и на способность испарять материал в активных газах. В настоящей работе использован источник электронов с плазменным катодом [7], который сохраняет работоспособность в различных газах в диапазоне давлений от единиц до десятков Паскалей. Как отмечается в ряде работ [8–10], электрические и оптические свойства кремний-углеродных пленок в значительной степени определяются условиями осаждения. Пленки, нанесенные плазмохимическим методом с ге-

нерацией плазмы высокочастотным разрядом, характеризуются активационным механизмом электропроводности с энергией активации $E_a = 0,1-0,9$ эВ [8], которая увеличивается с увеличением мощности, подводимой в разряд. В то же время удельное сопротивление также увеличивается в диапазоне 10^2-10^9 Ом·см. Авторы публикации сообщают, что увеличение мощности сопровождается изменением соотношения атомных концентраций Si/C с 9 до 2,3, то есть устранением избытка кремния. Пленки, нанесенные методом реактивного магнетронного распыления кремния в метане [10], имеют удельное сопротивление от $1,3 \times 10^3$ до $9,4 \times 10^9$ Ом·см и энергию активации от 0,16 до 1 эВ при увеличении расхода метана. В то же время скорость осаждения снижается с 30 до 12 нм/мин, а отношение атомных концентраций Si/C также уменьшается с 2,5 до 0,17. Следует также отметить, что ширина оптической запрещенной зоны E_g увеличивается с 1,7 до 2,7 эВ. Только одна работа [4] посвящена исследованию механизма электропроводности пленок, нанесенных электронно-лучевым испарением. Как указано в [4], удельное сопротивление пленок немонотонно зависит от температуры осаждения в диапазоне 300–575 К, а энергия активации составляет 0,16 эВ.

Согласно [5], удельное сопротивление тонких пленок карбида кремния, полученных электронно-лучевым испарением, не зависит от температуры осаждения. Как в [4], так и в [5] состав газовой среды в вакуумной камере не контролировался. Эти результаты указывают на необходимость дальнейших исследований электрических свойств кремний-углеродных пленок в зависимости от температуры осаждения и состава газовой среды при электронно-лучевом испарении. Целью данной работы является изучение зависимости электрических и оптических свойств кремний-углеродных пленок, осажденных методом электронно-лучевого испарения карбида кремния в различных газах, от температуры осаждения.

Техника и методика эксперимента

Эксперименты проводились на установке электронно-лучевого испарения описанной

ранее в [11]. В рабочей камере, изготовленной из нержавеющей стали, располагался графитовый тигель с мишенью, спеченной из порошка карбида кремния, и три подложкодержателя с отдельными нагревателями, оснащенными термопарами для измерения температуры T_{dep} осаждения. Подложкодержатели прикрывались заслонками с электроприводом. Оптические измерения были проведены с использованием спектрофотометра СФ 2000 для пленок, осажденных на кварцевые подложки. В качестве подложек для электрических измерений использовались пластинки поликора размером 15×20 мм и толщиной 1 мм. На эти подложки термическим испарением в вакууме предварительно осаждались медные полоски шириной 1 мм.

Подложки размещались в подложкодержателях, и рабочая камера откачивалась механическим насосом до давления 1 Па. После этого в камеру напускался рабочий газ, в качестве которого использовались азот, кислород, гелий и пропан, и производилась промывка в течение 10 минут с одновременным нагревом подложкодержателей. При рабочем давлении 4 Па осуществлялось включение электронного источника и постепенное повышение эмиссионного тока I_e и ускоряющего напряжения U_a до начала испарения мишени. При достижении рабочих параметров $I_e = 90$ мА и $U_a = 11$ кВ производилось открывание заслонок и осаждение пленок. Процесс заканчивался выключением электронного источника. После остывания подложки извлекались из камеры и помещались в установку термического испарения, где на них осаждали медные полоски перпендикулярно нижним. Приготовленные таким образом конденсаторные структуры помещались в термостатированный объем, и производились измерения вольтамперных характеристик при разных температурах. Для измерения тока использовался прибор Ф 195 (Россия). Толщину пленок определяли с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 (ЛОМО Россия). На основании этих измерений производился расчет удельного сопротивления. Элементный состав определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа ТМ-1000 (Hitachi, Япония), оснащенного приставкой энергодисперсионного анализа EDS-SWIFT (Англия).

Результаты эксперимента и обсуждение

Вольтамперные характеристики структур металл – КУ пленка – металл имели линейный характер. При изменении температуры измерения крутизна характеристик изменялась. Определение сопротивления производилось по величине производной dU/dI в точке $U=0$ [12]. Зависимости удельного сопротивления ρ пленок, осажденных в разных газах (рис. 1), показывают снижение ρ с повышением температуры осаждения. Причем, наибольшим удельным сопротивлением обладают пленки, осажденные в кислороде и пропане.

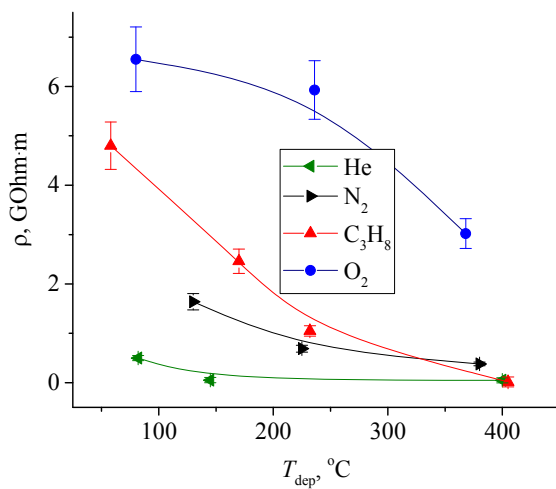


Рис. 1. Удельное сопротивление пленок, осажденных в разных газах, от температуры T_{dep} осаждения

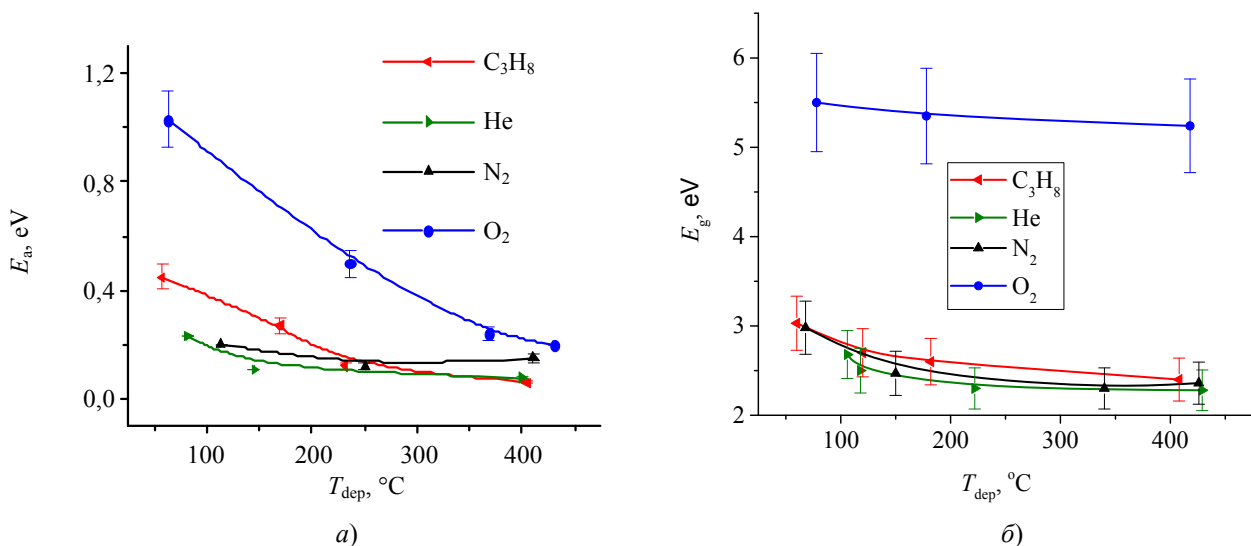


Рис. 2. Значения энергии E_a активации (а) и оптической ширины E_g запрещенной зоны пленок в зависимости от температуры T_{oc} осаждения в разных газах

Выполненные параллельно измерения состава пленок позволяют сделать некоторые предположения относительно причин изменения удельного сопротивления в зависимости

от температуры осаждения. Повышение температуры вызывает возрастание относительного содержания кремния (рис. 3). Этот результат согласуется с данными, приведен-

ными на рис. 2а. Как можно заметить, величины E_a также снижаются по мере повышения температуры осаждения. Характер полученных зависимостей коррелирует с поведением оптической ширины E_g запрещенной зоны, полученной из обработки в координатах Тауца [13] спектров пропускания в видимой области (рис. 2б). Нельзя не заметить, что величины E_a и E_g отличаются значительно.

ными в [4, 6], где снижение отношения атомных концентраций Si/C признано основной причиной повышения величин E_g и E_a . Следует заметить, однако, что в нашем случае определенную роль играет кислород, содержание которого слабо изменяется с повышением температуры осаждения, а следовательно, отношение Si/O также возрастает с повышением температуры осаждения. Причина возрастания содержания кремния с возрастанием температуры заключается, скорее всего, в более быстром снижении адсорбции газовых молекул и атомов углерода по сравнению с атомами кремния. Аргументом в пользу такого предположения является большая энергия адсорбции углерода по сравнению с кремнием, а следовательно, более сильная зависимость адсорбции от температуры [14]. Кроме того, поскольку оксид углерода – газ, то взаимодействие углерода с кислородом при повышении температуры также способствует уменьшению содержания углерода в пленке, т. к. газ уносится в откачную систему. Значения удельного сопротивления осажденных пленок позво-

ляет отнести их к полупроводниковым материалам. Сравнительно низкая энергия активации свидетельствует о том, что пленочный материал резко отличается по свойствам от кристаллического карбида кремния. Это в том числе проявляется при анализе оптических спектров пропускания. Определенная на основе этих спектров величина E_g , находящаяся в пределах 2–3 эВ (рис. 2б), вполне соответствует значениям этой величины для кристаллического SiC. Наблюдаемое различие величин E_g и E_a может быть объяснено предположением о наличии в запрещенной зоне пленок примесных уровней донорного типа [15] с глубиной залегания, соответствующей измеренным значениям E_a . Причиной появления таких уровней могут быть как собственно примеси, а именно, водород и кислород, так и аморфная структура пленки. Последнее предположение весьма вероятно, поскольку в известных работах [8–10] по электрическим свойствам кремний-углеродных пленок для E_a указывается величина в десятые доли электрон-вольта.

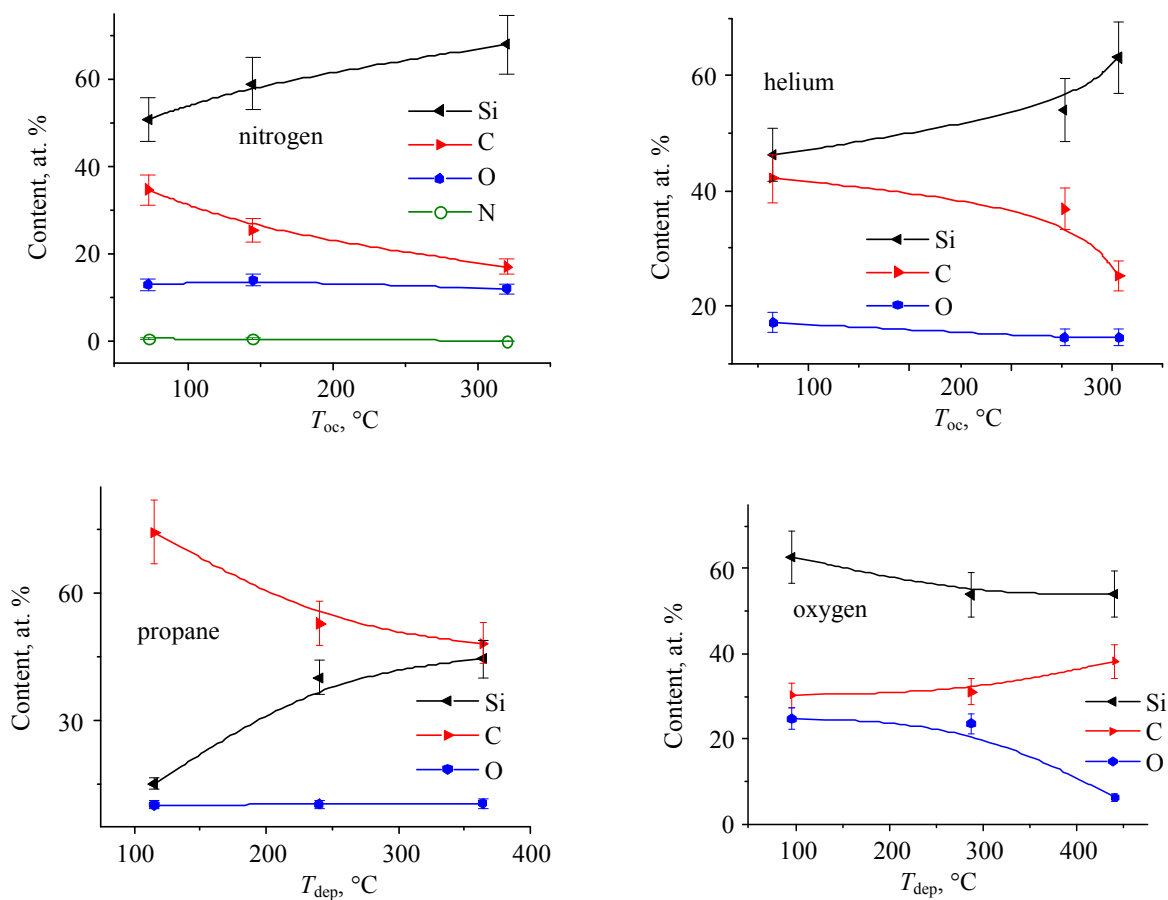


Рис. 3. Состав пленок, осажденных в разных газах, в зависимости от температуры T_{dep} осаждения

Заключение

Выполненные измерения указывают на активационный механизм проводимости кремний-углеродных пленок, полученных электронно-лучевым испарением карбида кремния в разных газах. Величина энергии активации находится в пределах 1,0–0,1 эВ в зависимости от рода газа и снижается с повышением температуры осаждения. Удельное сопротивление пленок составляет 10^8 – 10^9 Ом·м и имеет тенденцию к снижению с возрастанием температуры осаждения. Отмеченные закономерности находят свое объяснение в рамках представлений об изменении состава пленок в сторону обогащения кремнием при повышении температуры осаждения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEWM-2023-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu Z., Tao K., Jiang S., Jia R., Li W., Zhou Y. et al. / Solar Energy Materials and Solar Cells. 2020. Vol. 206. P. 110329.

2. Muhanad A. A., Mohammed M. S., Wathiq R. A. / The Scientific Journal of Koya University. 2021. Vol. 9. P. 10852.

3. Shan D., Sun D., Wang M., Cao Y. / Crystals. 2024. Vol. 14. P. 45.

4. Bunton G. V. / J. Phys. D: Appl. Phys. 1970. Vol. 3. P. 232–236.

5. Yi J., He X. D., Sun Y. / Journal of Alloys and Compounds. 2008. Vol. 461. P. L11–L13.

6. Zheng J., Ye L., Hu Y., Huang Y., Yu J., Chen T. / Vacuum. 2023. Vol. 211. P. 111979.

7. Бурдовитин В. А., Окс Е. М. / Известия ВУЗов. Физика. 2020. № 10. С. 33–40.

8. Ambrosone G., Basa D. K., Coscia U., Santamaria L., Pinto N., Ficcadenti M. et al. / Energy Procedia. 2010. Vol. 2. P. 3–7.

9. Vetter M., Voz C., Ferre R., Martin I., Orpella A. et al. / Thin Solid Films. 2006. Vol. 511–512. P. 290–294.

10. Tavsanoglu T., Zayim E. O., Agirseven O., Yildirim S., Yucel O. / Thin Solid Films. 2019. Vol. 674. P. 1–6.

11. Burdovitsin V., Bakeev I., Ngon A. Kiki L., Oks E., Tyunkov A. / High Temperature Material Processes. 2024. Vol. 29. P. 1–7.

12. Chang C. Y., Fang Y. K., Sze S. M. / Solid-State Electronics. 1971. Vol. 14. P. 541–550.

13. Tauc J. / Materials Research Bulletin. 1968. Vol. 3. P. 37–46.

14. Cahyadi Erica / UCLA Electronic Theses and Dissertations. 2012. <https://escholarship.org/uc/item/7c35n3n0>

15. Dubrovskii G. B., Radovanova E. I. / Phys. Stat. Sol. (b). 1971. Vol. 48. P. 875–879.

PACS: 52.50.Dg

Electrical and optical properties of silicon-carbon films deposited by electron beam evaporation of silicon carbide in gas environment

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 29.07.2025; revised 14.10.2025; accepted 11.12.2025

Silicon-carbon films were prepared by electron beam evaporation of silicon carbide in nitrogen, oxygen, helium and propane. Electron beam was produced by electron source with plasma cathode. The resistivity, conductivity activation energy, optical band gap as well as element content of silicon-carbon films obtained at different temperatures were measured. It is shown that a change in the films properties with the deposition temperature correlates with a change in the ratio of elements in the films.

Keywords: plasma-cathode electron source; electron beam evaporation of silicon carbide; silicon-carbon films; resistivity; activation energy; optical band gap.

REFERENCES

1. Xu Z., Tao K., Jiang S., Jia R., Li W., Zhou Y. et al., *Solar Energy Materials and Solar Cells* **206**, 110329 (2020).
2. Muhanad A. A., Mohammed M. S. and Wathiq R. A., *The Scientific Journal of Koya University* **9**, 10852 (2021).
3. Shan D., Sun D., Wang M. and Cao Y., *Crystals* **14**, 45 (2024).
4. Bunton G. V., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **3**, 232–236 (1970).
5. Yi J., He X. D. and Sun Y., *Journal of Alloys and Compounds* **461**, L11–L13 (2008).
6. Zheng J., Ye L., Hu Y., Huang Y., Yu J. and Chen T., *Vacuum* **211**, 111979 (2023).
7. Burdovitsin V. A. and Oks E. M., *Russian Physics Journal* **63**, 1678–1685 (2021).
8. Ambrosone G., Basa D. K., Coscia U., Santamaria L., Pinto N., Ficcadenti M. et al., *Energy Procedia* **2**, 3–7 (2010).
9. Vetter M., Voz C., Ferre R., Martin I., Orpella A. et al., *Thin Solid Films* **511–512**, 290–294 (2006).
10. Tavsanoglu T., Zayim E. O., Agirseven O., Yildirim S. and Yucel O., *Thin Solid Films* **674**, 1–6 (2019).
11. Burdovitsin V., Bakeev I., Ngon A. Kiki L., Oks E. and Tyunkov A., *High Temperature Material Processes* **29**, 1–7 (2024).
12. Chang C. Y., Fang Y. K. and Sze S. M., *Solid-State Electronics* **14**, 541–550 (1971).
13. Tauc J., *Materials Research Bulletin* **3**, 37–46 (1968).
14. Cahyadi Erica. *UCLA Electronic Theses and Dissertations*. 2012. <https://escholarship.org/uc/item/7c35n3n0>
15. Dubrovskii G. B. and Radovanova E. I., *Phys. Stat. Sol. (b)* **48**, 875–879 (1971).

Об авторах

Бурдовицин Виктор Алексеевич, д.т.н., ведущий научный сотрудник, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: burdov@fet.tusur.ru SPIN-код: 5044-2693, AuthorID: 36336

Нгон А Кики Лионель Жозель, инженер, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: joelngon52@gmail.com SPIN-код: 2617-5472, AuthorID: 1273207

Окс Ефим Михайлович, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: oks@fet.tusur.ru SPIN-код: 6422-5057, AuthorID: 18767

Суховольский Федор Александрович, магистрант, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: spectrumz12@yandex.ru