

УДК 621.793

**Сравнительный анализ особенностей формирования состава плазмы  
при магнетронном распылении карбида кремния с использованием охлаждаемой  
и горячей мишеней**

М.Э. Фишер, В.А. Грудинин

Научный руководитель: к.т.н., В.А. Грудинин

Научный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: mef4@tpu.ru

**Comparative analysis of features of plasma composition formation during magnetron  
sputtering of silicon carbide using cooled and hot targets**

M.E. Fisher, V.A. Grudinin

Scientific Supervisor: Ph.D., V.A. Grudinin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: mef4@tpu.ru

**Abstract.** *In this work the influence of the target type on the peculiarities of plasma composition formation during magnetron sputtering of silicon carbide is considered. The plasma composition was determined by optical emission spectroscopy. It is revealed that at magnetron sputtering of hot target the intensity of plasma components increases.*

**Key words:** *silicon carbide, magnetron sputtering, OES-analysis.*

**Введение**

Карбид кремния (SiC) характеризуется уникальным комплексом физико-химических свойств, включая высокую износ- и абразивную стойкость, исключительную механическую прочность и твердость, низкий коэффициент термического расширения, а также устойчивость к окислительным процессам и экстремальным температурным воздействиям. Благодаря указанным свойствам, данный материал находит широкое применение в различных отраслях промышленности и научно-технических разработках [1]. Одним из основных инструментов для получения тонкопленочных покрытий, в том числе и карбида кремния, являются магнетронные распылительные системы. Для таких систем характерны эффективная ионизация газа, высокая плотность плазмы и ионного тока, что увеличивает скорости распыления и осаждения. Метод магнетронного распыления применяется для нанесения пленок различного спектра свойств и применений, включая износостойкие, защитные, оптические, изоляционные и другие типы покрытий [2].

В работе [3] показана возможность сублимации карбида кремния при температурах до 2000 °С, при этом скорость осаждения покрытий может достигать 2 мм/ч (33,3 мкм/мин). Также известно, что при сублимации пары SiC могут распадаться на Si, Si<sub>2</sub>C и SiC<sub>2</sub>. Однако не были изучены возможность магнетронного распыления теплоизолированной (горячей) мишени, как было показано на примере хрома [4] и титана [5], и влияние нагрева мишени на состав плазмы. Таким образом, целью работы является сравнительный анализ состава плазмы при помощи метода оптической эмиссионной спектроскопии в зависимости от типа мишени (охлаждаемая или горячая).

**Экспериментальная часть**

Оптико-эмиссионный анализ проводился с помощью спектрометра Avantes AvaSpec ULS2048L-2-USB2 в оптическом диапазоне 220-925 нм на установке магнетронного распыления, описанной в работе [4]. Использовались мишени карбида кремния двух типов: охлаждаемая (99,5 % масс.  $\varnothing = 70$  мм, толщина 6 мм на медной подложке толщиной 2 мм)

и горячая (99,5 % масс.  $\varnothing = 90$  мм, толщина 8 мм). Остаточное давление в камере –  $5 \cdot 10^{-3}$  Па, аргон (99,998 %) вводился в камеру со скоростью 15 см<sup>3</sup>/мин, рабочее давление – 0,12 Па. Идентификация спектров осуществлялась с помощью базы данных NIST Atomic Spectra Database Lines Data (ver. 5.12) [6].

## Результаты

В целях изучения элементного состава разряда и влияния на него величины подаваемой на магнетронную распылительную систему мощности оптические спектры фиксировались при различных плотностях мощности: для охлаждаемой мишени – 2,6–20,8 Вт/см<sup>2</sup>, для горячей мишени – 2,5–23,4 Вт/см<sup>2</sup>. На рис. 1 представлены обзорные спектры оптической эмиссии разрядов, которые были получены для плотностей мощности, равных 13,0 Вт/см<sup>2</sup> и 12,9 Вт/см<sup>2</sup> для охлаждаемой и горячей мишеней соответственно.

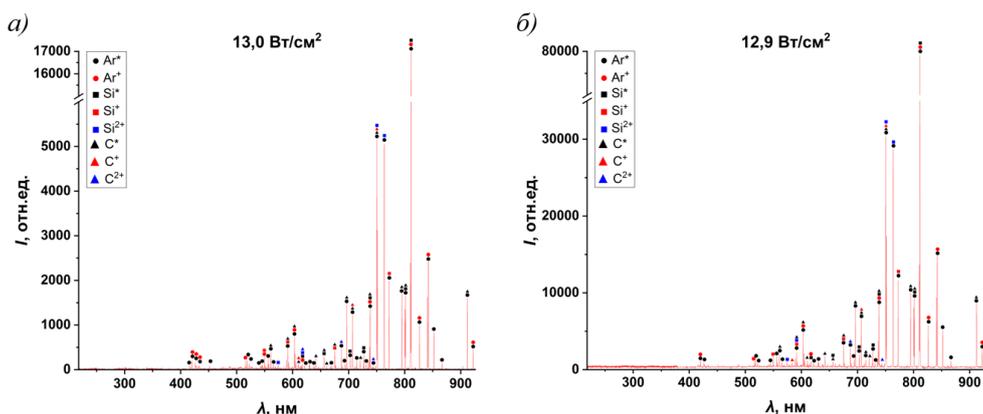


Рис. 1. Обзорные спектры оптической эмиссии разрядов при магнетронном распылении охлаждаемой (а) и горячей (б) мишени

В составе плазмы наблюдаются возбужденные атомы ( $X^*$ ), ионы ( $X^+$ ) и двухзарядные ионы ( $X^{2+}$ ) аргона, кремния и углерода ( $Ar^*$ ,  $Ar^+$ ,  $Si^*$ ,  $Si^+$ ,  $Si^{2+}$ ,  $C^*$ ,  $C^+$ ,  $C^{2+}$ ). Также из спектров видно, что для горячей мишени характерны интенсивности спектральных линий компонентов плазмы, превышающие соответствующие значения для холодной мишени в несколько раз. При этом по мере увеличения плотности мощности это соотношение уменьшается.

По полученным спектрам были рассчитаны интегральные интенсивности следующим образом:

$$I_{int}(A) = \sum_{i=0}^n I_i(A),$$

где  $A$  – компонент плазмы,  $i$  – спектральная линия компонента плазмы. Графики их зависимости от плотности мощности для каждого компонента представлены на рис. 2 и 3.

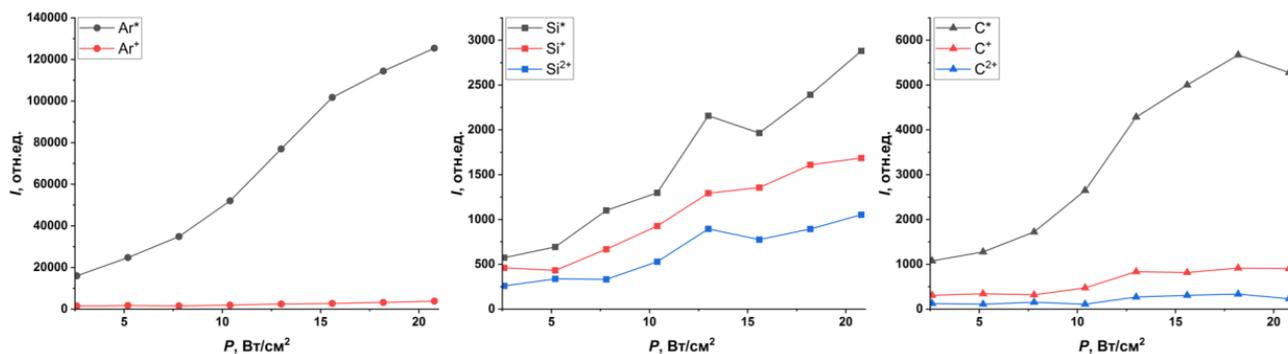


Рис. 2. Зависимость интегральных интенсивностей компонентов плазмы от плотности мощности при магнетронном распылении охлаждаемой мишени

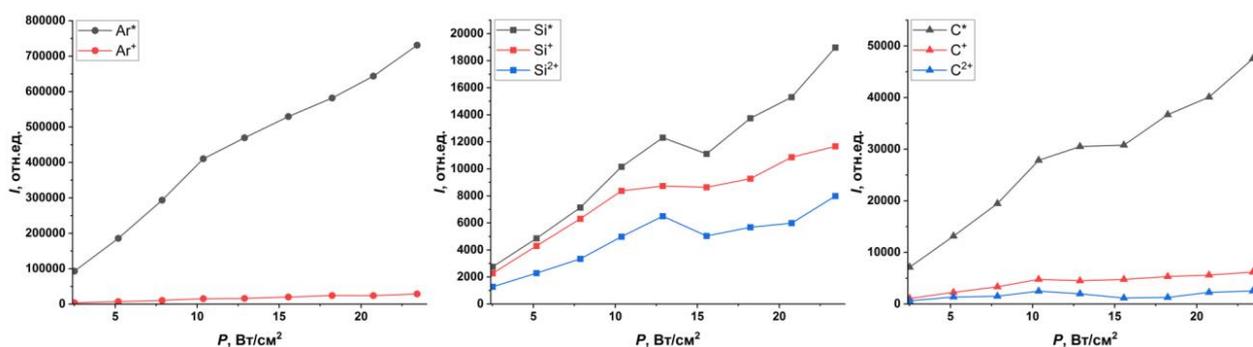


Рис. 3. Зависимость интегральных интенсивностей компонентов плазмы от плотности мощности при магнетронном распылении горячей мишени

Исходя из полученных данных, основным компонентом плазмы является аргон в возбужденном состоянии. Было отмечено, что интегральные интенсивности для углерода больше, чем для кремния, при этом большие расхождения наблюдаются именно для возбужденных состояний элементов. Однако для кремния значение энергии ионизации ниже, чем для углерода ( $E_{ion}(Si^*) = 8,15$  эВ,  $E_{ion}(C^*) = 11,26$  эВ) [6], а его коэффициент распыления больше. Таким образом, такое поведение может быть обосновано значительным нагревом горячей мишени (более  $700^{\circ}C$ ) по сравнению с охлаждаемой мишенью.

### Заключение

В результате работы показано влияние типа мишени на состав плазмы при магнетронном распылении карбида кремния. Также выявлено, что вне зависимости от коэффициента распыления наблюдается соотношение интенсивностей излучения возбужденных атомов углерода и кремния, варьирующееся от 1,8 до 2,5 для охлаждаемой мишени и от 2,5 до 2,8 для горячей мишени во всем диапазоне исследованных значений плотности мощности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00105. <https://rscf.ru/project/24-79-00105/>

### Список литературы

1. Sangsuwan P., Orejas J.A., Gatica J.E., Tewari S.N., Singh N. Reaction-bonded silicon carbide by reactive infiltration // Industrial & engineering chemistry research. – 2001. – Vol. 40, № 23. – P. 5191.
2. Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. – Москва : Техносфера, 2012. – 464 с.
3. Syväjärvi M., Yakimova R., Tuominen M., Kakanakova-Georgieva A., MacMillan M.F., Henry A., Janzén E. Growth of 6H and 4H-SiC by sublimation epitaxy // Journal of Crystal Growth. – 1999. – Vol. 197, № 1–2. – P. 155–162.
4. Сиделёв Д.В. Осаждение покрытий из хрома и никеля с помощью магнетронного диода с "горячей" мишенью: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.04.07 : защищена 05.12.2018; утв. 11.04.2019. – Томск, 2018. – 138 с.
5. Billard A. and all. Influence of the target temperature on a reactive sputtering process // Surface and Coatings Technology. – 1999. – Vol. 116–119. – P. 721–726.
6. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.12) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://physics.nist.gov/asd> (Дата обращения 17.02.2025).