

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ

В.А.Карачинов, Д.В.Карачинов, М.В.Казакова, В.А.Манухин, Д.А.Бондарев

INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE FIELDS OF CARBIDE-BASED EMITTING STRUCTURES BY THE TELEVISION METHOD

V.A.Karachinov, D.V.Karachinov, M.V.Kazakova, V.A.Manukhin, D.A.Bondarev

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Polnovo @ yandex.ru

В интервале температур 800÷1300°C методом телевизионной пирометрии исследована морфология тепловых полей полипрофильных SiC и MoSi₂ — излучающих структур, погруженных в раскаленный газовый поток. Обработка в рамках метода полевых характеристик яркостного телевизионного контраста исследованных излучающих структур с плоскими поверхностями не выявила значительного влияния формы излучающей площадки на морфологию температурного поля. Экспериментально установлено, что морфология температурного поля излучающей площадки SiC-структуры с лункой повторяет ее геометрическую форму.

Ключевые слова: телевизионный метод, пирометрия, карбид кремния, дисилицид молибдена, профиль, температурное поле, морфология, структура

In the temperature range of 800÷1300°C using the method of television pyrometry, we studied the morphology of temperature fields of poly-profiled emitting structures SiC and MoSi₂ immersed in the hot gas stream. Processing the television luminance contrast of investigated emitting structures with flat surfaces by the method of field characteristics did not find a significant influence of the shape of emitting pad on the temperature field morphology. It was established experimentally that the morphology of temperature field of the SiC-structure emitting pad with a hole follows its geometric shape.

Keywords: television method, pyrometry, silicon carbide, molybdenum disilicide, profile, temperature field, morphology, structure

Введение

Тонкие, оптически прозрачные пластинки, изготовленные из полупроводниковых или диэлектрических материалов и выполняющие роль датчиков в методах оптической интерферометрии, представляют традиционный интерес для решения задач, связанных с регистрацией полей тепловых потоков при исследовании газовых разрядов (плазмы), процессов горения, а также при диагностике различных технических систем [1,2]. В то же время в телевизионной пирометрии особую актуальность приобретают гетерогенные системы на основе карбида кремния (SiC) как типичного представителя тугоплавких полупроводников, обладающих оптической прозрачностью и набором уникальных физико-химических свойств, благодаря которым, например в рамках эрозионных технологий, стало возможно создание различных источников оптического излучения, элементов геометрической оптики, включая активные входные окна и микроперфорированные (газопроницаемые) зеркала и др. [3-6]. Стремление расширить возможную высокотемпературную область применения подобных непланарных структур на основе SiC, адаптированных к условиям эксплуатации и измерениям, вызывает интерес исследователей к изучению влияния новых сочетаний в профильном исполнении на морфологию температурных полей в них.

Вопросам разработки телевизионной методики экспериментального исследования морфологии тепловых полей полипрофильных SiC-структур и посвящена данная работа.

Методика исследований

Излучающие полипрофильные структуры (рис.1а) изготавливались из монокристаллического карбида кремния методами эрозионного профилирования (электроэрозия в жидком диэлектрике и лучевая эрозия-лазер) [7]. Использовались кристаллы политипа 6Н с базовыми гранями (000)1, толщиной ~450 мкм, легированные азотом с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = (1\div3) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, и без видимых макродефектов. После операции резки проводились химическое травление зондов в расплаве КОН при температуре $T = 600^\circ\text{C}$ и последующая установка их на цилиндрические держатели из поликристаллического SiC с помощью высокотемпературного клея. Для сравнения по аналогичной технологии были также изготовлены структуры из известного тугоплавкого материала, дисилицида молибдена (MoSi₂) [8].

Экспериментальные исследования выполнялись в интервале температур 800÷1300°C на лабораторном стенде, состоявшем из системы газовой форсунки (пропан), двухкоординатного позиционера, эталонного теплоприемника — термopара ТХА (хромель-алюмель) с предельно допустимой температурой 1300°C. Расход (скорость) пропана в газовой магистрали регулировался ротаметром РМ-А-0.0631. Термо-ЭДС измерялась с помощью цифрового вольтметра (МУ-63). Визуально с помощью позиционера в области зоны восстановления или факела газового пламени выбиралось рабочее сечение с равномерным яркостным контрастом, в которое погружались тестовые структуры. Это позволило достаточно надежно смоделировать условия изотермичности газового потока.

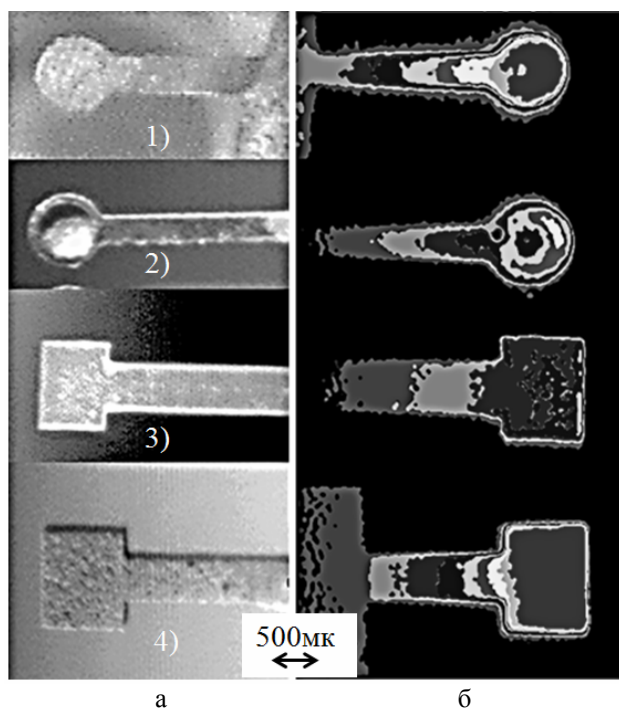


Рис.1. Телевизионное изображение (а) и морфология температурного поля полипрофильных SiC и MoSi₂-структур (б). Пример. Эксперимент: Фото. $T = 1300^{\circ}\text{C}$, средняя скорость газового потока 0,5 м/с. ПО «Парус-К». Режим термограмм. (1,2,3 — SiC-структуры; 4 — MoSi₂-структура)

Для получения изображения тестовых структур, находящихся в пламени, и измерения их температуры применялся телевизионный монохроматический пирометр яркостного типа (эффективная длина волны $\lambda_0 = 0,6 \dots 0,72$ мкм), система электронного управления ФПЗС которого позволяла визуализировать структуры с различной яркостной температурой в условиях неработающей АРУ. Процесс калибровки пирометра и измерения температуры поверхности зонда осуществлялся по известной методике с помощью ПЭВМ (программа «Парус-К») [3].

Результаты исследований и их обсуждение

Применение метода полевых характеристик [9] в рамках проведенных исследований, позволило получить количественные характеристики теплового состояния тестовых структур по регистрируемому их пирометрическому яркостному контрасту (изображению). Типичные примеры результатов исследования приведены на рис.1,2.

Так, обработка изображений в режиме термограмм (рис.1а) для структур в целом не выявила значительного влияния формы излучающей площадки на морфологию температурного поля. На приведенных фотографиях поверхности круглой (1) и прямоугольной (3) излучающих SiC-площадок, а также прямоугольной (4) MoSi₂-площадки с учетом погрешности метода измерений (5-6% [9]) можно считать изотермическими. Следует отметить, что влияние материала тестовой структуры проявлялось в экспериментах на стадии формирования телевизионного яркостного контраста. Как и следовало ожидать, наибольшей яркостью при одинаковой температуре обладали

MoSi₂-структуры по сравнению с карбидкремниевыми. Прежде всего, это связано с тем, что коэффициент излучения дисилицида молибдена на данной длине волны измерения в исследуемом диапазоне температур значительно больше по сравнению с карбидом кремния (соответственно: 0,75...0,79 и 0,5...0,68 [8]). Кроме того, как известно, дисилицид молибдена принадлежит к классу оптически непрозрачных материалов, а карбид кремния — к классу частично прозрачных материалов, излучательная способность которых в видимом диапазоне длин волн, например, за счет процессов переотражения оказывается хуже [10].

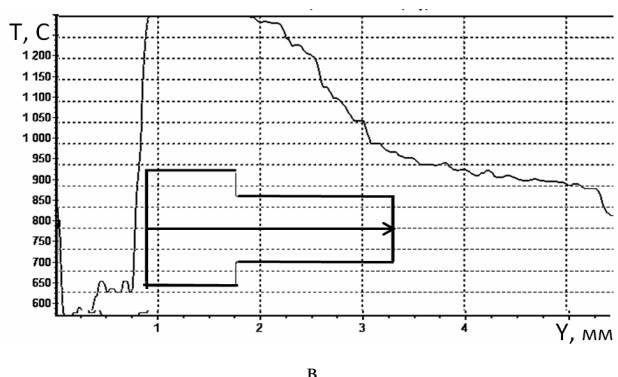
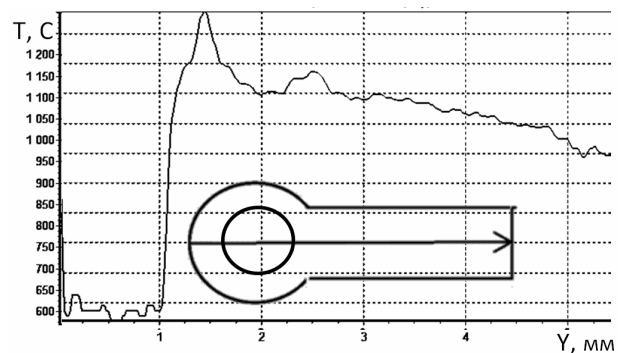
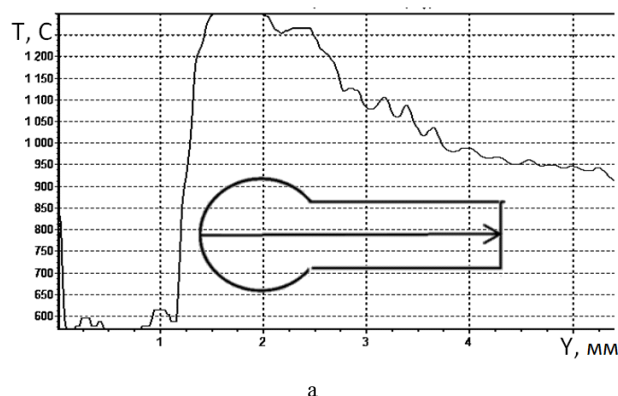


Рис.2. Продольные температурные срезы (вдоль оси Y) полипрофильных SiC-излучающих структур. Пример. Эксперимент: $T = 1300^{\circ}\text{C}$, средняя скорость газового потока — 0,5 м/с. ПО «Парус-К». Режим выделенного контура

Впервые метод полевых характеристик в режиме термограмм также обеспечил визуализацию морфологии температурного поля SiC — тестовой структуры с лункой в форме параболоида вращения. Как видно из рис.1б, полученная морфология облада-

ет определенной особенностью — структура изоповерхностей в пределах проекции изображения повторяет геометрическую форму излучающей площадки (кольцо — круг). При этом значение яркостной температуры ($T_y = 1150^\circ\text{C}$) изотермической поверхности дна лунки (круг) оказывается ниже температуры верхней поверхности в виде кольца не менее чем на 50°C .

Детализация выявленных на термограммах морфологических особенностей температурного поля была выполнена методом выделенных контуров [9]. На рис.2 приведены результаты визуализации продольных температурных срезов (вдоль оси Y) исследованных тестовых структур. Анализ полученных результатов показал, что наблюдается соответствие в характере распределения температур и яркостного контраста изображений структур. На графиках присутствуют области максимальных значений яркостных температур ($T_y \approx 1300^\circ\text{C}$) пламени, которые контролировались термопарными измерениями. Наблюдаемый неравномерный характер (всплески) температур, особенно по краям структур, следует связывать с особенностями формирования яркостного контраста, например, технологическими загрязнениями, фоновыми засветками и др. В целом, аналогичный характер распределения температур в исследованных структурах сохранялся в пределах всего отмеченного диапазона температур газового потока.

Выводы

Разработанная телевизионная методика позволяет в условиях высоких температур газового потока формировать яркостной контраст полипрофильных излучающих структур, пригодный для анализа. Обработка в рамках метода полевых характеристик яркостного контраста излучающих SiC- и MoSi₂-структур с плоскими поверхностями не выявила значительного влияния формы излучающей площадки на морфологию температурного поля. Морфология температурного поля излучающей площадки SiC-структуры с лункой повторяет ее геометрическую форму.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грант РФФИ 16-47-530820 p_север_а.

1. Голубев М.П., Павлов А.А., Павлов Ал.А., Шиплюк А.Н. Оптический метод регистрации тепловых потоков // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т.44. №4. С.174-184.
2. Магунов А.Н. Теплообмен неравновесной плазмы с поверхностью. М.: Физматлит, 2005. 312 с.
3. Карачинов В.А., Ильин С.В., Карачинов Д.В. Пирометрические зонды на основе карбида кремния // Письма в ЖТФ. 2005. Т.31. Вып.11. С.1-4.

4. Патент РФ на изобретение 2486559 РФ, МКИ G03B11/04. Защитная блenda для оптических приборов / В.А.Карачинов, Д.В.Карачинов, А.В.Петров. Заявл. 07.11.2011. Оpubл. 27.06.2013. Бюл. 18.
5. Karachinov V.A., Kazakova M.V., Karachinov D.V. A Television Endoscopic System with a Heat Resistant Silicon Carbide Mirror // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Vol.57. №3. P.336-339.
6. Riza N.A. Hybrid Optical Sensor for Extreme Temperature Measurement in Next Generation Higher Efficiency Greener Power Plants // AMA Conferences. Nuremberg, Germany, 19-21 May. 2015. P.511-513.
7. Патент 2189664 РФ, МКИ⁷ H01L 21/461. Способ эрозионного копирования карбидокремниевых структур / В.А.Карачинов. Заявл. 24.07.2000. Оpubл. 20.09.2002. Бюл.26.
8. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976. 560 с.
9. Карачинов В.А. Карачинов Д.В., Ильин С.В. Методы телевизионной термометрии гетерогенных систем. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012. 298 с.
10. McMahon H.O. Thermal radiation from partially transparent reflecting bodies // J. Optical Soc. of America. 1950. Vol.40. №6. P.376-380.

References

1. Golubev M.P., Pavlov A.A., Pavlov Al.A., Shipluk A.N. Opticheskii metod registratsii teplovykh potokov [Optical method for heat-flow registration]. Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2003, vol. 44, no. 4, pp. 596-604.
2. Magunov A.N. Teploobmen neravnovesnoi plazmy s poverkhnost'iu [Heat exchange between non-equilibrium plasma and the surface]. Moscow, "Fizmatlit" Publ., 2005. 312 p.
3. Karachinov V.A., Il'in S.V., Karachinov D.V. Pirometricheskie zondy na osnove karbida kremniia [Pyrometric probes based on silicon carbide crystals]. Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics Letters, 2005, vol. 31, no. 6, pp. 449-450.
4. Karachinov V.A. Karachinov D.V., Petrov A.V. Zashchitnaia blenda dlia opticheskikh priborov [Protective blind for optical devices]. Patent RF, no. 2397523, 2013.
5. Karachinov V.A., Kazakova M.V., Karachinov D.V. A television endoscopic system with a heat resistant silicon carbide mirror. Instruments and Experimental Techniques, 2014, vol. 57, no. 3, pp. 336-339.
6. Riza N.A. Hybrid optical sensor for extreme temperature measurement in next generation higher efficiency greener power plants. Proc. AMA Conf. Nuremberg, 2015, pp. 511-513.
7. Karachinov V.A. Sposob erozionnogo kopirovaniia karbidokremnievykh struktur [Method of erosion copying of silicon carbide structures]. Patent RF, no. 2189664, 2002.
8. Samsonov G.V., Vinitskii I.M. Tugoplavkie soedineniia [Refractory compounds]. Moscow, "Metallurgiiia" Publ., 1976. 560 p.
9. Karachinov V.A. Karachinov D.V., Il'in S.V. Metody televizionnoi termometrii geterogennykh sistem [The methods of television thermometry of heterogeneous systems]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 298 p.
10. McMahon H.O. Thermal radiation from partially transparent reflecting bodies. Journal of the Optical Society of America, 1950, vol. 40, no. 6, pp. 376-380.