

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ МИКРОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИТИПНОГО СОЕДИНЕНИЯ

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

VISUALISATION OF THE TEMPERATURE FIELD CHARACTERISTICS OF RADIANT HETEROGENEOUS MICROSYSTEM BASED ON POLYTYPIC COMPOUND

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

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

На основе монокристаллического карбида кремния политипа 6H<N> эрозионными методами создана излучающая гетерогенная микросистема, содержащая статическую неоднородность в виде сквозного микроотверстия. С использованием предложенного коэффициента изотермичности проанализированы возможности ограничения кондуктивных связей микросистем такого типа. В интервале температур 800÷1300°C экспериментальными методами телевизионной пирометрии, включающими как полное, так и частичное погружение микросистемы в газовое пламя, исследованы особенности морфологии образующегося в конструкции температурного поля.

Ключевые слова: микросистема, карбид кремния, политип, коэффициент изотермичности, эксперимент, диффузионное пламя, телевизионная пирометрия, температурное поле, морфология

On the basis of monocrystalline silicon carbide polytype 6H<N>, using erosion methods, we designed a radiant heterogeneous microsystem that contains the static heterogeneity in the form of a pinhole. Using the proposed coefficient of isothermality, we analyzed the possibility of limiting conductive connections of the microsystems of this type. In the temperature range of 800÷1300°C, using experimental methods of television pyrometry, including both full and partial immersion of the microsystem in gas flame, we investigated the peculiarities of morphology of the temperature field formed in the structure.

Keywords: microsystem, silicon carbide, polytype, coefficient of isothermality, experiment, diffusion flame, television pyrometry, temperature field, morphology

Введение

В телевизионно-пирометрических исследованиях характеристик диффузионного пламени наряду с известным методом пирометрии тонкой проволоочки (TFP — thin filament pyrometry, англ.) определенный интерес представляет метод регулярных оптических меток (MROL — method regular optical labels, англ.), позволяющий измерять фактически мгновенное распределение температур в выделенном сечении раскаленного газового потока [1,2]. В этом методе в качестве меток применяются SiC-зонды (микроизлучатели), конструкция которых адаптирована к условиям эксплуатации и технологии измерения по видеоизображению. Известно, что измерение температуры поверхности любого материала, включая и карбид кремния по регистрируемому через раскаленный слой газа (плазмы) яркостному контрасту представляет специфическую задачу [3-5]. Совершенно очевидно, что возникающая методическая погрешность, характерная для всех зондовых методов измерения температуры, в этом методе обусловлена сильной кондуктивной связью между излучающей площадкой SiC-зонда и держателем и, как следствие, невысокая степень изотермичности излучающей поверхности (неравномерное температурное поле), подлежащей регистрации. В данном сообщении приводятся результаты исследований, направленных на разработку метода, позволяющего улучшить характеристики измерительных микросистем на основе карбида кремния.

Методика исследований

Тестовые микросистемы изготавливались из монокристаллического карбида кремния методами эрозионного профилирования (электроэрозия в жидком диэлектрике и лучевая эрозия-лазер) [6]. Использовались кристаллы политипа 6H 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.

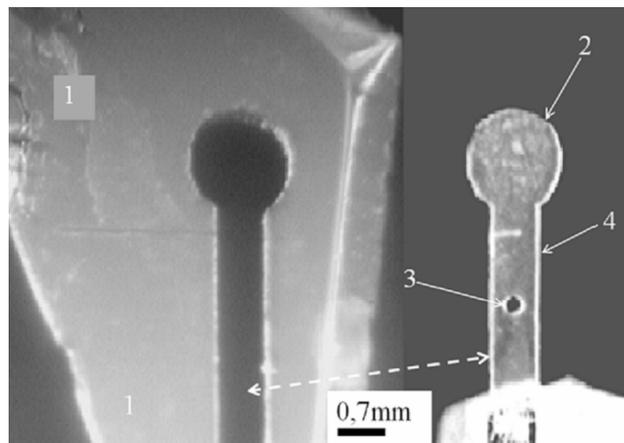


Рис.1. Конструкция тестовой микросистемы из карбида кремния с ограничением кондуктивной связи. Внешний вид. Фото

После операции резки проводились химическое травление структур в расплаве КОН при темпе-

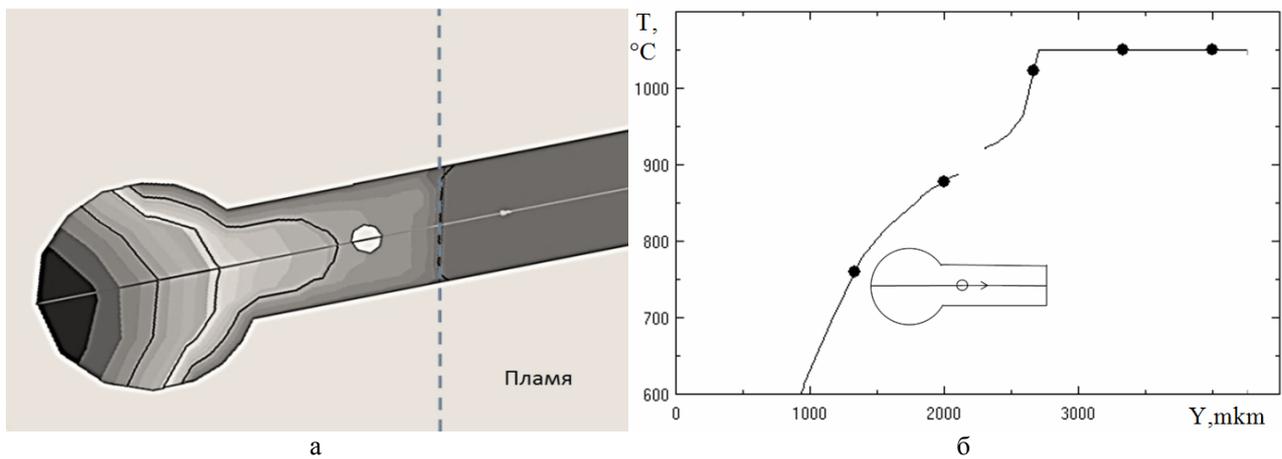


Рис.2. Моделирование морфологии температурного поля микросистемы. Частичное погружение в пламя. Пример: температура пламени $T_{\text{макс}} = 1050^{\circ}\text{C}$, время нагрева $t = 50$ с. а — режим изолиний; б — одномерное температурное поле вдоль выделенного контура

ратуре $T = 600^{\circ}\text{C}$ и последующая установка их на цилиндрические держатели из поликристаллического SiC с помощью высокотемпературного клея. Конструкция микросистемы показана на рис.1, где 1 — исходный кристалл (6H-политип); 2 — излучающая площадка; 3 — отверстие (ограничитель кондуктивной связи); 4 — ножка.

Экспериментальные исследования выполнялись в интервале температур $800 \div 1300^{\circ}\text{C}$ на лабораторном стенде, который состоял из системы газовой форсунки (пропан), двухкоординатного позиционера для погружения пирометрического зонда в пламя, эталонного теплоприемника (термопара ТХА (хромель-алюмель) с предельно допустимой температурой $T = 1300^{\circ}\text{C}$. ТермоЭДС измерялась с помощью цифрового вольтметра (МУ-63). Для получения изображения пирометрического зонда и измерения его температуры применялся телевизионный монохроматический пирометр яркостного типа (эффективная длина волны $\lambda_{\text{э}} = 0,6 \dots 0,72$ мкм), система электронного управления ФПЗС которого позволяла визуализировать области поверхности микросистемы с различной яркостной температурой в условиях неработающей автоматической регулировки усиления (АРУ). Процесс калибровки пирометра и измерения температуры поверхности микросистемы осуществлялся с помощью ПЭВМ (программа «Парус-К») [7]. Моделирование морфологии температурного поля осуществлялось методом полевых характеристик в среде «ELCUT» [8].

Результаты исследований и их обсуждение

Важным элементом конструкции микросистемы, оказывающим существенное влияние на тепловой режим излучающей площадки, является ножка-держатель. Фактически она является замыкающим звеном в цепи кондуктивной связи между излучающей площадкой и окружающей средой, значение температуры которой чаще всего оказывается существенно ниже температуры измеряемого газового потока.

Возникающая при этом разность температур способствует отводу тепла и вследствие этого температура излучающей площадки отличается от действительной температуры газа, т.е. возникает методическая погрешность. Рассмотренная кондуктивная связь также усиливает неравномерность температурного поля излучающей площадки, что негативно сказывается на самой методике телевизионных измерений, когда, например, маркер (виртуальный датчик температуры) может попадать в области с недоверенным значением температуры. Из известных в технике и технологии способов ограничения влияния кондукции, с учетом особенностей конструкции микросистемы и нелинейности теплофизических характеристик карбида кремния, нами был предложен метод создания статических неоднородностей, обладающих низким значением коэффициента теплопроводности [9,10]. Его техническая реализация осуществлялась путем изготовления в ножке-держателе сквозного микроотверстия (рис.1). Поэтому естественный интерес представляют сведения о структуре телевизи-

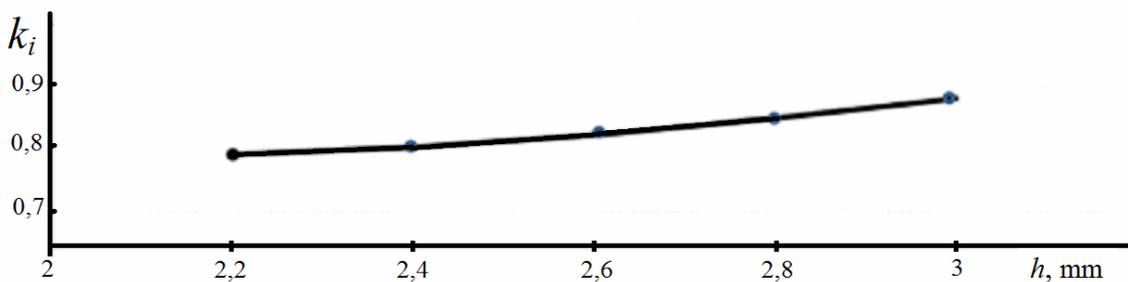


Рис.3. Влияние положения отверстия (h) на коэффициент изотермичности. Расчет

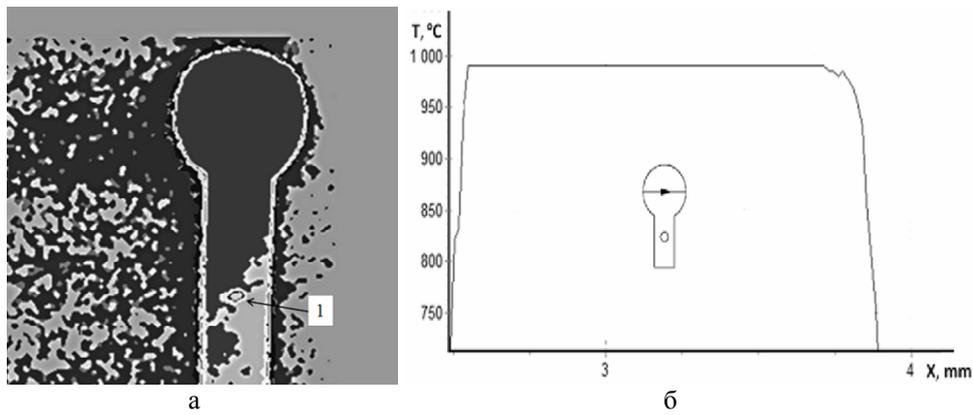


Рис.4. Морфология температурного поля микросистемы. Полное погружение в пламя. Эксперимент. Пример. ПО «Парус-К». а — режим термографии, фото; б — одномерное температурное поле вдоль выделенного контура

онного яркостного контраста такого типа микросистемы и морфологии температурного поля при высоких температурах.

Предварительные исследования температурного поля, проведенные численными методами в среде «ELCUT», позволили проанализировать особенности его морфологии в зависимости от размеров, формы и местоположения отверстия (рис.2). В качестве количественной оценки степени влияния отмеченных факторов был предложен коэффициент изотермичности излучающей площадки ($k_i = S_i/S_j$). В этом выражении соответственно: S_i — площадь излучающей площадки, которая имеет температуру измеряемого потока, а S_j — площадь излучающей площадки, ограниченная габаритными размерами.

Результаты моделирования, направленные в том числе, и на поиск $0,1 \div 0,4$ мм, с учетом погрешности измерения S_i , наблюдается линейный характер роста коэффициента изотермичности. А величина смещения центра отверстия от основания ножки держателя к излучающей площадке (h) также способствует его увеличению. Пример влияния положения круглого отверстия диаметром $D = 200$ мкм при продольном обдуве зонда на коэффициент изотермичности показан на рис.3. Наряду с этими фактами необходимо отметить, что при заданных геометрических размерах чаще всего механическая прочность зонда, как лимитирующий критерий, формирует необходимость поиска оптимальных значений геометрических характеристик вводимого отверстия.

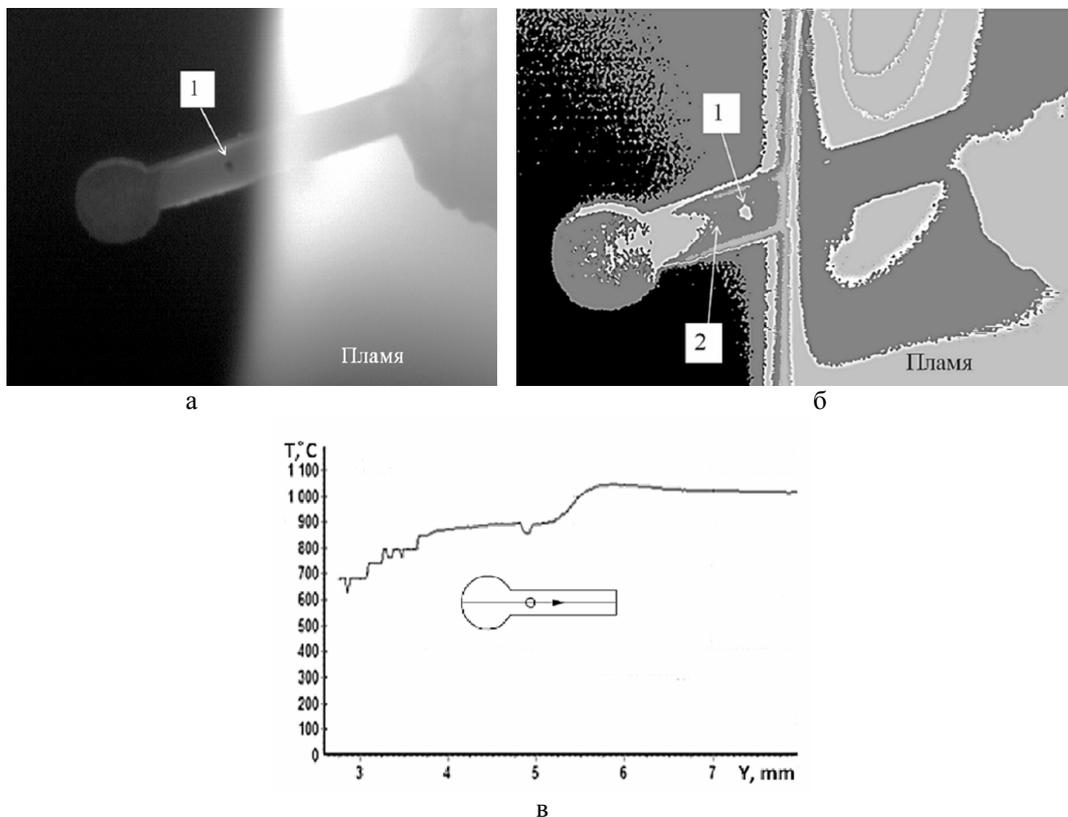


Рис.5. Морфология температурного поля микросистемы. Частичное погружение в пламя. Эксперимент. Пример. ПО «Парус-К». а — телевизионный яркостной контраст, фото; б — режим термографии, фото; в — одномерное температурное поле вдоль выделенного контура

Экспериментальные исследования морфологии температурного поля проводились как при полном (рис.4), так и при частичном (рис.5) погружении микросистемы в газовое пламя форсунки. Так, при полном погружении в область зоны восстановления с относительно равномерным свечением газового потока, на термограммах (рис.4а) визуализировалась морфология, характеризующаяся равномерным контрастом. Такая структура наблюдалась не только в пределах излучающей площадки, но и в большей части поверхности ножки до границы микроотверстия. Количественные оценки образующегося температурного поля, выполненные по методу выделенных контуров (рис.4б) в трех поперечных сечениях излучающей площадки, показали предельное значение коэффициента изотермичности ($k_i \rightarrow 1$).

Регистрация телевизионного яркостного контраста (рис.5а) и визуализация морфологии температурного поля (рис.5б) при частичном погружении микросистемы, когда излучающая площадка и часть ножки с микроотверстием (1) находились за границей раскаленного газового потока или внутри него, вызывало формирование в области ножки характерного седлообразного фрагмента (2). Необходимо отметить, что детализация выявленных морфологических особенностей достаточно хорошо визуализировалась продольным температурным срезом (рис.5в). Присутствие в микроотверстии (ножке) локализованного дефекта в виде сквозного отверстия, заполненного газом с малым значением коэффициента температуропроводности (например, для воздуха при $T = 1000\text{C}$, $\alpha \approx 245,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [9]) с позиций теплопереноса эквивалентно образованию адиабатной области, которая задерживает продвижение теплового потока и прогревается значительно медленнее по сравнению с окружающим слоем материала микросистемы, способствуя образованию данного фрагмента [11].

Выводы

Создание в конструкции SiC-микросистемы статической неоднородности в виде микроотверстия ограничивает кондуктивную связь излучающей площадки с окружающей средой и увеличивает ее степень изотермичности, способствуя снижению величины методической погрешности измерения температуры.

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

1. William M. Pitts. Thin filament pyrometry in flickering laminar diffusion flames // XXIV Symp. (Int.) on Combustion. The Combustion Institute. 1996. P.1171.
2. Патент РФ на изобретение №2466362 МПК G01J 5/28. Способ измерения пространственного распределения температуры газа / В.А.Карачинов, Д.В.Карачинов. Заявл. 29.12.2010. Оpubл. 10.11.2012. Бюл.19.

3. Чернин С.М., Коган А.В. Измерение температуры малых тел пирометрами излучения. М.: Энергия, 1980. 95с.
4. 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.
5. Магунов А.Н. Теплообмен неравновесной плазмы с поверхностью. М.: Физматлит, 2005. 312 с.
6. Патент № 2573622 РФ, МКИ7 H01L 21/461. Способ эрозионного копирования карбидокремниевых структур РФ№.20114148025/28 / В.А.Карачинов, Д.А.Бондарев. Заявл. 27.11.2014. Оpubл. 20.01.2016. Бюл.2.
7. 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.
8. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: Руководство пользователя. Версия 5.8. СПб: НПК «Тор», 2010. 345 с.
9. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
10. Патент №2466361 РФ. Класс МПК G01J 5/00. Микроизлучатель / В.А.Карачинов, Д.В.Карачинов Заявл 24.06.2011. Оpubл. 10.11.2012. Бюл.31.
11. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1969. 362 с.

References

1. William M. Pitts. Thin filament pyrometry in flickering laminar diffusion flames. 24th Int. Symp. on Combustion. The Combustion Institute, 1996, p. 1171-1179.
2. Karachinov V.A. Karachinov D.V. Sposob izmereniia prostanstvennogo raspredeleniia temperatury [Method of measuring spatial distribution gas temperature]. Patent RF, no. 2466362, 2012.
3. Chernin S.M., Kogan A.V. Izmerenie temperatury malykh tel pirometrami izlucheniia [Measurement of small bodies' temperature by radiation pyrometry]. Moscow, "Energiia" Publ., 1980. 95 p.
4. Golubev M.P., Pavlov A.A., Pavlov Al.A., Shipluk A.N. Opticheskiy metod registratsii teplovykh potokov [Optical method for heat-flow registration]. Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2003, vol. 44, no. 4, pp. 596-604.
5. Magunov A.N. Teploobmen neravnovesnoi plazmy s poverkhnost'iu [Heat exchange between non-equilibrium plasma and the surface]. Moscow, "Fizmatlit" Publ., 2005. 312 p.
6. Karachinov V.A., Bondarev D.A. Sposob erozionnogo kopirovaniia karbidokremnievykh struktur [Method of erosion copying of silicon carbide structures]. Patent RF no. 2573622, 2016.
7. 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.
8. ELCUT. Modelirovanie dvumernykh polei metodom konechnykh elementov. Rukovodstvo pol'zovatel'ia [ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by finite element method. User manual]. Saint Petersburg, Production Cooperative "Tor". Russia. 1989 - 2006.
9. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat transfer]. Moscow, "Energoizdat" Publ., 1981. 416 p.
10. Karachinov V.A., Karachinov D.V. Mikroizluchatel' [Micro Transmitter]. Patent RF no. 2466361, 2012.
11. Carslaw H., Jaeger J. Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press, USA, 1959. 510 p. (Russ. ed.: Karlsru G., Eger D. Teploprovodnost' tverdykh tel. Moscow, "Nauka" Publ., 1969. 362 p.).