

К. ф.-м. н. А. В. ЛОПИН, к. ф.-м. н. А. В. СЕМЁНОВ,
д. ф.-м. н. В. М. ПУЗИКОВ

Украина, г. Харьков, Институт монокристаллов
E-mail: semenov@isc.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
12.03 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ SiC

На основе нанокристаллических пленок кубического поли типа карбида кремния, полученных прямым ионным осаждением на подложке из лейкосапфира, разработан интерференционный датчик температуры.

В связи с бурным развитием автоматизированных систем контроля и управления и переходом к гибким автоматизированным производствам стремительно растет потребность в надежных датчиках различных физических величин, в частности, датчиков температуры с широким диапазоном измерений. Помимо высоких метрологических характеристик, датчики должны обладать высокой стабильностью и надежностью. Этим требованиям максимально удовлетворяют волоконно-оптические датчики температуры [1], основным узлом которых является термочувствительный элемент, определяющий эксплуатационные характеристики датчика.

В работе [2] показано, что наиболее чувствительным и помехозащищенным является метод лазерной интерференционной термометрии прозрачных или полупрозрачных пластин, исполняющих роль эталона Фабри–Перо для зондирующего излучения. Так как при нагревании изменяются показатель преломления и толщина пластинки, текущая температура определяется по изменению фазы волны оптических резонансов либо по изменению контраста интерференционных полос. В работе [3] проведено изучение резонансов эталонов Фабри–Перо, состоящих из стеклянных и кремниевых пластинок. Было показано, что по чувствительности этот метод на 3–4 порядка превосходит другие методы термометрии и имеет довольно широкий диапазон измеряемых температур. При использовании полупроводниковых диодных лазеров и волоконно-оптической линии связи метод достигает высокой надежности при малой массе и объеме датчика. Кроме того, такие системы устойчивы к электромагнитным наводкам, что обеспечивает работу датчика в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения и электромагнитных помех.

Для расширения высокотемпературной границы диапазона измерений необходимо применение более широкозонных и термостойких полупроводников и диэлектриков. В качестве высокотемпературных интерферометров Фабри–Перо могут быть использова-

ны пленки карбида кремния SiC, осажденные на пластины из лейкосапфира (Al_2O_3).

Известно, что SiC имеет по сравнению с кремнием большую ширину запрещенной зоны и более высокую температуру Дебая. Это обеспечивает увеличение области рабочих температур и высокую термическую стабильность материала. Карбид кремния обладает также большой радиационной и химической стойкостью. В то же время высокие температуры традиционных технологий выращивания кристаллических пленок карбида кремния существенно ограничивают возможности его применений в сенсорных устройствах. Выходом из этого положения может быть использование нанокристаллических пленок карбида кремния, температура получения которых значительно ниже. Один из методов получения нанокристаллических пленок SiC (**nc-SiC**) был разработан авторами и описан в [4].

Целью настоящей работы является изучение возможности построения на базе структуры "nc-SiC-пленка/лейкосапфир" волоконно-оптического датчика для измерения температуры в широком диапазоне.

Эксперимент и обсуждение результатов

Для приготовления нанокристаллических пленок из карбида кремния на диэлектрических подложках использован разработанный в Институте монокристаллов НАНУ метод прямого ионного осаждения с плазменным источником ионов, в котором использован катод из карбида кремния. Метод позволяет управлять энергией ионов и температурой подложки и осаждаемые кристаллические пленки карбида кремния с различным политипным составом [5]. Мы использовали nc-SiC-пленки кубической модификации 3C-SiC, осажденные на подложку из полированного лейкосапфира (выращенного также в Институте монокристаллов) при температуре подложки $T_{\text{п}}=930^\circ\text{C}$ и энергии ионов 90 эВ [6].

На **рис. 1** представлены спектры рентгеновской дифракции nc-SiC-пленок толщиной примерно 3 мкм. Тонкие нанокристаллические пленки, осажденные при температурах подложки 850, 890 и 930°C, демонстрировали пики рентгеновской дифракции, соответствующие основным отражениям от плоскостей (111) модификации 3C-SiC (пик при угле $35,5^\circ$) с полуширинами линий 0,72°, 0,6° и 0,5°, соответственно. Наиболее интенсивный рефлекс и, соответственно, наименьшая полуширина были получены для $T_{\text{п}}=930\dots950^\circ\text{C}$.

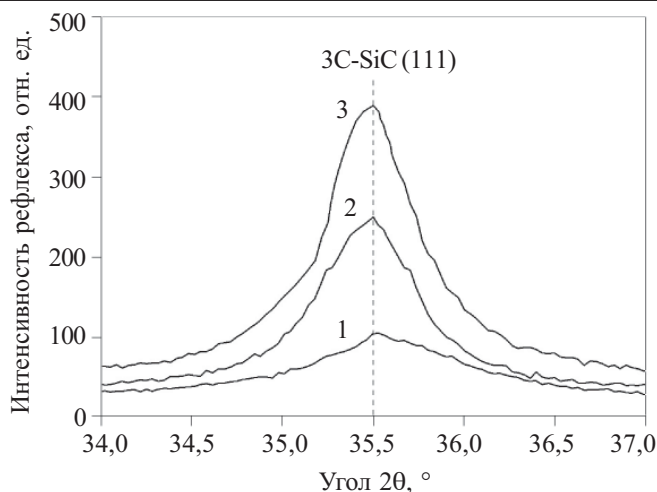


Рис. 1. Рентгеновская дифракция от пленок SiC, полученных при различных температурах подложки:

1 — дифракционная кривая для пленки, осажденной при температуре подложки 850°C; 2 — то же для 890°C; 3 — то же для 930°C

Кроме основных максимумов, имеются довольно слабые пики отражений от плоскостей (220) 3C-SiC, что свидетельствует о возможной текстуре слоев SiC, т. е. плоскости (111) параллельны плоскости подложки. В данных условиях были осаждены nc-SiC-пленки различной толщины на лейкосапфировые подложки.

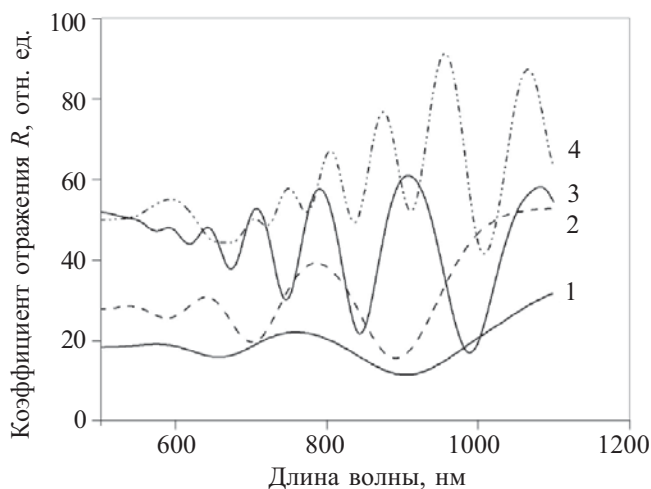


Рис. 2. Спектр отражения от пленок nc-SiC различной толщины L , осажденных при температуре подложки $T_{\text{п}}=930^{\circ}\text{C}$:

1 — $L=0,6$ мкм; 2 — $L=1,4$ мкм; 3 — $L=2$ мкм; 4 — $3,34$ мкм

Оптические свойства осажденных SiC-пленок изучались путем измерений и анализа спектров отражения и пропускания на спектрофотометре Lambda 35 фирмы Perkin Elmer с приставкой отражения при нормальном падении света в спектральном диапазоне 190—1100 нм. На рис. 2 представлены спектры отражения nc-SiC-пленок различной толщины на подложках из лейкосапфира в спектральном диапазоне 500—1100 нм. При толщинах пленки порядка длины волны излучения была получена устойчивая интерференционная картинка. Это свидетельствует, что верхние и нижние поверхности nc-SiC-пленки являются зеркалами интерферометра Фабри–Перо, который схема-

тично изображен на рис. 3. Здесь 1 — спектрометр Lambda 35; 2 — кварцевые световоды; 3 — согласующие линзы; 4 — зеркала плоские; 5 — фильтр, отсекающий ИК-излучение; 6 — фотоприемное устройство; 7 — компьютер; 8 — интерферометр Фабри–Перо; 9 — нагреватель; 10 — термопара для контроля температуры; θ_0 и θ'_0 — углы падения и отражения; θ_1 — угол преломления; n — показатель преломления.

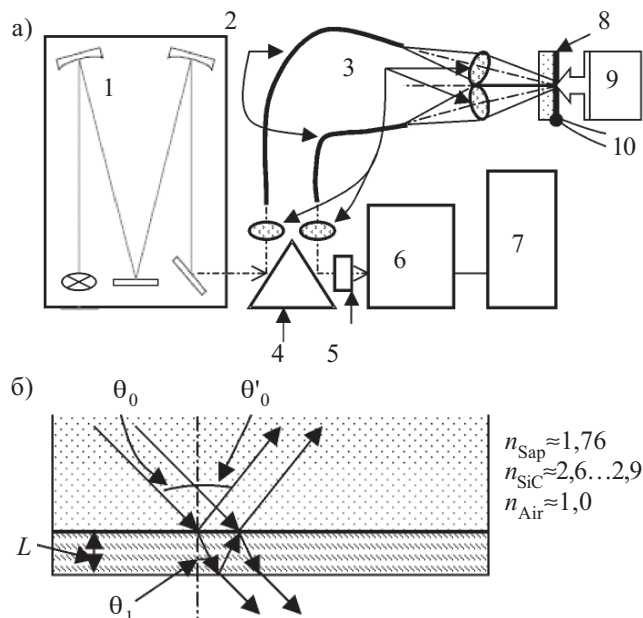


Рис. 3. Схема спектральной оптической системы для измерения температуры с помощью пленочного интерферометра Фабри–Перо, изготовленного из nc-SiC (а), и формирование интерференции в интерферометре Фабри–Перо (б)

Для двух соседних лучей, распространяющихся между зеркалами интерферометра под углом θ , оптическая разность хода волн, зависящая от температуры, определяется соотношением [7]

$$\Delta = 2n(\lambda, T) \cdot L(T) \cdot \cos \theta_i, \quad (1)$$

где $n=f(\lambda, T)$ — показатель преломления пленки SiC, являющийся функцией длины волны света λ и температуры T ;

L — расстояние между зеркалами интерферометра (толщина nc-SiC-пленки), зависящее от температуры;

θ_i — угол преломления светового луча в nc-SiC-пленке.

Оптической разности хода соответствует изменение разности фаз волн:

$$\Delta \Phi = 2\pi \cdot n(\lambda, T) \cdot L(T) / \lambda, \quad (2)$$

где $\theta_i=0$, $\cos \theta_i=1$.

Оптическая волна, отраженная от тонкопленочного nc-SiC-интерферометра Фабри–Перо, весьма чувствительна к возмущениям внешнего физического параметра — изменению температуры среды, которая влияет на оптическую разность хода отраженных световых пучков. Решив обратную задачу по определению изменений оптической разности хода когерентных световых пучков, можно определить изменения температуры интерферометра Фабри–Перо. В работе [7] температурная чувствительность изменения фазы была определена как

$$\Delta\Phi/\Delta T = 2\pi n L \kappa_\phi / \lambda. \quad (3)$$

Здесь $\kappa_\phi = \kappa_n + \kappa_L$; κ_n — термооптический коэффициент SiC-интерферометра, который равен $(1/n) \cdot (\Delta n / \Delta T)$, и $\kappa_L = (1/L) \cdot (\Delta L / \Delta T)$ — температурный коэффициент расширения (ТКР) пленки.

Из формулы (3) видно, что изменение фазы волны от температуры прямо пропорционально толщине и показателю преломления SiC-пленки, а также сумме термооптического коэффициента SiC-пленки и ее температурного коэффициента расширения. Таким образом, увеличение температурной чувствительности изменения фазы можно получить при осаждении более толстых пленок, например микрометровых толщин. Однако мы обнаружили, что при толщинах пс-SiC-пленок, больших чем 2 мкм, возникают искажения интерференционной кривой. Авторы полагают, что причиной этого эффекта могут быть остаточные напряжения в пленке пс-SiC, связанные с различием в температурных коэффициентах расширения SiC-пленки и подложки из Al_2O_3 , и, как следствие, появление оптической неоднородности в структуре, приводящее к размытию или модуляции интерференции. Результаты исследований пленок разной толщины (рис. 2) показывают, что наиболее оптимальными являются толщины от 1,5 до 2 мкм.

Для карбида кремния имеются достаточно надежные данные, касающиеся величин κ_n и κ_L , входящих в формулу (3). В работе [7] было показано, что для пленок SiC хорошо выполняется условие $\kappa_n \gg \kappa_L$. При этом формула (3) может быть преобразована в формулу [7, 8]

$$\Delta\Phi/\Delta T = (2\pi \cdot L / \lambda_m(T_0)) \cdot \{(1/\lambda_m(T_0)) \cdot (\Delta\lambda_m/\Delta T)\}. \quad (4)$$

Здесь $\lambda_m(T_0)$ — длина волны максимума интерференции при исходной температуре T_0 , $\Delta\lambda_m$ — изменение длины волны при нагреве интерферометра.

Таким образом, изменение показателя преломления и толщины пленки с изменением температуры обуславливает изменение длины волны интерференционных экстремумов. Из формулы (4) видно, что изменение фазы отраженной волны пропорционально сдвигу максимумов или минимумов интерференции при изменении температуры пленки. То есть при нагреве пленки интерференционные спектры отражения должны демонстрировать сдвиг своих экстремумов вдоль оси длин волн.

Схема установки для изучения резонансов эталона Фабри–Перо, состоящего из пс-SiC-пленки, осажденной на сапфировую подложку, показана на рис. 3, а. Зондирование образцов проводили монохроматическим излучением в диапазоне 500–1100 нм с помощью оптико-волоконной приставки. Для фокусировки пучка на поверхность пластин применяли линзы с фокусным расстоянием 10–16 мм, диаметр пучка на поверхности интерферометра соответствовал световому диаметру оптического волокна. Для этого торцы световодов и образец устанавливали на двойном фокусном расстоянии линз. Применение линз позволяло не только согласовать оптический тракт со световодами, но и направлять монохроматическое излучение на исследуемый образец под углом, меньшим 8–10°, что дает возможность прене-

брегать поляризационными составляющими отраженного света. Отраженный от интерферометрической системы световой поток с помощью оптического волокна и аналогичной линзовой системы фокусировался на фотоприемник спектрофотометра, пройдя предварительно через фильтр 5, который отсекает паразитное инфракрасное излучение, идущее от нагретого интерферометра.

Температуру образца повышали с помощью нагревателя от 25 до 600°C через каждые 25–50°C. Это позволило регистрировать изменения для нескольких периодов интерферограммы, по которым можно определить сдвиг экстремумов. Кроме того, для изучения статистики фазовых изменений на каждом образце зондировали 10 точек, расположенных вдоль произвольно выбранной линии на расстоянии 0,5–1,0 мм друг от друга. Исходная интерферограмма измерялась при комнатной температуре T_0 , а последующие интерферограммы — при нагреве датчика до температур $T_1 > T_0$. Температура интерферометра контролировалась с помощью хромель-алюмелевой термодпары. Сигнал фотоприемника спектрофотометра после усиления регистрировался и обрабатывался с помощью компьютера.

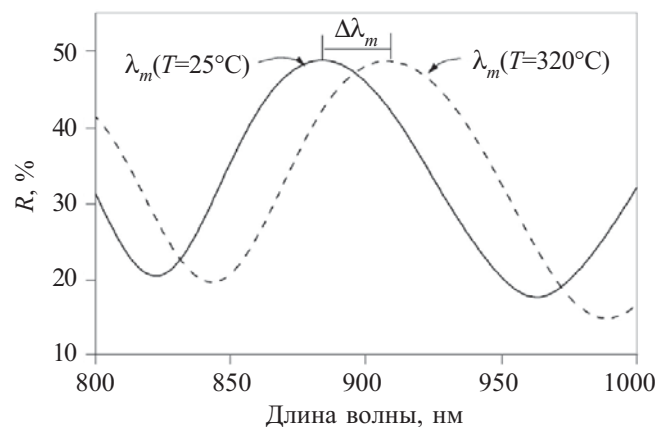


Рис. 4. Сдвиг интерференционного максимума при нагревании пс-SiC-пленочного интерферометра от комнатной температуры (25°C) до температуры 320°C.

Толщина пс-SiC-пленки 2 мкм

На рис. 4 показаны две интерференционные кривые отражения при разных температурах тонкопленочного интерферометра. Было установлено, что сдвиг интерференционных максимумов увеличивался с уменьшением порядка интерференции. Порядок интерференции был рассчитан для всех максимумов по методике, описанной в работе [5]. Расчет температурного изменения фазы по формуле (4) показал, что $\Delta\Phi/\Delta T$ для интерференционных максимумов с длинами волн $\lambda < 700$ нм существенно отличается (примерно на 60%) от вычислений изменения фазы на других λ_m . Это связано с появлением в этой спектральной области заметного поглощения при росте порядка m максимума коэффициента отражения (на этих длинах волн уже появляется хвост фундаментальной полосы поглощения пленок SiC), что и приводит к ошибке в определении местоположения интерференционного максимума и его сдвига. Поэтому для определения спектрального сдвига интерферен-

ционного максимума была выбрана спектральная область, где $\Delta\Phi/\Delta T$ одинакова. Для отобранных нами пленок эти условия выполняются в спектральном диапазоне 690—1000 нм, где и проводили измерения.

На рис. 4 спектры отражения записаны с интервалом длин волн 1 нм. Максимум отражения для $T=25^\circ\text{C}$ находится на длине волны $\lambda_1=884$ нм. При нагреве до 320°C этот максимум сдвигается в сторону более длинных волн и имеет $\lambda_2=907$ нм. Сдвиг максимума одного и того же порядка при нагревании составляет $\Delta\lambda=23$ нм.

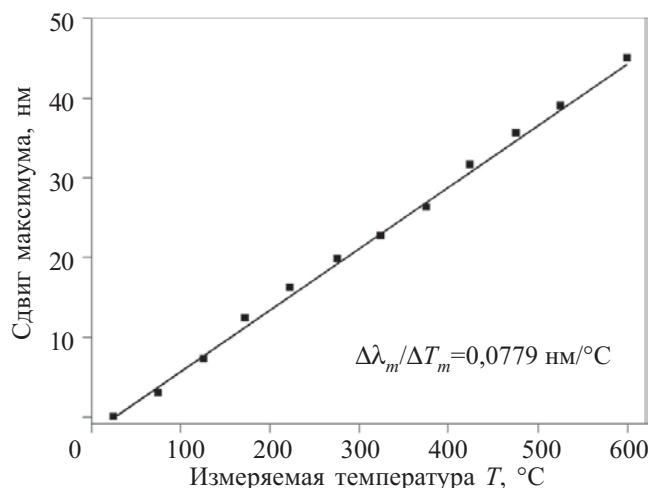


Рис. 5. Сдвиг интерференционного максимума как функция измеряемой температуры

(■ — экспериментальные точки; сплошная линия — линейная аппроксимация)

Оценка угла наклона характеристики $\Delta\lambda=f(\Delta T)$ дает значение $\Delta\lambda_{\text{max}}/\Delta T_{\text{max}}=0,0779$ нм/ $^\circ\text{C}$ и соответствует вычислениям для максимумов $\lambda_1=771$ нм и $\lambda_2=794$ нм.

Для выбранного образца толщиной 2,0 мкм была построена зависимость $\Delta\lambda_{\text{max}}/\Delta T_{\text{max}}$ от температуры нагрева интерферометра, приведенная на рис. 5. Из графика видно, что спектральный сдвиг максимумов при нагреве может быть достаточно хорошо аппроксимирован линейной функцией, что является важным для калибровки датчика.

Авторы отмечают, что приведенная схема волоконно-оптического датчика температуры на основе SiC/сапфир-интерферометра является демонстрацион-

ной, конструкция рабочего варианта датчика должна иметь более простую и надежную схему измерения.

Выводы

Полученные методом прямого ионного осаждения пленки nc-SiC кубического политаипа 3C-SiC обладали хорошей оптической однородностью и температурной стабильностью до 600°C . Показано, что nc-SiC-пленки на подложке из лейкосапфира могут быть использованы в качестве интерферометра Фабри–Перо для дистанционного измерения температуры. Макет датчика продемонстрировал хорошую крутизну температурной чувствительности сдвигов интерференционных максимумов и минимумов отраженной волны — $\Delta\lambda_{\text{max}}/\Delta T_{\text{max}}=0,0779$ нм/ $^\circ\text{C}$.

Высокотемпературная стабильность пленок SiC и лейкосапфира позволяют использовать предлагаемый датчик для дистанционного измерения температуры различных сред до 1000°C в условиях радиационных и электромагнитных воздействий.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Beheim G., Fritsch K., Anthan D. J. Fiber-optic temperature sensor using a spectrum-modulating semiconductor etalon / NASA Technical Memorandum 100153, 1987.
2. Taylor H. F. Fiber optic sensors based upon the Fabry-Perot interferometer / In: Fiber Optic Sensors / Eds.: F. T. S. Yu, S. Yin.— N. Y.: Marcel Dekker, Inc., 2002.— P. 41—71.
3. Магунов А. Н., Меркулов С. В. Амплитуда и форма резонансов Фабри–Перо в лазерной интерференционной термометрии полупроводников и диэлектриков // ЖТФ.— 2000.— Т. 70, вып. 2.— С. 58—63.
4. Semenov A. V., Lopin A. V., Puzikov V. M., Muto Sh. Ion plasma deposition and optical properties of SiC films // Functional Materials.— 2005.— Vol. 12, N 2.— P. 216—223.
5. Lopin A. V., Semenov A. V., Puzikov V. M., Trushkovsky A. G. Optical properties of silicon carbide obtained by direct ion deposition // Ibid.— 2006.— Vol. 13, N 4.— P. 631—636.
6. Семенов А. В., Пузиков В. М., Добротворская М. В., Федоров А. Г. Нанокристаллические пленки SiC, полученные методом прямого ионного осаждения // 7-я МНПК "Современные информационные и электронные технологии — СИЭТ-2006".— Одесса, Украина.— 2006.— Т. II.— С. 102.
7. Rao Y. J., Jackson D. A. Principles of fiber-optic interferometry // In: Optical Fiber Sensor Technology.— Eds.: K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt.— Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.— P. 167—191.
8. Lin Cheng. SiC thin-films on insulating substrates for robust MEMS // Ph. D. thesis, the University of Cincinnati, April 23, 2003.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Джексон Р. Новейшие датчики.— М.: Техносфера, 2007.— 384 с.

Стремительный рост числа разработок и применений датчиков на основе ранее не использовавшихся физических принципов и внедрения новых технологий для реализации известных эффектов стимулирует появление современных руководств. В учебнике-монографии изложены многие недавно сформировавшиеся или обновившиеся направления сенсорики, включая измерительную микромеханику, датчики на ПАВ, оптические, ионизационные и магнитные, химические микро-сенсоры, оптико-волоконные и интеллектуальные измерительные системы, расходомерию для нестационарных потоков и ряд других.