

06.3; 07

© 1993

О ПРИМЕНЕНИИ КАРБИДА КРЕМНИЯ
В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКЕА.Ю. Максимов, А.А. Мальцев,
Н.К. Юшин

Карбид кремния SiC (карборунд) существует в гексагональной (политипы 2H, 4H, 6H, 8H, 10H; симметрия $6mm$), ромбоэдрической (политипы 15R, 21R, 24R, 27R, 33R; симметрия $3m$) и кубической (политип 3C; симметрия $43m$) формах [1, 2]. Кристаллы карбида кремния и структуры на их основе нашли широкое применение в современной технике в качестве высокостабильных светодиодов и фотоприемников, высокотемпературных транзисторов, диодов и теплообменников [3-5] и др. Столь широкий спектр применений обусловлен уникальными физическими и электрическими свойствами этого материала: достаточно широкой запрещенной зоной (от 2.2 до 3.3 эВ в зависимости от политипа), большой теплопроводностью (4.9 Вт/см К), высокой твердостью (9 по шкале Мооса) и др. [1]. Кроме того, современная технология допускает возможность допирования карбида кремния в широких пределах, а также рост эпитаксиальных слоев одного политипа на подложке другого. Последнее обстоятельство делает возможным применение карбид-кремниевых структур в устройствах интегральной оптики. Цель данной работы состоит в оценке возможности волноводного распространения света в такой структуре, в которой можно также создать источник света в виде электролюминесцентного светодиода, электрооптический или/и акустооптический модулятор, и фотоприемник.

В о л н о в о д н о е р а с п р о с т р а н е н и е
с в е т а

Рассмотрим структуру: эпитаксиальная пленка одного политипа на подложке другого; для простоты оценим возможность создания планарного волновода. Известно, что для поддержания волноводного распространения показатель преломления пленки должен превышать показатель преломления подложки [6]. Сравнение показателей преломления разных политипов [7] показывает, что для всех длин волн света это условие может быть выполнено лишь в пленке 4H-политипа на 6H-и 15-подложке, а также 15R-пленке на 6H-подложке; кроме того, для пленки 3C-политипа на 6H-подложке (и на 15R-подложке при длинах волн менее 725 нм). Из-за двулучепреломления гексагональных и ромбоэдрических политипов заметным образом различаются волноводные характеристики ТМ-

Отношение числа мод V^* к толщине волноволнового слоя (в мкм)

Тип моды	V/d					
	ТМ			ТЕ		
Длина волны λ , нм	498	530	630	498	530	630
Тип структуры: пленка/подложка						
4Н/6Н	1.39	1.29	1.06	0.95	0.88	0.71
4Н/15	1.17	1.10	0.92	0.88	0.80	0.63
15R/6Н	0.74	0.67	0.53	0.36	0.35	0.32

*При расчетах V по формуле (1) использовались аппроксимация показателей преломления $n(\lambda)$ по [7].

(отвечающих показателю преломления n_e) и ТЕ- (с показателем преломления n_o) мод. Важной характеристикой планарного волновода является число поддерживаемых волноводом мод V [6]:

$$V = 2d [n_f^2 - n_s^2]^{1/2} / \lambda, \quad (1)$$

где n_f и n_s — показатели преломления пленки толщиной d и подложки соответственно, а λ — длина волны света на воздухе. Величины V , рассчитанные для различных комбинаций полтипов пленки и подложки, представлены в таблице. Видно, что для технологически достижимых толщин d эпитаксиальных слоев (порядка нескольких мкм) возможно существование небольшого числа распространяющихся мод. Заметная дисперсия показателей преломления [7] делает величину V зависящей от длины волны света, кроме того, в карбиде кремния поглощение света зависит при некоторых длинах воли от поляризации света [8], тогда ТЕ-мода может поглотиться в пленке, а ТМ-мода распространяться. Не представляет больших сложностей оценка распространяющихся мод и в канальном волноводе (см. [6]).

В полупроводниковых материалах существует еще одна возможность создания условий для волноводного распространения света, поскольку возникает изменение показателя преломления из-за появления свободных носителей [6]:

$$\Delta n = \frac{N_c e^2 \lambda^2}{8 \pi^2 \epsilon_0 n_f c^2 m^*}, \quad (2)$$

где N_c – концентрация носителей в пленке с показателем преломления n_f , e – заряд электрона, m^* – эффективная масса носителей, C – скорость света, а ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Технологически доступная концентрация носителей в карбиде кремния составляет $2 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что позволяет оценить изменение Δn как $0,0002 - 0,01$, т.е. подбором условий легирования можно добиться волноводного распространения света на поверхности политипнооднородной подложки.

Источники излучения

Одним из основных применений карбид-кремниевых структур является электролюминесцентные светодиоды. Длина волны излучения такой диодной структуры определяется легирующей примесью и политипом; так, примесь бора создает излучение на 530 нм в $4H$ - 590 нм в $6H$ - и 620 нм в $15R$ -политипе, а примесь алюминия – на 480 нм , 530 нм , и 570 нм соответственно. Применение решеток распределенной обратной связи позволяет существенно уменьшить ширину линии излучения, однако поскольку излучающие переходы в SiC не прямые, то лазерного эффекта ожидать нельзя. Эффективность светодиодных структур на карбиде кремния составляет до 30 мкд при токе 20 мА , т.е. обеспечивает яркость, соизмеримую с квантовыми генераторами. Быстродействие SiC -светодиодов достигает нескольких нс.

Модуляторы

Все формы карбида кремния не обладают центром симметрии и поэтому допускают существование линейного электрооптического и пьезоэлектрического эффектов, описываемых тензорами 3-го ранга. К сожалению, в литературе отсутствуют данные по величинам электрооптических коэффициентов γ карбида кремния, но если взять для оценки среднюю величину γ других близких по свойствам материалов как $\gamma \approx 1 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{В}$ [1], то максимальное изменение показателя преломления $\Delta n \approx 0,04$ при величине приложенного поля, равной пробойному $E_b = 40 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ [10]. По-видимому, наибольшую контрастность модуляции обеспечит электрооптический коэффициент γ_{xy} , описывающий поворот плоскости поляризации света, т.е. преобразование мод ($TE \rightarrow TM$), что наиболее существенно для длин волн света, на которых как уже упоминалось выше, заметно различие коэффициентов поглощения света с разной поляризацией.

Необходимые величины фотоупругих постоянных карбида кремния для оценки эффективности акустооптического модулятора не измерялись, известны лишь значения пьезооптического эффекта $q_E n_0^3 \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, где $q_E = (q_{11} - q_{12})/2$ [1]. Фотоупругая постоянная $p_E \approx q_E C_E$, что при $C_E = (C_{11} - C_{12})/2 = 4,12 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$

[9] дает $\rho_E \approx 0.09$. Тогда деформация $\kappa = 10^{-4}$ обеспечит изменение показателя преломления $\Delta n = \kappa^3 \cdot \rho \cdot \kappa \approx 0.6 \cdot 10^{-4}$. Однако следует отметить, что для карбида кремния факторы акустооптической добротности [11]

$$M_1 = \rho^2 n^7 / \rho v, \quad M_2 = \rho^2 n^6 / \rho v^3, \quad M_3 = \rho^2 n^7 / \rho v^2$$

(здесь ρ - плотность материала, а v - скорость звука) малы из-за большой скорости звука, $v \approx 10$ км/с [9].

В принципе, возможна модуляция света, распространяющегося в волноводе за счет изменения показателя преломления из-за изменения концентрации носителей, что описывается формулой (2). Такая модуляция может быть достигнута в р-п переходе, образованном в SiC-структуре.

Ф о т о п р и е м н и к

Структуры с р-п-переходами, созданные на SiC, могут быть использованы в качестве фотоприемников, которые обладают низким уровнем шумов, малым темновым током, высоким быстродействием и достаточно большой эффективностью [12].

Кроме того, симметрия гексагональных и ромбоэдрических политипов допускает существование в них пьезоэлектрического и фотогальванического эффектов, что может быть использовано для создания фотоприемников непосредственно в волноводном слое SiC. Величины фотогальванического эффекта измерялись в [13] и составляют 10 мкВ/Вт для длины света 1.06 мкм.

В качестве приемника интегральнооптической схемы можно использовать также кремниевый фотоприемник, нанесенный на плоскость волноводной пленки. Из-за большего, чем у SiC показателя преломления SiC излучение будет переходить из волновода в кремний, где и происходит преобразование в электрический сигнал.

Таким образом, проведенный анализ продемонстрировал достаточно большие перспективы для новой сферы применений карбида кремния в интегральной оптике. Отметим, что по сравнению с другими полупроводниковыми материалами (GaAs, InP и др. [6]) SiC волноводы допускают распространение видимого света, что обеспечивает повышение информационной емкости такой интегральнооптической схемы. Наши предварительные эксперименты подтвердили достижимость волноводного распространения в планарных структурах на основе карбида кремния.

В заключение авторы благодарят В.Е. Челнокова за полезное обсуждение. Работа была частично поддержана Аризонским Университетом, США (The University of Arizona, USA).

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Landolt-Börnstein: Semiconductors: Physics of Group IV and III-V Compounds. V. 17. 1982.
- [2] Гавриленко В.И., Грехов А.М., Корбутяк Д.В., Литовченко В.Г. Оптические свойства полупроводников. Справочник. Киев, 1987. С. 295-301.
- [3] Silicon Carbide. A High Temperature Semiconductor / Ed. by O' Connor J.R., Smiltens J. Oxford, 1960. 565 p.
- [4] Meetham G.W. // J. Mater. Sci. 1991. V. 26. N 4. P. 853-860.
- [5] Penty R.A., Bjerklie J.W. // Ceram. Sci. Rev. 1982. V. 3. P. 120-127.
- [6] Волноводная оптоэлектроника / Под ред. Тамир Т. Москва, 1991. 575 с.
- [7] Shatter P.T.B. // Appl. Optics. 1971. V. 10. N 5. P. 1034-1036.
- [8] Dubroskiy G.B., Lepneva A.A., Radonova E.I. // Phys. Status Solids (b). 1973. V. 57. N 1. P. 423-432.
- [9] Arlt G., Shodder G.R. // J.A.S.A. 1965. V. 37. N 2. P. 384-386.
- [10] Barret D.I., Seidensticker R.G., Gaida W., Hopkins R.H., Choyke W.J. // J. Crystal Growth. 1991. V. 109. P. 17-23.
- [11] Guided Wave Acousto Optics / Ed by Berlin, 1990. 322 p.
- [12] Веренчикова Р.Г., Водаков Ю.А., Литвин Д.П., Санкин В.И. и др. // ФТП. 1992. Т. 26. В. 6. С. 1008-1012.
- [13] Данишевский А.М., Есаян С.Х., Леманов В.В., Максимов А.Ю. // ФТТ. 1983. Т. 25. В. 9. С. 2863.

Физико-технический
институт им. А. Ф. Иоффе
РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию
11 марта 1993 г.