

ВТОРАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ГАРМОНИКА В УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНКАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ

А.М. Агальцов, В.П. Алещенко, В.С. Горелик, А.В. Егоров,
В.Н. Егоров, И.Л. Чистый

Исследованы зависимости интенсивности сигнала второй оптической гармоники в ультратонких пленках карбида кремния. Установлено, что интенсивность второй оптической гармоники пропорциональна квадрату толщины пленки. Показано, что качество приповерхностного слоя массивного образца карбида кремния существенно повышается в результате обработки его поверхности пучком ионов аргона с энергией 6 кэВ.

Исследования второй оптической гармоники (ВОГ) в проходящем и отраженном свете позволили получить информацию о структуре и дефектности оптических пленок и покрытий /1-3/. Применение для этих целей лазеров квазинепрерывного действия с достаточно большой средней и пиковой мощностью излучения и чувствительных систем регистрации открывают возможности для исследования и контроля характеристик ультратонких пленок, состоящих из десятков или сотен монослоев.

В настоящей работе сообщаются результаты исследований ВОГ в ультратонких пленках карбида кремния в зависимости от технологических условий их выращивания на металлических и диэлектрических подложках.

Пленки карбида кремния наносились на подложки методом распыления монокристаллического образца с кубической структурой β -SiC при давлении 10^{-4} торр. Распыление производилось с помощью пучка ионов аргона с энергией 6 кэВ по методике, описанной в /4/. Перед нанесением пленки карбида кремния производилось облучение подложки другим, менее интенсивным пучком ионов аргона той же энергии, скользящим вдоль обрабатываемой поверхности.

В качестве подложек использовались: а) образцы из бескислородной меди диаметром 50 и высотой до 50 мм с полированной торцевой поверхностью; б) образцы из стекла К-8 диаметром 60 и толщиной 10 мм с нанесенной на полированную торцевую поверхность пленкой золота толщиной 0,5 мкм; в) образцы из сапфира диаметром 20 и толщиной 2 мм с полированной торцевой поверхностью. Шероховатость поверхности образцов составляла $R_z \leq 0,005$ мкм, чистота поверхности была не хуже 4-го класса. Температура подложек в процессе нанесения пленок не превышала 350 К и контролировалась термопарой. Тощина пленок варьировалась путем изменения времени напыления и контролировалась в достаточно толстых пленках с помощью интерферометра МИ-11.

Вторая оптическая гармоника исследовалась в отраженном свете с использованием в качестве

возбуждающего излучения линии генерации $\lambda = 578,2$ нм лазера на парах меди. Средняя мощность генерации оптического излучения составляла ~ 1 Вт, пиковая 10^4 Вт, частота следования импульсов 10^4 Гц.

Возбуждающее излучение направлялось под углом 45° к поверхности образца и фокусировалось в виде пятна размером ~ 1 мм. Зеркально отраженное излучение, содержащее возбуждающий свет и ВОГ, собиралось конденсором на входной щели монохроматора МДР-2. Ослабление возбуждающего излучения и выделение ВОГ осуществлялось с помощью поглощающего светофильтра УФС-1, установленного перед щелью монохроматора. Регистрация сигнала ВОГ производилась с применением системы счета фотонов и схемы совпадения сигналов от двух приемников излучения, один из которых (ЛФД-2) регистрировал основное излучение, а другой — сигнал ВОГ [5]. Средняя мощность сигнала ВОГ составляла $10^{-13} - 10^{-14}$ от пиковой мощности возбуждающего излучения.

На рис. 1 приведены топограммы интенсивности ВОГ, полученные для различных образцов при перемещении их в направлении, перпендикулярном плоскости падения возбуждающего света. Кривые а (справа) относятся к пленкам SiC толщиной 5, 10 и 30 нм соответственно, нанесенным на медную подложку. На кривых б и в (справа) приведены топограммы ВОГ для пленок карбида кремния, нанесенных на золото и сапфир. Сигнал ВОГ от чистой меди (кривые а, слева) находится на уровне фона, а от участков пленки SiC на медной подложке превышает уровень фона на

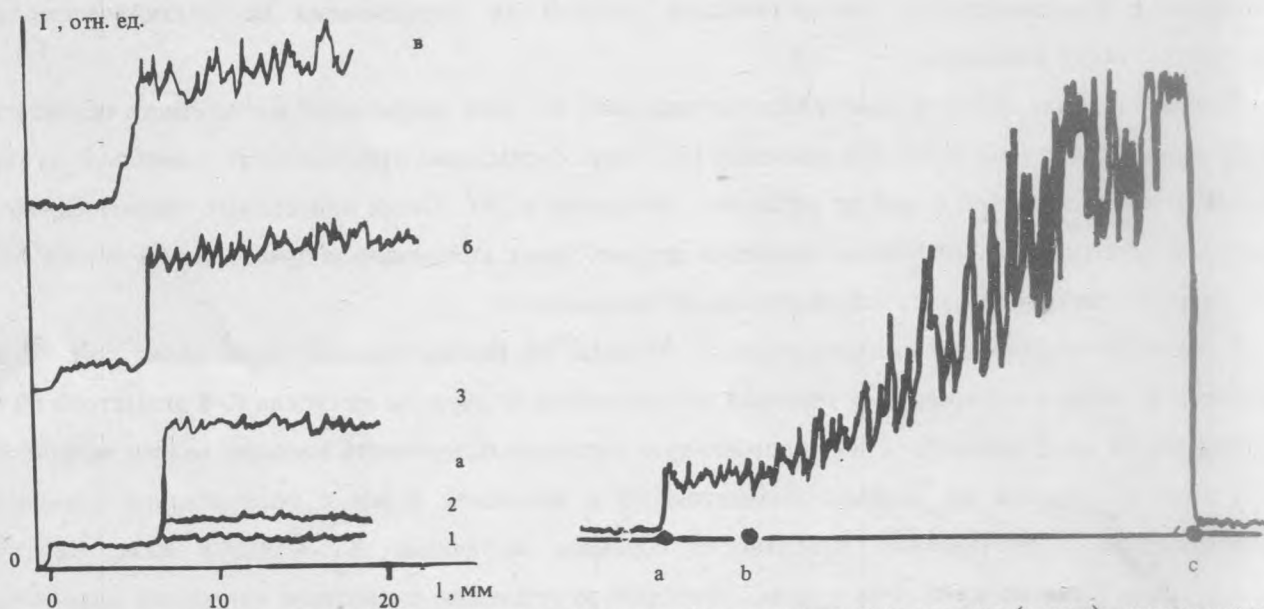


Рис. 1. Топограммы интенсивности второй оптической гармоники в пленках карбида кремния (справа), нанесенных на различные подложки; а - SiC:Cu, толщина пленки $t = 5$ нм (1), 10 нм (2), 30 нм (3); б - SiC:Au, $t = 30$ нм; в - SiC:Al₂O₃, $t = 10$ нм, увеличено в 10 раз. Слева - сигналы ВОГ от подложек.

Рис. 2. Топограмма интенсивности второй оптической гармоники в приповерхностном слое карбида кремния. На участке а поверхность не обработана, участок вс подвергнут обработке ионным пучком.

порядок. Как следует из рисунков, интенсивность сигнала ВОГ приблизительно пропорциональна квадрату толщины исследуемых пленок, и сигнал ВОГ мало изменяется при сканировании вдоль поверхности образцов. Это свидетельствует о постоянстве толщины пленки на различных участках образца. Сигнал ВОГ от пленок карбида кремния, полученных на золоте и сапфире, также оказывается достаточно интенсивным. На участках, свободных от пленки SiC, сигнал ВОГ или совсем отсутствует (рис. 1, кривая в, сапфир), или оказывается довольно слабым (кривая б, золото).

Были проведены также эксперименты по облучению пучком ионов аргона с энергией 6 кэВ поверхности массивного образца карбида кремния (β -SiC). На рис. 2 приведена соответствующая топограмма интенсивности ВОГ для необработанного (слева, до точки в) и обработанного (справа) участков поверхности. Видно, что сигнал ВОГ быстро возрастает при переходе от необработанной ионами поверхности к обработанной.

Наличие достаточно интенсивных сигналов ВОГ от исследуемых пленок карбида кремния свидетельствует об их кристаллическом строении, характеризующемся отсутствием центра симметрии. Ацентрический тип структуры может соответствовать кристаллической решетке типа β -SiC или гексагональным ацентричным политипам карбида кремния. Важно отметить, что, как показывают выполненные эксперименты, данная технология получения пленок SiC обеспечивает упорядоченный кристаллический характер их строения для различных подложек: сапфира, меди, золота.

Как следует из /6/, коэффициент поглощения света в карбиде кремния для ВОГ ($\lambda = 289,1$ нм) составляет $\sim 10^4$ см⁻¹. Поэтому можно считать, что в исследованных ультратонких пленках карбида кремния толщиной от 5 до 30 нм происходит преобразование падающего излучения в излучение ВОГ во всем объеме пленки. Интенсивность этого излучения, наблюдаемого в отраженном свете от слоя толщиной z , в соответствии с соотношениями /7/ может быть представлена в виде

$$I_{2\omega} = KI_0^2 z^2 (\sin w/w)^2, \quad (1)$$

где $w = (2\pi z/\lambda)(n_1 + n_2)$; n_1, n_2 — показатели преломления для падающего излучения и ВОГ соответственно; λ — длина волны возбуждающего излучения, I_0 — его интенсивность; K — коэффициент, характеризующий оптическую нелинейность материала пленки. Учитывая, что для исследованных пленок $z/\lambda \ll 1$, $n_1 + n_2 \lesssim 6$, получим $\sin w/w \approx 1$. Тогда из соотношения (1) следует: $I_{2\omega} \sim z^2$, т.е. для изучаемого диапазона толщин пленок интенсивность сигнала ВОГ должна быть пропорциональна квадрату толщины исследуемой пленки. Это соотношение находится в удовлетворительном согласии с экспериментом (рис. 1).

На основании полученных данных можно оценить относительные эффективности ВОГ для пленок карбида кремния и золота. Если полагать, что толщина скин-слоя золота сравнима с

толщиной пленки карбида кремния и составляет 10-20 нм, то из рис. 1 следует, что коэффициент оптической нелинейности этого слоя сравним с соответствующим коэффициентом карбида кремния. Такое высокое значение этого коэффициента для ультратонкой пленки золота можно объяснить проявлением известного эффекта электродинамического усиления ВОГ вблизи шероховатой поверхности /8/ благородных металлов.

Резкое возрастание интенсивности ВОГ (рис. 2) после обработки поверхности монокристаллического образца карбида кремния пучком ионов аргона объясняется уменьшением размеров аморфных областей и загрязнений на полированной поверхности. Можно полагать, что и в случае ионной обработки пленки карбида кремния в процессе ее выращивания степень кристалличности и качество этой пленки в большой степени обусловлены влиянием пучка ионов аргона на процесс роста пленки.

Таким образом, в настоящей работе показано, что при нанесении пленок карбида кремния с помощью двух ионных источников, один из которых используется для "бомбардировки" и распыления мишени из карбида кремния, а другой — для обработки и формирования покрытия образуются ультратонкие кристаллические пленки с ацентричной структурой. Анализ топограмм методом ВОГ показал, что такие пленки характеризуются близкими значениями толщины на различных участках образца. Качество приповерхностного слоя массивных образцов карбида кремния существенно улучшается после обработки их поверхности скользящим пучком ионов аргона. Показано, что для толщин пленок в диапазоне 1 — 10 нм имеет место квадратичная зависимость сигнала ВОГ от толщины исследуемой пленки.

ЛИТЕРАТУРА

1. А г а л ь ц о в А.М., Г о р е л и к В.С., С у щ и н с к и й М.М. Оптика и спектроскопия, **58**, 386 (1985).
2. А х м а н о в С.А., К о р о т е е в Н.М. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М., Наука, 1981.
3. Г о р о б е й Н.Н., И п а т о в а И.П., С у б а ш и е в А.В. ФТТ, **24**, 2064 (1982).
4. Н o f f m a n R.A., L a n g e W.J., C h o y k e W.J. J. Appl. Opt., **14**, 1803 (1975).
5. А г а л ь ц о в А.М., Г о р е л и к В.С., Ф а й з у л л о в Т.Ф. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 2, 18 (1982).
6. А л т а й с к и й Ю.М., Р о д и о н о в В.Н. Неорганические материалы, **10**, 1147 (1974).
7. Л а н д с б е р г Г.С. Оптика. М., Наука, 1986, с. 846.
8. C h e n C.K. et al. Phys. Rev. Lett., **46**, 145 (1981).

Поступила в редакцию 10 октября 1990 г.