

в тепловых свойствах СИД Helio (снижение теплового сопротивления).

При деградационных испытаниях СИД на основе нитридов, проводимых ранее [1], отмечалось, что для первых ~1000 часов работы наблюдается улучшение КПД СИД. В связи с этим, можно предположить, что выбранные нами режимы соответствуют данному промежутку времени функционирования СИД.

Необходимо отметить также, что механическое напряжение для размножения дислокаций в СИД на базе нитридов составляет  $\sigma_0 = 2,8$  МПа ( $280$  г/мм<sup>2</sup>), мощность ультразвуковой волны для этого можно найти по формуле [2]

$$P = \frac{\sigma_0^2 f}{E_p} V_p \cdot$$

В нашем случае частоты ультразвука составляли  $f = 84,5$  кГц и  $f = 117,6$  кГц, модуль Юнга и

УДК 621

#### ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ ГРАФИТА В ЭТАНОЛЕ

Босак Н.А.<sup>2</sup>, Журавлева В.И.<sup>3</sup>, Короза А.Г.<sup>2</sup>, Маркевич М.И.<sup>1</sup>, Чапланов А.М.<sup>1</sup>, Щербакова Е.Н.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова, НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь.

<sup>3</sup>Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Введение. Дальнейший прогресс в получении материалов с новыми свойствами связан с такими изменениями в структуре, которые оказывают влияние на фундаментальные свойства объектов. Наиболее перспективное научное направление в области физического материаловедения связано с созданием и изучением структуры и свойств материала, который получен из частиц нанометрового диапазона.

В последние годы было обнаружено, что уменьшение размера частиц в материале может приводить к существенному изменению их свойств [1]. Такие изменения появляются, когда средний размер кристаллических зерен не превышает 100 нм.

Важным фактором, который оказывает большое влияние на химические и физические свойства наночастиц, является возрастание в них относительной доли «поверхностных атомов», находящихся в других условиях, как следствие этого происходит изменение характера взаимодействия между атомами, что делает наночастицу способной эффективно взаимодействовать с химическими соединениями.

Существуют различные способы получения наночастиц. Наиболее эффективный из них основан на получении частиц из компактных

объем пьезокерамики  $E_p \approx 7 \cdot 10^{10}$  Па,  $V_p = 1,884 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup> (диаметр 40 мм, толщина 15 мм).

Следовательно, минимальная мощность ультразвуковой волны, необходимая для эффективного размножения дислокаций, составляет достаточно большую величину ~180–250 Вт. Ввиду этого эффект ультразвука в нашем случае оказался не очень заметным.

1. Полищук, А. Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А. Полищук, А. Туркин // Компоненты и технологии. – 2008. – № 2. – С.25–27.
2. Рабинович, О.И. Моделирование электрических и оптических характеристик светоизлучающих диодов на основе многокомпонентных гетероструктур AlGaInN: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / О.И. Рабинович; Рос. технолог. ун-т. – М., 2008. – 28 с.

твердых материалов: испарение – конденсация, механическое дробление, лазерная абляция [2].

Результаты и их обсуждение. Для абляции материала использовали лазер с длиной волны 1064 нм (лазер на алюмоиттриевом гранате), генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс).

Образованная в результате испарения вещества горячая абляционная плазма под действием первого импульса создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц воздуха [3], поэтому вещество, которое поступает в эту область после второго импульса, практически не вступает во взаимодействие с кислородом, азотом и другими элементами окружающего воздуха [3].

Мишень из графита помещалась в этанол, плотность мощности составляла  $5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, лазерный пучок фокусировался на поверхности графита в пятно диаметром 0,5 мм. В качестве основных методов исследования структуры и фазового состава образцов применялись электронография и метод комбинационного рассеяния света. На рисунке 1 показан КР - спектр исходной мишени.

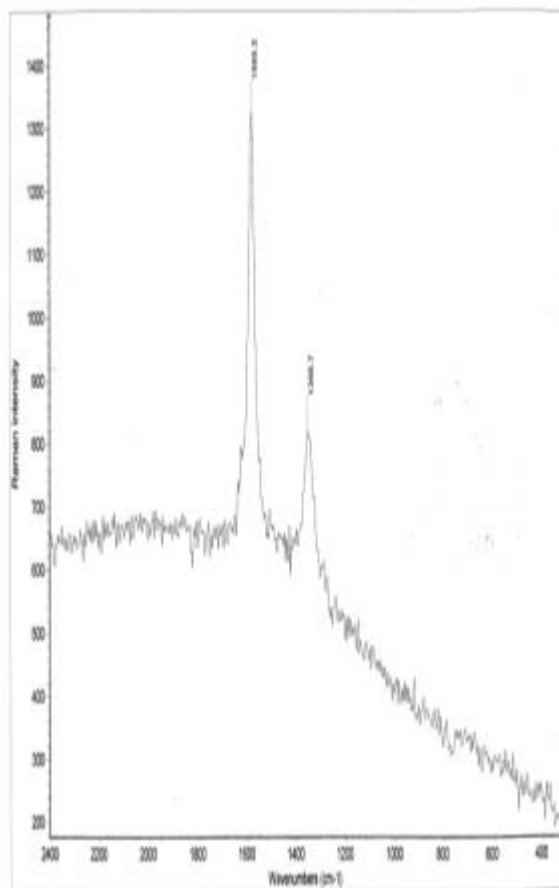


Рисунок 1 – КР – спектр исходной графитовой мишени

На спектрах максимум полосы *D* расположен в окрестности  $1343 \text{ см}^{-1}$ , а максимум *G* полосы наблюдается в окрестности  $1586 \text{ см}^{-1}$ . Известно, что спектры КР, содержащие *D* и *G* полосы, характерны для наноструктурированного углеродного материала [4].

Лазерная абляция графитовой мишени в этаноле приводит к окрашиванию жидкости в серый цвет, образуется суспензия дисперсных наночастиц, по истечении времени и испарении жидкости происходит их агломерация.

На рисунке 2 представлена электронограмма от агломерированных частиц.

Исследование проводилось методом электронографии на просвет (электронограф малоугловой регистрирующий ЭМР-102). Постоянную прибора определяли путем калибровки, используя образец с известными параметрами кристаллической решетки. В качестве калибровочного эталона были выбраны поликристаллические образцы окиси магния, дающие четкую кольцевую электронограмму.

Для идентификации электронограмм от агломерированных частиц использовали базу данных «The International Centre for Diffraction Data». Фазовый состав частиц соответствует

кристаллическому графиту с гексагональной решеткой. Как следует из электронограммы, при абляции мишени графита в этаноле образуются наночастицы графита размером  $\sim 10\text{-}15 \text{ нм}$ , а также присутствуют кристаллические частицы размером более  $1 \text{ мкм}$ , о чем свидетельствует присутствие на электронограмме отдельных четких рефлексов.

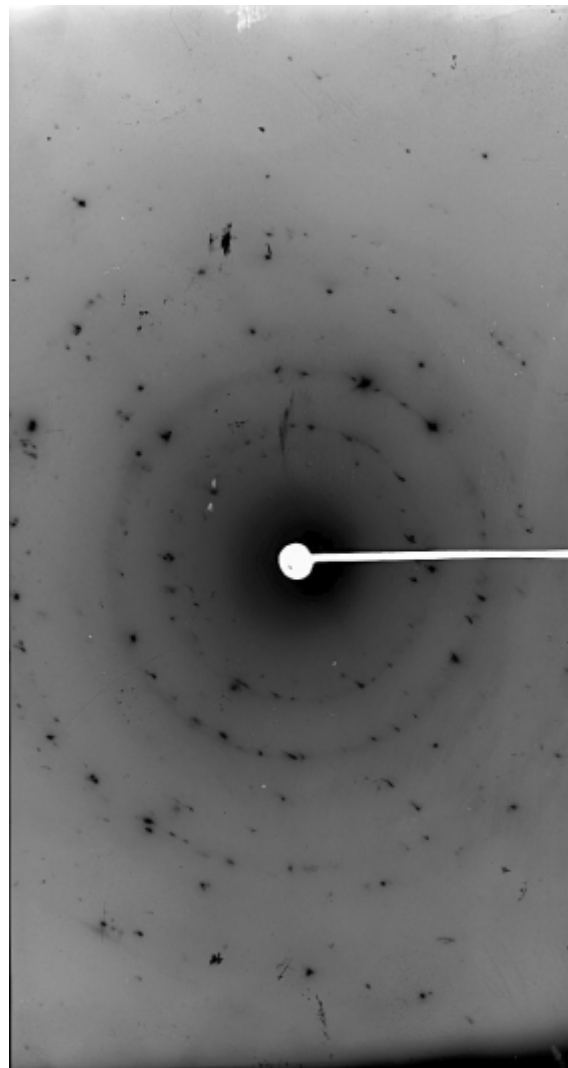


Рисунок 2 – Электронограмма частиц, полученных после лазерной абляции

Заключение. При импульсной лазерной абляции графита в этаноле в двухимпульсном режиме (длительность импульсов  $10 \text{ нс}$ , временная задержка между импульсами  $3 \text{ мкс}$ , плотность мощности  $5 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$ , диаметр пучка  $0.5 \text{ мм}$ ) формируется суспензия из наночастиц, которые подвержены агломерации.

Фазовый состав частиц соответствует кристаллическому графиту с гексагональной решеткой. Частицы могут использоваться для композиционных покрытий, содержащих в составе высокодисперсные частицы.

1. Витязь, П. А. Наноструктурные материалы/ Витязь П.А.// Беларусь – Россия. Минск. 2004. С. 7.
2. Симакин, А. В., Воронов, В. В., Шафеев, Г. А. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях/. Симакин А. В., Воронов В. В., Шафеев Г. А. //Труды института общей физики им. Прохорова.- 2004. -Т. 60.- С. 83-107.
3. Scaffidi, J., Cremers, D.A., Angel, S.M. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy/ Scaffidi J., Cremers D.A., Angel S.M.//Elsevier.-2007.- P.137.
4. Агеев, С.П., Горбачук, Н.И., Дидковский, Я.И., Последович, М.Р., Обухов, В.Е., Шпак, Е.П. Диагностика пленок алмазоподобного углерода методом комбинационного рассеяния/ Агеев С.П., Горбачук Н.И., Дидковский Я.И., Последович М.Р., Обухов В.Е., Шпак Е.П.//9-ая Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом». - Минск. -2011.-С.397-398.

УДК 546.28: 621.315.592

## ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТРУКТУР ФОТОРЕЗИСТ ФП9120 – КРЕМНИЙ

Бринкевич Д.И.<sup>1</sup>, Оджаев В.Б.<sup>1</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>1</sup>, Вабищевич С.А.<sup>2</sup>,  
Вабищевич Н.В.<sup>2</sup>, Черный В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Повышение степени интеграции предъявляет высокие требования к блоку операций фотолитографии. Так, если при формировании элементной базы по n-МОП технологии применяется до 10 операций фотолитографии, то при формировании элементной базы по БИКМОП технологии используется до 22 операций фотолитографии [1]. В качестве масок в процессах субмикронной литографии важную роль играют диазохинон-новолачные (ДХН) резисты [2]. В частности, позитивный фоторезист ФП9120, который представляет собой композит из светочувствительного О-нафтохинондиазида и фенол-формальдегидной смолы, широко используется в современной полупроводниковой электронике в качестве защитного светочувствительного материала в прецизионных фотолитографических процессах. Целью настоящей работы являлось исследование прочностных свойств пленок фоторезиста марки ФП9120 различной толщины, нанесенных на пластины кремния различных марок.

Пленка фоторезиста толщиной от 1,0 до 5,0 мкм наносилась на поверхность пластин кремния различных марок (табл.1) методом центрифугирования. Толщина  $h$  пленки фоторезиста определялась скоростью вращения и составляла: 1,0 мкм при скорости вращения  $v = 8300$  об/мин; 1,75 мкм – при  $v = 2900$  об/мин; 2,4 мкм – при  $v = 1200$  об/мин. Пленки толщиной  $h = 5,0$  мкм формировались в две стадии с  $v = 1800$  об/мин на обеих стадиях. Толщина пленок фоторезиста контролировалась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 по 5 фиксированным точкам (центр, верх, низ, слева, справа) на каждой пластине, при этом отклонения от среднего значения не по пластине для всех исследовавшихся образцов (независимо от ориентации и легирования

пластины) не превышали 2 %, что близко к погрешности измерений.

Морфология поверхности модифицированной имплантацией полимерной плёнки исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при комнатной температуре в полуконтактном резонансном режиме на частоте 145 кГц на приборе Solver P-47. Использовались кантеливеры серии NSG 01 с радиусом закругления 10 нм. Характерные АСМ изображения поверхности фоторезиста приведены на рис.1. Значения средне-арифметической шероховатости  $R_a$  усреднялись по результатам не менее чем 10 измерений в различных точках образца и варьировались в пределах 0,18 – 0,30 нм для всех исследовавшихся образцов. Существенной зависимости величины шероховатости от типа кремниевой подложки и толщины слоя фоторезиста не наблюдалось.



Рисунок 1 – Характерные АСМ изображения поверхности фоторезиста в режиме 3D топографии

Исследование прочностных свойств структур фоторезист-кремний проводилось методом микроиндентирования на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре. В качестве индентора использовался алмазный на-