

УДК 539.4

## НАНОРАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ НРНТ АЛМАЗА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Гусаков Г. А.<sup>1</sup>, Шаронов Г. В.<sup>1</sup>, Баран Л. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Исследованы технологические процессы прецизионной обработки поверхности подложек из монокристаллов синтетического алмаза оптоэлектронного назначения. Установлено, что примесь никеля оказывает существенное влияние на качество механической шлифовки поверхности алмаза. Показано, что комплексный подход, основанный на отборе кристаллов по содержанию примеси никеля, проведении предварительного вакуумного отжига, механической шлифовки и финишной полировки с использованием в качестве полировальной суспензии смеси субмикронных алмазных порошков и модифицированных наноалмазов детонационного синтеза позволяет получать атомно-гладкие поверхности НРНТ алмазных подложек с шероховатостью  $R_a \leq 0,4$  нм.

**Ключевые слова:** алмазные подложки, примеси, вакуумный отжиг, шлифовка, полировка.

## NANOSCALE PROCESSING OF THE HPNT-DIAMOND SUBSTRATES FOR OPTOELECTRONICS DEVICES

Gusakov G.<sup>1</sup>, Sharonov G.<sup>1</sup>, Baran L.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems

<sup>2</sup>Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The technological processes of precision processing of the substrates surface made from synthetic diamond single-crystals for optoelectronic devices were studied. It was found that the nickel impurity has a significant effect on the quality of mechanical grinding of the diamond surface. It is shown that a comprehensive approach based on the selection of crystals by nickel impurity content, preliminary vacuum annealing, mechanical grinding and final polishing using a mixture of submicron diamond powders and modified detonation synthesis nanodiamonds as a polishing suspension allows obtaining atomically smooth surfaces of HPNT diamond substrates with a roughness  $R_a < 0.4$  nm.

**Keywords:** diamond substrates, impurities, vacuum annealing, grinding, polishing.

Адрес для переписки: Гусаков Г. А., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь  
e-mail: gga68@rambler.ru

**Введение.** Прогресс в области фотоники и твердотельной электроники, в первую очередь, определяется развитием технологии подложек, на основе которых производятся оптоэлектронные приборы и интегральные схемы. В этой связи алмаз уже давно признан исключительным материалом с уникальными механическими, тепловыми и оптическими свойствами. В настоящее время оптоэлектронные приборы с использованием алмазов становятся реальностью, поскольку промышленность освоила выпуск синтетических кристаллов больших размеров [1, 2]. Намечившиеся в последнее время перспективы создания различных устройств силовой электроники и оптоэлектроники на алмазе требуют создания алмазных подложек оптического качества с ненарушенной кристаллической структурой поверхностного слоя [3, 4]. В этой связи значительные усилия направляются на разработку оборудования и технологических процессов полировки алмазных подложек для получения поверхностей высшего класса чистоты [5, 6].

**Материалы и методы.** В настоящей работе исследовались кристаллы синтетического алмаза,

выращенные методом температурного градиента (НРНТ-метод) в системе Ni-Fe-C. Примесный состав образцов исследовался методом поглощения света в ИК и видимом диапазонах спектра. Для модификации дефектно примесной структуры НРНТ-алмазов использовался вакуумный отжиг ( $P = 10^{-2}$  Па,  $T = 1500$  °С). Шлифовка базовой плоскости путем последовательной обработки на чугуновых дисках, шаржированных алмазным порошком АСН с зернистостью 20/14, 10/7, 5/3 и 2/1 мкм. Для финишной полировки применялась специально разработанная виброполировальная установка. Полирующей смесью являлись водная эмульсия субмикронного алмазного порошка с зернистостью менее 1 мкм и модифицированных наноалмазов детонационного синтеза (ДНА) в пропорции 50/50. Морфология поверхности образцов после обработки исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

**Результаты и обсуждение.** Основными примесями в исследованных кристаллах НРНТ-алмаза являются азот и никель. Примесь азота содержится преимущественно в форме одиночных ато-

мов в положении замещения (С-дефект). Концентрация этой примеси находится в интервале 100–200 ppm. Примесь никеля содержится как в форме одиночных атомов, так и в форме комплексов, включающих в себя атомы никеля, азота и вакансии. Концентрация никеля в исследованных кристаллах различалась на порядок, и ее значения находились в диапазоне 1–20 ppm.

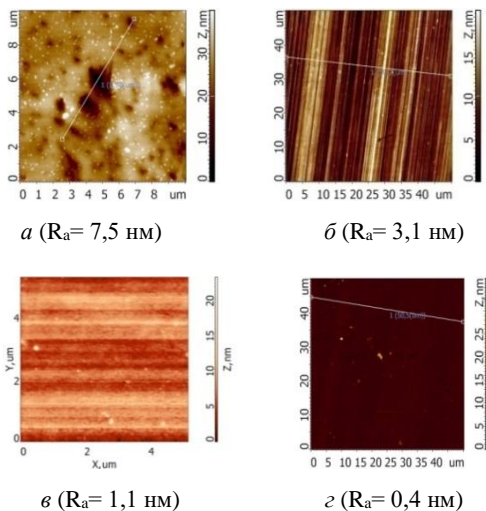


Рисунок 1 – АСМ-изображения и профилограммы поверхности алмазных пластин после различных обработок: а – образец с высоким содержанием примеси никеля после механической шлифовки; б – образец с низким содержанием примеси никеля после механической шлифовки; в – после вакуумного отжига и механической шлифовки; г – после механической шлифовки и виброполировки с использованием модифицированных ДНА

В результате проведенных экспериментов установлено, что примесь азота не оказывает заметного влияния на качество механической шлифовки поверхности подложек их НРНТ-алмазов. Для образцов с высоким содержанием примеси никеля обнаружено образование зоны со значительной неоднородностью рельефа поверхности в центральной области кристалла. В этой области регистрируется наличие большого количества впадин глубиной до 30 нм (рисунок 1, а). В результате среднее значение шероховатости поверхности  $R_a$  для этих образцов составляет 6–8 нм, в то время как для образцов с низким содержанием примеси никеля эти значения находятся в интервале 2–3,5 нм (рисунок 1, б). Образование этой зоны может быть связано с изменением механизма износа области кристалла с повышенным содержанием никеля.

Вакуумный отжиг позволяет эффективно воздействовать на дефектно-примесную структуру и физические характеристики НРНТ-алмазов. Для кристаллов с низким содержанием примеси никеля в результате вакуумного отжига при  $T = 1500^\circ\text{C}$  наблюдается полное исчезновение поглощения

связанного с одиночными атомами никеля. Как следствие регистрируется увеличение теплопроводности кристаллов на 40–50 % и улучшение обрабатываемости поверхности при механической полировке (рисунок 1, в). Для кристаллов с высоким содержанием примеси никеля в результате вакуумного отжига наблюдается образование дислокаций. Теплопроводность кристаллов снижается на 30–40 %. Кроме того, наблюдается увеличение значений  $R_a$ .

Финишная полировка с использованием субмикронных алмазных порошков снижает шероховатость поверхности алмазных пластин по сравнению с механической шлифовкой в 2–3 раза. Значения  $R_a$  для готовых подложек находятся в диапазоне от 1,1 до 1,7 нм. Полировка с использованием в качестве полировальной суспензии смеси субмикронных алмазных порошков и модифицированного ДНА показывает наибольшую эффективность. Шероховатость поверхности алмазных пластин снижается до уровня 0,35–0,4 нм (рисунок 1, г). Следует отметить, что полученный уровень шероховатости поверхности подложек близок к значению постоянной решетки алмаза 0,357 нм. Таким образом, можно говорить об атомно-гладкой поверхности изготовленных алмазных подложек.

**Вывод.** Из приведенных выше экспериментальных результатов следует, что комплексный подход, основанный на отборе кристаллов по содержанию примеси никеля, проведении предварительного вакуумного отжига, механической шлифовки и финишной полировки с использованием в качестве полировальной суспензии субмикронных алмазных порошков и модифицированных наноалмазов детонационного синтеза позволяет получать атомно-гладкие поверхности НРНТ алмазных подложек с шероховатостью  $R_a \leq 0,4 \text{ nm}$ .

#### Литература

1. Large-area high-quality single crystal diamond / M. Schreck [et al.] // MRS Bull. – 2014. – V. 39. – P. 504–510.
2. Crystal growth of diamond / Y.N. Palyanov [et al.] // In: Handbook of crystal growth: bulk crystal growth. – 2nd ed. – New York (NY): Elsevier, 2015/ – P. 671–713.
3. Umezawa, H. Recent advances in diamond power semiconductor devices / H. Umezawa // Materials Science in Semicond. Processing. – 2018. – V. 78. – P. 147–156.
4. Miet, S. Integrated photonic devices in single crystal diamond / S. Miet // J. Phys. Photonics. – 2020. – V. 2. – P. 042001.
5. Polishing and planarization of single crystal diamonds: state-of-the-art and perspectives / H. Luo [et al.] // International Journal of Extreme Manufacturing. – 2021. – V. 3, № 2. – P.022003.
6. Hicks, M. L. Polishing, preparation and patterning of diamond for device applications / M. L. Hicks, A. C. Pakpour-Tabrizi, R. B. Jackman // Diam. Relat. Mater. – 2019. – V. 97. – P.107424.