

Life-sized cell high-pressure apparatus which makes it possible to grow a single crystal diamond growth in two layers was developed. The optimal size of the heating elements to provide a set of values of temperature gradient were calculated.

Key words: *high-pressure, diamond, temperature gradient, modeling.*

Література

1. Новіков М. В. Вирощування та термобарична обробка монокристалів алмазу при надвисоких тисках з контрольованим домішковим складом / М. В. Новіков, С. А. Ивахненко // Фізико-технічні проблеми сучасного матеріалознавства : В 2 т. Т. 2, ред. кол. И.К. Походня (предис.) и др.- К. : Академперіодика, 2013. – С. 33–53.
2. Strong H. M. The Growth of large diamond crystals / Strong H. M. Wentorf R. H. // Die naturwissenschaften. – 1979. – V. 59. – №1. P. 1–7.
3. Ивахненко С.А. Выращивание крупных монокристаллов алмаза в области термодинамической стабильности: в 2 т. – т. 1 «Синтез алмаза и подобных материалов» // Сверхтвердые материалы. Получение и применение. – под общ. ред. акад. НАН Украины Н. В. Новикова. С. А. Ивахненко, Н. В. Новиков – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2003. – С. 179–199.
4. Ивахненко С.А. Компьютерное моделирование распределения температурных и концентрационных полей при выращивании монокристаллов алмаза различного габитуса / С. А. Ивахненко, А. А. Будяк, С. Н. Шевчук // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения : сб. науч. тр. – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. – 2004. – Вып. 7. – С. 140–144.

Надійшла 13.06.15

УДК 620.3

**М.А. Цысарь; А.П. Чепугов, канд. тех. наук; С.А. Ивахненко, член-корр. НАН Украины;
А.А. Лещук, д-р техн. наук**

Институт сверхтвердых материалов им В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

ЗОНДЫ С АЛМАЗНЫМ ОСТРИЕМ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

Рассмотрены зонды на базе остриев из монокристалла алмаза, легированного бором, а также этапы отбора и подготовки пригодных для изготовления зондов алмазных образцов. Оценена работоспособность полученных зондов при сканировании образцов, поверхность которых обладает развитой топографией.

Ключевые слова: *сканирующая туннельная микроскопия, алмаз типа IIb, зонд СТМ, алмазное острие.*

Исторически первым в семействе зондовых микроскопов появился сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) [1].

Принцип работы СТМ основан на явлении туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер между острием зонда и поверхностью образца с достаточным уровнем проводимости, стимулируемым внешним электрическим полем [2]. Высокое пространственное разрешение СТМ определяется экспоненциальной зависимостью туннельного тока от расстояния до поверхности; разрешение в направлении по нормали к поверхности достигает долей ангстрема. Принципиальным ограничением для СТМ является требование наличия туннельнопрозрачного барьера для носителей тока в системе “проводящая подложка – проводящая игла” в качестве зонда.

При этом могут быть более или менее корректно интерпретированы результаты измерений, выполненных в условиях сверхвысокого вакуума либо в электрохимических ячейках для поверхностей полупроводников и металлов. На воздухе можно изучать только поверхности, не подверженные окислению, с образованием диэлектрических окислов (поверхности благородных металлов, графит и некоторые другие высокостабильные материалы). В общем случае интерпретация СТМ-топографии не однозначна, требует привлечения модельных приближений. Начиная с 1983 опубликовано около сотни работ [3] по теоретической интерпретации СТМ изображений, причем существенная их часть посвящена общим вопросам СТМ, что подтверждает сложность и многофакторность исследуемой проблемы.

Традиционно в сканирующих туннельных микроскопах используются зонды нескольких типов. В первое время наиболее широко применяли зонды из вольфрамовой проволоки, изготовленные методом электрохимического травления с приложением постоянного тока [4]. Такую широкоизвестную технологию использовали для приготовления эмиттеров для автоионных микроскопов. Необходимо отметить, что зонд, полученный методом электрохимического травления из вольфрамовой проволоки диаметром 0,2 мм, может иметь острие с радиусом закругления вершины 100 Å [5]. Другая широко применяемая методика приготовления СТМ зондов – перерезание тонкой проволоки из PtIr сплава обыкновенными ножницами под углом в 45° при приложении к проволоке усилия на разрыв. В настоящее время для изготовления острия зонда СТМ используют металлическую проволоку из W, Ta, Fe или благородных металлов и их сплавов (Au, Pt, Ir, PtIr, PtRh). Для заострения используют методы химического травления или механическую обработку [2].

Использование описанных материалов обусловлено их высокой проводимостью и простотой изготовления зондов на их основе. Однако они имеют также и недостатки: острия таких зондов обладают низкой формостойкостью и взаимодействуют с окружающей воздушной средой, что требует для нормальной работы обязательного проведения сканирования в условиях вакуума от 10^{-5} торр. Такие острия непригодны для анализа полупроводников или поверхностей, обладающих мозаичной структурой с зонами разной проводимости, так как их сканирование осуществляется в полуконтактном режиме, что приводит к неизбежному повреждению острия в зоне контакта и загрязнением его материалом исследуемой поверхности.

Кроме зондов, изготовленных из традиционных для СТМ материалов, известны зонды СТМ, полученные с применением углеродных нанотрубок, присоединенных к нихромовой проволоке [6], кремниевое острие, покрытого золотом [7] или вольфрамом [8], а также металлического острия с кластером золота на конце [9]. Впрочем, такие зонды тяжелы в производстве и имеют низкую повторяемость результата.

Использование алмаза при производстве зонда СТМ для исследования микро- и наноструктур обеспечивается его преимуществами по сравнению с традиционными используемыми для этого материалами [10, 11] Это обусловлено большей формостойкостью алмаза: при работе не изменяется форма и не нарушается структура острия от соприкосновения с поверхностью исследуемого материала; можно многократно использовать такие зонды без переточки и очистки; они просты в обслуживании и абсолютно инертны.

Внедрять алмаз для расширения возможностей СТМ, предложил еще Г. Бинниг [12]. В настоящее время известны попытки применения алмазов для изготовления острия зонда СТМ. Так, в [13] получен зонд с радиусом закругления алмазного острия 100 нм, проводимость острия которого обеспечивалась применением метода ионной имплантации. Аналогично получили алмазное острие CVD методом, имплантированное бором [14] с возможностью многократного использования такого зонда благодаря слабому износу.

Кроме того, создание зонда СТМ с острием из монокристаллов алмаза должно обеспечить возможность проведения операций нанолитографии (индентирование, склерометрию, запись и считывание данных с высокой плотностью и др.), а также сканирования в агрессивных условиях.

Таким образом, использование алмаза позволит значительно повысить эксплуатационные характеристики зондов, а потому разработка методики изготовления и аттестации таких зондов является актуальной.

В настоящей работе в качестве материала острия зонда СТМ использованы монокристаллы полупроводникового алмаза (тип IIb), легированного примесью бора. Для эффективного применения зонда СТМ оно должно соответствовать определенным требованиям.

Во-первых, вершина острия зонда должна обладать как можно меньшим радиусом закругления. Поскольку формирование изображения напрямую зависит от ширины канала туннелирования, вершина острия зонда должна обеспечивать наименьшую площадь сканирования, определяющую разрешающую способность прибора. Таким образом, для повышения разрешения необходимо чтобы площадь сканирования стремилась к точке.

Во-вторых, геометрия острия зонда должна быть сформирована так, чтобы расстояние от вершины острия зонда до объекта сканирования не превышало расстояния от боковых поверхностей зонда до объекта. Это требование обусловлено необходимостью предотвращения туннелирования через боковые поверхности зонда при сканировании неатомарногладких объектов. Важность этого аспекта определена механизмом методики СТМ, поскольку получаемое при сканировании изображение является сверткой формы острия и рельефа поверхности; при туннелировании через боковые поверхности зонда снятое изображение не будет соответствовать рельефу.

В-третьих, контакт «корпус – острие зонда» должен иметь стабильно омические характеристики. Проходящий через острие ток не должен искажаться из-за влияния различных барьеров. В кристаллической структуре алмаза не должно быть включений и дефектов, которые в значительной степени изменяют электропроводность материала острия и значительно усложняют обработку данных контакта «зонд – образец».

В-четвертых, прочность кристалла алмаза должна быть достаточной для возможности как формирования острия необходимой геометрии, так и реализации индентирования исследуемых поверхностей.

Представленные требования предусматривают определенные ограничения относительно кристаллов для изготовления зондов СТМ, а следовательно, изготовление зонда с алмазным острием предполагает проведение ряда операций, обеспечивающих соответствие этим требованиям. Таким образом, для получения зондов СТМ требуются следующие технологические операции:

- выращивание монокристаллов алмаза типа IIb с достаточным уровнем проводимости;
- оценка особенностей секториального строения и распределения примесного состава выращенных образцов;
- сортировка полученных кристаллов и отбор образцов с развитием секторов роста $\{111\}$ 80–85 %;
- изготовление путем механической обработки секториально однородных заготовок, объем которых формируется сектором $\{111\}$ на 100 %;
- оценка качества полученных заготовок и их отбор по требуемым характеристикам для использования в зондах;
- очистка от образовавшихся на предыдущих этапах подготовки загрязнителей и подготовка поверхности заготовок острия;
- закрепление обработанных заготовок острия в корпусе зонда;
- формирование у острия зонда вершины необходимой геометрии;
- технологические операции, предполагающие создание необходимых для установки в микроскоп элементов крепления и формирование окончательных размеров зонда;
- испытание и калибровка зондов СТМ с использованием эталонных образцов для сканирования.

Для изготовления зондов СТМ использовали несколько партий монокристаллов алмаза типа IIb различного уровня легирования. Выращивали монокристаллы алмаза методом температурного градиента с помощью аппарата высокого давления (АВД) типа «тороид» с соответствующей ростовой ячейкой [15]. Для получения кристаллов алмаза, обладающих полупроводниковыми свойствами, использовали предварительно изготовленный источник углерода из порошка ГСМ-1 с различной концентрацией легирующей добавки бора. Выращивания осуществляли при температуре $1350 \div 1450$ °С и при давлении 6 ГПа. Давление и температуру в ростовой зоне определяли по усилию пресса и мощности пропускаемого через систему резистивного нагрева переменного тока, соответственно, согласно проведенным ранее калибровкам [16].

Получаемые в области термодинамической стабильности алмаза методом температурного градиента кристаллы характеризуются сложной зонально-секториальной структурой, могут содержать дефекты, напряжения в структуре, включения сплава - растворителя; вследствие чего, не все кристаллы пригодны для изготовления зондов СТМ. Исходя из требований к конечному устройству и технологических требований, обусловленных необходимыми при подготовке острия операциями, разработали методику отбора и подготовки кристаллов алмаза. Для изготовления зондов отбирали наиболее однородные по зонально-секториальному строению и, соответственно, распределению примесей бора и компенсирующего азота, образцы монокристалла алмаза.

Согласно проведенным ранее исследованиям электрофизических свойств [17] и внутренней структуры [18] полупроводниковых монокристаллов алмаза, выращенных методом температурного градиента, возможно получение кристаллов различного габитуса; варьирование условий выращивания позволяет управлять развитием пирамид роста принадлежащих различным ростовым формам, что значительно влияет на свойства кристаллов. Из соображений уменьшения сопротивления наиболее целесообразно применять кристаллы, в формировании объема которых наибольшую роль играют пирамиды роста $\{111\}$. В этой связи, для изготовления заготовок для острия зондов отбирали кристаллы, наиболее близкие по габитусу к представленному на рис. 1.

В дальнейшем наиболее подходящие кристаллы использовали для изготовления алмазных заготовок цилиндрической формы, образующая линия которой перпендикулярна поверхности одной из граней формы $\{111\}$.

Наличие большого количества включений и напряжений в области острия зонда приводит к нестабильности в процессе сканирования, так как формирующееся на них внутреннее поле объемного заряда существенно влияет на перенос заряда. В этой связи для формирования острия лучшего качества старались выбрать область заготовки с наименьшим количеством включений или свободной от них. Отбор грани, на которой должно размещаться рабочее острие зонда, базировался на визуальной оценке наличия в приповерхностном слое дефектов строения и включений.

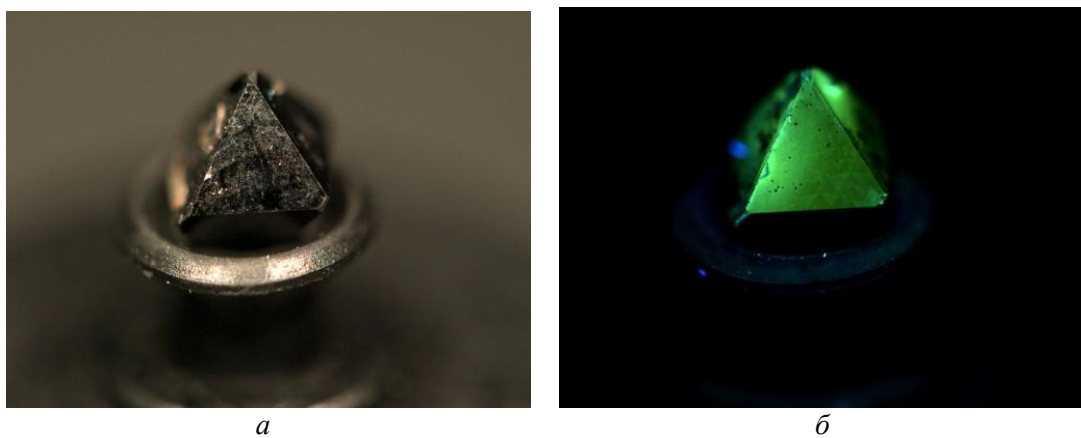


Рис. 1. Оптическое изображение (а) и фотолюминесцентное свечение (б) кристалла алмаза типа IIb с 100 % площадным развитием граней формы $\{111\}$

После промежуточного контроля на этапе формирования структуры острия отобрали заготовки, весь объем которых был сформирован пирамидой роста $\{111\}$ (рис. 2), так как использование зонда, острие которого изготовлено из такого образца, позволяет рассчитывать на наиболее стабильный процесс туннелирования.

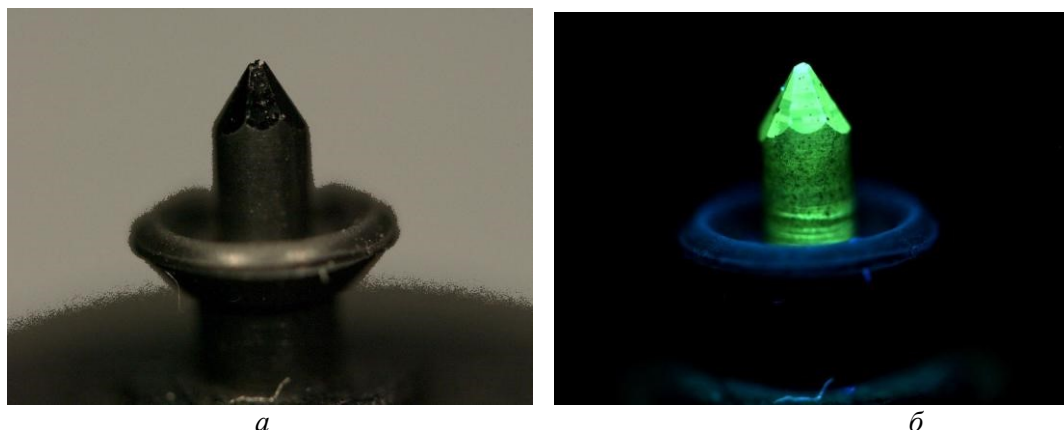


Рис. 2. Оптическое изображение и фотолюминесцентное свечение алмазной заготовки для острия СТМ

Для создания стабильного электрического контакта между корпусом зонда и алмашной заготовкой острия поверхность отобранных заготовок очистили от пыли, металлов, графита и жиров, образовавшихся на предыдущих этапах.

При очистке поверхности образцов выполнили следующие основные операции:

- очистку поверхности образцов от органических веществ;
- обработку поверхности образцов для удаления следов графита и металлических примесей;
- промывку и кипячение в дистиллированной воде для удаления с поверхности образцов остатков использованных реагентов;
- промывку образцов в этиловом спирте и сушку в парах этилового спирта на воздухе.

Для очистки от органических веществ поверхность образца обработали в этиловом спирте (возможна обработка другим растворителем органических веществ) в течение ~ 5 мин. После этого образец промыли дистиллированной водой и обработали хромовой смесью (раствор серной кислоты и 50 % раствор хромового ангидрида) при температуре 60 – 70 °С в течение ~ 5 мин. После такой обработки образец тщательно промыли горячей дистиллированной водой до нейтральной реакции промывных вод (рН = 7). На последнем этапе образец просушили в парах этилового спирта на воздухе до визуального сухого состояния.

Для обеспечения омического контакта на очищенную поверхность напылили покрытие. Важным аспектом этой операции является равномерное покрытие частей заготовок, контактирующих с частями корпуса, по которым проходит ток. В целях получения зондов с единообразными характеристиками напыление проводили одновременно на партию образцов.

Заготовки острия, подготовленные по приведенной методике, после проверки механической прочности и качества покрытия закрепили в корпусе зонда, как указано на рис. 3 (заготовку фиксируют в предварительно высверленном отверстии в корпусе зонда и припаивают припоями на основе серебра, что дает качественное механическое закрепление, низкое электрическое сопротивление соединения алмазное острие – корпус).

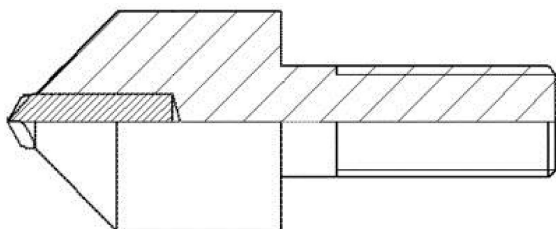


Рис. 3. Эскиз зонда СТМ с острием из монокристалла алмаза типа IIb

Минимально возможная величина канала туннелирования обеспечивается огранкой зафиксированного в корпусе образца в виде трехгранной пирамиды Берковича. Такая огранка

наиболее предпочтительна, так как позволяет получать острие, наиболее близкое по геометрии к точечному (что позволяет обеспечить атомарное разрешение при сканировании).

Финальный этап изготовления зонда СТМ охватывает технологические операции, позволяющие сформировать необходимые для установки в сканирующей головке микроскопа элементы крепления и фиксации, а также формирование окончательных размеров зонда. Зонды выполнили с максимальным диаметром корпуса ~ 5 мм; в хвостовой части формировали резьбовое соединение М2 (рис. 4).

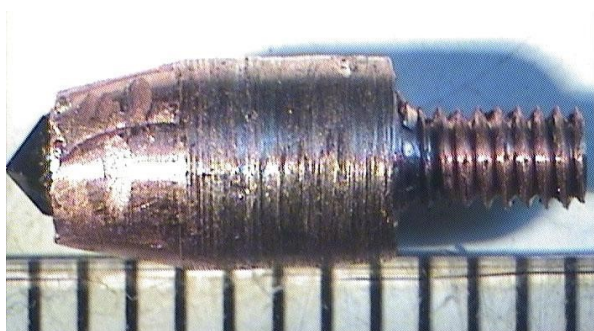
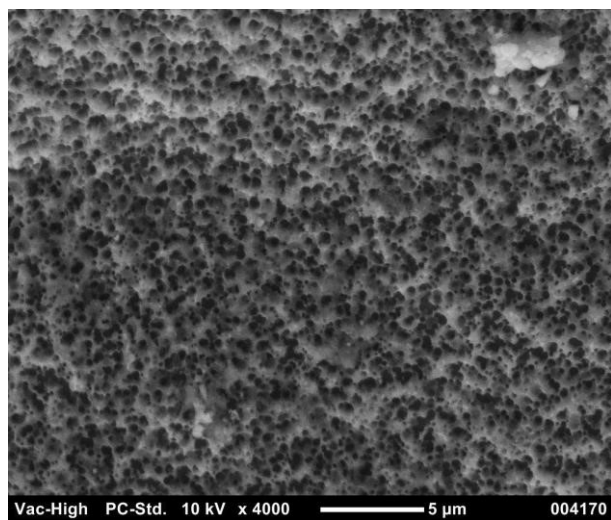


Рис. 4. Зонд СТМ с полупроводниковым алмазным острием (форма острия – пирамида Берковича)

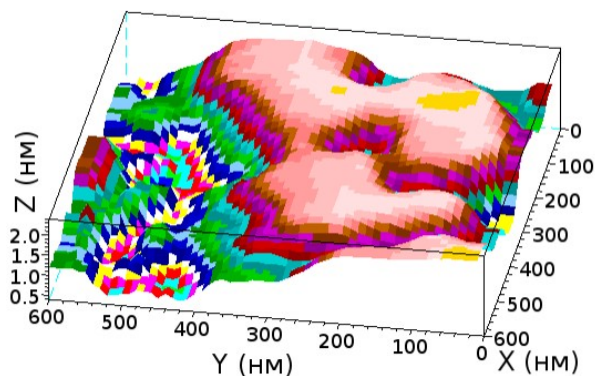
Удельное сопротивление области острия зонда, сложенной пирамидой роста (111), для партии кристаллов одного уровня легирования различалось не более чем на $\pm 5\%$. После сборки и финальной обработки общее сопротивление зонда (интегральное сопротивление системы от элемента крепления корпуса до рабочей зоны острия) составляло 0,1 кОм.

Результаты тестового сканирования (рис. 5) и проверки работоспособности полученных зондов показали их применимость для изучения соответствующих образцов, а достигнутая разрешающая способность – для анализа структуры поверхности образцов в диапазоне вплоть до нанометрового [19].

Согласно результатам тестирования, изготовленные зонды применимы в методе туннельного сканирования для работы не только в бесконтактных режимах в вакууме, но и воздушной, водной среде или растворах [20]; форма и радиус закругления острия полученных зондов позволяют сканировать поверхности с развитой топографией (объекты высотой более 15 нм) [21], что доступно для металлических зондов, исследовать мозаичные структуры с областями различной проводимости, а также определять размеры включений диэлектриков в матрице проводящего материала [22].



а



б

Рис. 5. Изображение поверхности графенового покрытия на компакте УДА, полученное на электронном микроскопе JEOL JCM-5000 NeoScope™, $\times 4000$ (а); СТМ-изображение, полученное с использованием зонда с алмазным острием при параметрах туннелирования $U_t = 0,3$ В; $I_t = 1$ нА (б).

Практика использования зонда СТМ с алмазным острием при сканировании упомянутых материалов показала высокую воспроизводимость экспериментальных данных, что доказывает его

более высокую формостойкость и долговечность по сравнению с классическими зондами.

В связи с вероятностью получения некачественного контакта заготовки острия с корпусом зонда при пайке на этапе крепления заготовки, сложностью формирования заготовки острия из алмаза, а также необходимостью индивидуального проектирования и изготовления корпуса зонда целесообразно применять методы порошковой металлургии. Такое изменение технологического процесса позволит исключить операции прецизионного точения и пайки, что должно положительно сказаться на выходе работоспособных зондов для СТМ. Такие зонды требуют дальнейших исследований.

Розглянуто зонди на базі вістер з монокристалу алмазу легованого бором, а також етапи відбору та підготовки придатних для виготовлення зондів алмазних зразків. Оцінено працездатність отриманих зондів при скануванні зразків, поверхня яких має розвинену топографію.

Ключові слова: скануюча тунельна мікроскопія, алмаз типу IIb, зонд

The article deals with the probes based on the tip made from singlecrystal diamond doped with boron. The stages of selection, preparation of samples of diamond, suitable for the manufacture of probe. Estimated performance derived probes for scanning the surface of the sample which has developed the topography.

Key words: scanning tunneling microscopy, type IIb diamond, STM probe, diamond tip.

Литература

1. Бинниг Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности / Г. Бинниг, Г. Рорер // Успехи физ. наук. – 1988. – Т. 154. – № 2. – С. 261–278.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов. – Нижний Новгород: Ин. физики микроструктур РАН, 2004. – 114 с.
3. Tersoff J. Theory of the Scanning Tunneling Microscope / J. Tersoff // The Structure of Surfaces. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1985. – V. 2. – P. 54–54.
4. Ibe J. P. On the electrochemical etching of tips for scanning tunneling microscopy / J. P. Ibe // J. Vac. Sci.&Techn. A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 1990. – V. 8. – № 4. – P. 3570.
5. Холстинина Н. Н. Методика изготовления и аттестация вольфрамовых игл для СТМ / Н. Н. Холстинина, Д. В. Сурнин // Вестник Удмуртского Университета. – 2007. – № 4. – С. 142–145.
6. Сеницына О. Технологии производства новых материалов и устройств с углеродными нанотрубками в качестве рабочих элементов / О. Сеницына, Г. Мешков, Н. Пискунов и др. // Наноиндустрия. – 2008. – № 4. – С. 20–23.
7. Bale M. Microfabrication of silicon tip structures for multiple-probe scanning tunneling microscopy / M. Bale, R.E. Palmer // J. Vac. Sci.&Techn. B: Microelectronics and Nanometer Structures. – 2002. – V. 20. – № 1. – С. 364.
8. Choi C.-H. Fabrication of a dense array of tall nanostructures over a large sample area with sidewall profile and tip sharpness control / C.-H. Choi, C.-J. Kim // Nanotechnology. – 2006. – V. 17. – № 21. – P. 5326–5333.
9. Highly reproducible low temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy with in situ prepared tips / A. Castellanos-Gomez, G. Rubio-Bollinger, M. Garnica, et al. // Ultramicroscopy. – 2012. – V. 122. – P. 1–5.
10. Handbook of micro/nanotribology. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 1999. – 859 p.
11. Вавилов В.С. Электронные и оптические процессы в алмазе / В.С. Вавилов, А.А. Гиппиус, Е.А. Конорова. – М. : Наука, Глав. Ред. физ.-мат. л-ры, 1985. – 120 с.
12. Binnig G Atomic force microscope / G. Binnig, C.F. Quate, C. Gerber // Physical Review Letters. – 1986. – V. 56. – № 9. – P. 930–933.
13. Kaneko R. Ion-Implanted Diamond Tip for a Scanning Tunneling Microscope / R. Kaneko, S. Oguchi // Jap. J. Appl. Phys. – 1990. – V. 29. – № 9 (Part 1). – P. 1854–1855.
14. Hu J. Hot filament chemical vapour deposition of diamond ultramicroelectrodes / J. Hu, J.S. Foord, K.B. Holt // Phys. Chem. Chem Phys. – 2007. – V. 9. – № 40. – P. 5469.
15. Пат. 47797 А. Апарат високого тиску і температури: / О.А. Будяк, С.О. Івахненко, І.С. Білоусов – Опубл. 05.07.2002.

16. Методика дифференциального термического анализа при давлениях до 8 ГПа. –К. : ИСМ НАН УССР, 1989. – 16с.
17. Чепугов А. П. Особенности электрофизических свойств полупроводниковых алмазов, выращенных методом температурного градиента / А. П. Чепугов, А. Н. Катруша, Л. А. Романко и др. // XIV Міжнар. конф. «Породоруйнівний та металооброблюючий інструмент – техніка, технологія його виготовлення та використання». – Морське, 2011.
18. Чепугов А. П. Особенности внутренней структуры крупных полупроводниковых монокристаллов алмаза, выращенных методом температурного градиента / А. П. Чепугов, И. А. Емельянов, В. В. Лысаковский, О. Г. Лысенко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент - техника и технология его изготовления и применения. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2012. – Т. 15. – С. 277–282.
19. Чепугов О. П. Особливості підготовки зонда з напівпровідникового монокристалу алмазу, легованого бором / О. П. Чепугов, М. О. Цисар, С. О. Ивахненко, О. О. Лещук // Наукові нотатки. – 2013. – № 41 (Ч. 2). – С. 251–255.
20. Kleinert M. Co deposition on Au(111) and Au(100) electrodes: an in situ STM study / M. Kleinert, H.-F. Waibel, G.E. Engelmann, H. Martin, D.M. Kolb // Electrochimica Acta. – 2001. – V. 46. – № 20-21. – P. 3129–3136.
21. Цисар М. О. Фрактальный анализ изображения поверхности нанесенного плазмой покрытия молибдену на нанорівні / М. О. Цисар // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – Т. 1. – № 2. – С. 529–550.
22. Новиков Н. В. Влияние добавок нанодисперсных алмазов на физико-механические свойства металлической матрицы бурового инструмента / Н. В. Новиков, Г. П. Богатырева, Р. К. Богданов и др. // Сверхтвердые материалы. – Т. 2011. – № 4. – С. 70–77.

Поступила 22.06.15

УДК 621.921.34-544.77.052.22:628.31

Г. Д. Ильницкая, Н. А. Олейник, кандидаты технических наук,
В. В. Тимошенко, И. Н. Зайцева, Г. А. Базалий, Ю. П. Ущаповский¹;
Л. П. Антоненко, канд. хим. наук²;

¹*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

²*Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев*

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ Порошков синтетических алмазов

Показано, что повышение экологической безопасности методов получения порошков синтетических алмазов достигается путем обезвреживания технологических сливов после извлечения алмазного сырья от содержания в них тяжелых металлов до предельно допустимых норм реагентным методом с использованием сначала гидроксида кальция, а затем флокулянтов; для очистки питьевой воды целесообразно применение фильтров с добавлением нанопорошков алмаза.

Ключевые слова: технологические сливы, экологическая безопасность, тяжелые металлы, флокулянт, очистка питьевой воды.

Введение

На современном этапе промышленного развития основной тенденцией технического прогресса является технологическое совершенствование производства. К устойчивым тенденциям промышленного развития относится постоянное расширение круга материалов, используемых для изготовления промышленных изделий в атомной технике, электронике, горной технике и др. При