

## РАДИАЦИОННО СТОЙКИЕ ДЕТЕКТОРЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Particle detectors based on synthetic monocrystalline diamond of Minsk production are described. Diamonds are synthesized with multianvil apparatus of «split sphere» type. Detector with charge collection distance 106 mcm is produced with help of preliminary crystal selection depending on their optical spectra.

С развитием экспериментальной физики высоких энергий требования к радиационной стойкости детекторов заряженных частиц неуклонно повышаются. Поиск явлений новой физики, выходящих за рамки стандартной модели, требует регистрации полной картины взаимодействия, в том числе частиц и струй, вылетающих под малыми углами к оси пучков. Детекторы, расположенные под малыми углами к оси взаимодействующих пучков, работают в тяжелейших радиационных условиях, нагрузки здесь превышают 10 МГр в год. Кремний и пластиковый сцинтиллятор таких радиационных нагрузок не выдерживают. Поэтому проблема создания сверхстойких в радиационном отношении материалов, обладающих способностью регистрировать заряженные частицы, стоит в настоящее время весьма остро.

Алмаз как самое твердое естественное вещество, обладающее многими исключительными свойствами благодаря высокой энергии связи кристаллической решетки, давно привлекает внимание в качестве возможного детекторного материала. Экспериментально установлена его высокая радиационная стойкость, намного превосходящая радиационную стойкость кремния и пластика [1–3]. Широкая запрещенная зона алмаза позволяет обойтись без обратносмещенного  $p-n$ -перехода, что придает ему дополнительную привлекательность. Высокая прочность и теплопроводность также весьма полезны в условиях жестких требований к минимизации количества пассивного материала на пути частиц. Очень малые токи утечки (порядка  $10^{-12}$  А) упрощают проблему теплоотвода и снижают требования к источникам напряжения смещения.

Возможность использования алмаза в качестве детекторного материала активно исследуется в настоящее время во всем мире. Работы ведутся в основном с поликристаллическим CVD-алмазом из-за более простой технологии его синтеза (нет необходимости в сверхвысоких давлениях) и потенциальной возможности покрыть большие площади CVD-пластинами. Здесь достигнуты определенные успехи [4–9], однако они сводятся, как правило, к созданию экспериментальных образцов позиционно-чувствительных детекторов, где достаточно порогового срабатывания. Если же речь идет об измерении энергии, поликристаллические пластины подходят плохо, поскольку амплитуда отклика сильно

---

\* Авторы статьи – сотрудники Национального центра физики частиц и высоких энергий БГУ.

зависит от того, попала ли частица в центр кристаллита или в межкристаллитную границу. Для таких применений более подходящим является монокристаллический алмаз. Работы в этом направлении тоже ведутся [10–12], однако (судя по количеству публикаций) в значительно меньшем объеме, чем с CVD-пластинами.

### Синтетические алмазы производства РУП «Адамас»

Синтез алмазов производится с помощью беспрессовых аппаратов типа «разрезная сфера» (БАРС) [13–15] при температуре около 1600 °С и давлении порядка 60 000 атм методом температурного градиента в расплаве Fe-Ni. Кристаллы имеют характерный желтый цвет, среднее содержание азота составляет  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Кристаллы относятся к классу 2b по физической классификации, т. е. содержат азот в виде С-дефектов (единичные атомы азота, замещающие атомы углерода в алмазной кристаллической решетке). Длина грани у основания составляет в среднем 4–5 мм, возможен синтез кристаллов с длиной грани до 8 мм.

### Отбор кристаллов

Из литературы [16] известно, что положение края спектра поглощения кристалла алмаза зависит от содержания азота.

Поэтому для отбора кристаллов использовался оптический стенд на основе монохроматора МДР-12 и ксеноновой лампы РХ-2. С его помощью была исследована партия из восьми кристаллов. Спектры прозрачности показаны на рис. 1.

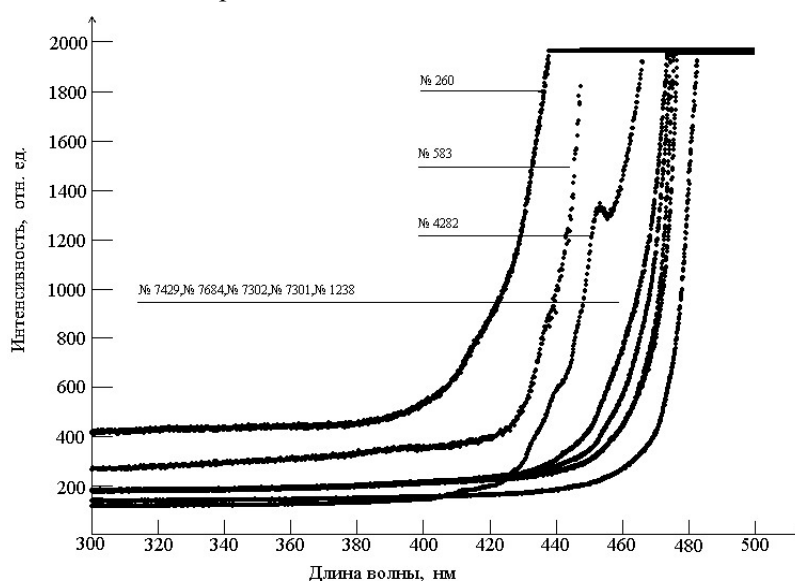


Рис. 1. Спектры прозрачности восьми исследованных кристаллов

Из восьми кристаллов для дальнейшей работы были выбраны три – № 260, № 583 и № 4282, поскольку они смещены в более коротковолновую область спектра.

### Термобарическая обработка

Отобранные кристаллы были подвергнуты термобарической обработке с целью увеличения времени жизни свободных носителей заряда.

Время жизни свободных носителей заряда ограничивается атомами примесей, которые их захватывают. Основной примесью в алмазе является азот, атомы которого (в случае синтетического алмаза) образуют С-дефекты, которые с помощью термобарической обработки (отжиг под давлением) можно трансформировать в А-дефекты, представляющие собой попарно сгруппированные атомы азота. Лишние валентные связи в этом случае замкнуты друг на друга, поэтому А-дефекты значительно меньше влияют на свободные носители заряда, чем С-дефекты.

Термобарическая обработка кристаллов проводилась с использованием тех же аппаратов высокого давления, что и при синтезе, при стабилизирующем давлении  $P = 6,7 \text{ ГПа}$  и температуре 1900 °С. Длительность обработки 4 ч.

### Металлизация алмазных пластин

Качественная металлизация имеет большое значение при изготовлении алмазного детектора, поскольку наличие дефектного слоя и образование диода Шоттки на границе алмаз/металл уменьшают напряженность электрического поля внутри пластины, снижая тем самым эффективность регистрации заряженных частиц.

Для удаления дефектного поверхностного слоя было применено травление в расплаве селитры при температуре 700 °С. Метод позволяет убрать несколько десятков нанометров и является несложным и эффективным способом химической полировки поверхности алмаза.

Непосредственно перед металлизацией проводилась обработка подложек в хромпике в течение 20 мин при 100 °С с последующим двойным кипячением (по 15 мин) в деионизованной воде.

Слой титана наносился при комнатной температуре с помощью магнетронного распыления при постоянном токе в одном цикле с последующим нанесением золота методом термического испарения. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон. Толщина слоя титана и слоя золота составляли 0,05 мкм. Термообработка образцов для карбидизации области границы раздела алмаз/титан проводилась в вакууме при температуре 700÷800 °С в течение 1 ч.

#### Измерение эффективной длины сбора заряда

Эффективная длина сбора заряда измерялась с помощью установки, схематически изображенной на рис. 2. Два ФЭУ включены на совпадение для увеличения эффективности триггерной системы. Сцинтилляторы представляют собой полоски сцинтиллирующего пластика, обернутые фольгой, и, таким образом, являются также и световодами, подводящими сигнал к ФЭУ. Коллиматор изготовлен из парафина для уменьшения гамма-фона, поскольку парафин состоит в основном из водорода, а чем меньше заряд ядра, тем меньше интенсивность тормозного излучения.

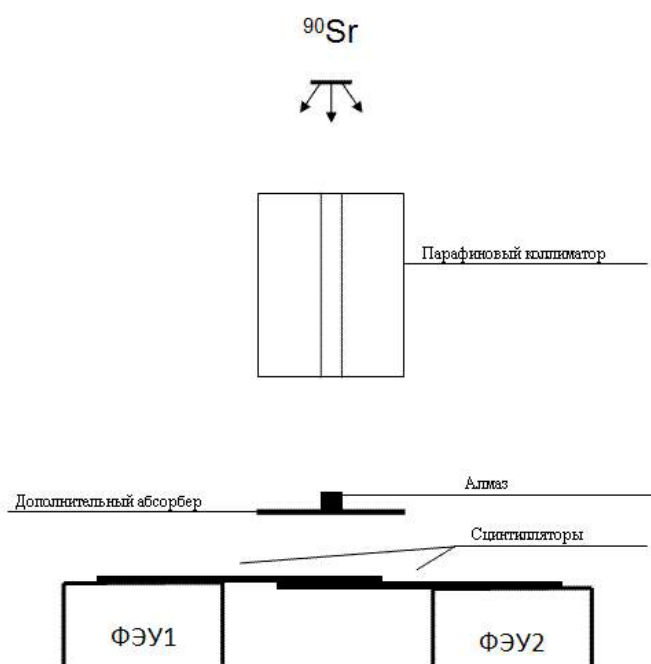


Рис. 2. Схема установки для измерения эффективной длины сбора заряда

Дополнительный абсорбер понадобился потому, что толщины алмаза (400 мкм) оказалось недостаточно, чтобы поглотить все  $\beta$ -частицы, кроме минимально ионизирующих.

На рис. 3 представлен спектр отклика на МИР (минимально ионизирующая частица) одного из исследованных алмазов.

Эффективная длина сбора заряда образца № 260, вычисленная в соответствии с полученным спектром (см. рис. 3), составила 106 мкм.

#### Новые каталитические среды

Типовой техпроцесс (синтез в каталитической среде Fe-Ni), используемый на РУП «Адамас», оптимален для производства ввиду его толерантности к колебаниям основных параметров (температура и давление), что обеспечивает максимальный выход годных кристаллов. Однако он не идеален для кристаллов, применяемых в качестве детектора, поскольку содержание примесей довольно высоко. Геттерные присадки (алюминий, титан, цирконий) способны снизить количество примесей (за счет связывания их на этапе синтеза). Поэтому было проведено тестирование модифицированной каталитической среды (Fe-Ni-Al) с малым количеством алюминия (доли процентов), не нарушающим общей динамики процесса.

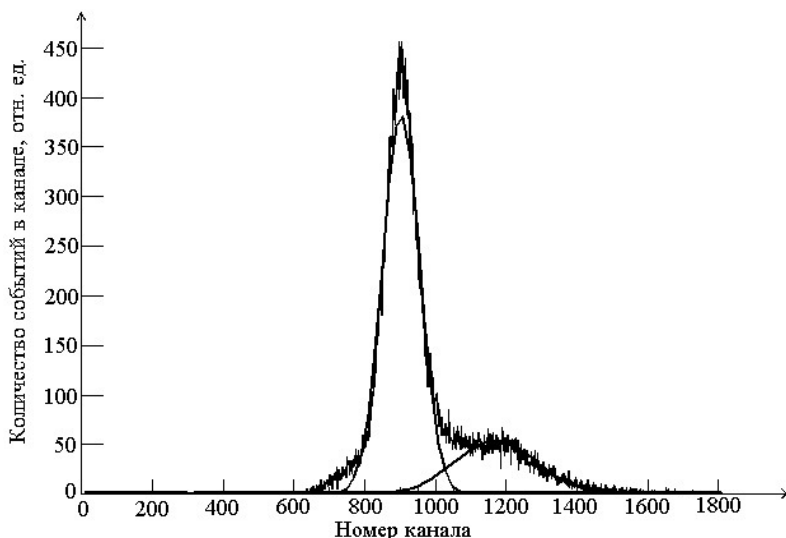


Рис. 3. Спектр отклика на минимально ионизирующую частицу образца № 260

\* \* \*

Таким образом, показана возможность изготовления детекторов заряженных частиц на основе искусственных монокристаллических алмазов белорусского производства (РУП «Адамас»), синтезированных с помощью беспрессового аппарата типа «разрезная сфера» (БАРС). С помощью предварительного отбора кристаллов по оптическим спектрам изготовлен детектор с эффективной длиной сбора заряда 106 мкм.

Были синтезированы два кристалла в среде Fe-Ni-Al (алюминий является геттером, связывающим азот во время синтеза). Исследование с помощью оптического спектрометра показало, что края спектров поглощения этих кристаллов лежат в более коротковолновой области спектра, чем в случае типовых кристаллов (включая те, из которых были получены хорошие детекторы), что говорит о меньшем содержании азота.

Детекторы из этих кристаллов не изготавливались, поскольку они содержали металлические включения и трещины. Однако малое содержание азота свидетельствует о перспективности данного направления.

1. Behnke T., Doucet M., Ghodbane N., Imhof A. // LC-DET. 2002. 001.
2. Bauer C., Baumann I., Colledani C. et al. // Nucl. Instrum. Methods A. 1995. Vol. 367. P. 207.
3. Oh A., Moll M., Wagner A., Zeuner W. // Diamond and Related Materials. Nov 2000. № 9 (11). P. 1897.
4. Tapper R.J. // Phys. 2000. № 63. P. 1273.
5. Adam W., Bauer C., Berdermann E. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1999. Vol. 434. P. 131.
6. Status Report/RD42 CERN LHCC 98-20.
7. Status Report/RD42 CERN LHCC 97-3.
8. Bauer C., Baumann I., Colledani C. et al. // Nucl. Instrum. Methods A. 1995. Vol. 367. P. 202.
9. Adam W., Bauer C., Berdermann E. et al. // Ibid. 1999. Vol. 436. P. 326.
10. Kaneko J., Katagiri M. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1996. Vol. 383. P. 547.
11. Marczevska B., Nowak T., Olko P. et al. // Diamond and Related Materials. 2004. Vol. 13. P. 918.
12. Marczevska B., Kupriyanov I., Pal'yanov Yu. et al. // Ibid. 2007. Vol. 16. P. 191.
13. Пальянов Ю.Н., Малиновский И.Ю., Борздов Ю.М. и др. // ДАН СССР. 1990. Т. 315. № 5. С. 1221.
14. Малиновский И.Ю., Шурин Я.И., Пальянов Ю.Н., Соболев Н.В. // Труды III Междунар. конф. «Кристаллы: рост, свойства, реальная структура, применение». Александров, 1997. Т. 1. С. 283.
15. Борздов Ю.М., Сокол А.Г., Пальянов Ю.Н. и др. // Докл. РАН. 2000. Т. 374. № 1. С. 91.
16. Гусаков Г.А., Лапчук Н.М., Мудрый А.В., Федорук Г.Г. // ПС. 2003. Т. 70. № 3.

Поступила в редакцию 02.09.10.

**Константин Геннадьевич Афанасьев** – научный сотрудник.  
**Михаил Антонович Батурицкий** – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе.  
**Игорь Федорович Емельянич** – заведующий лабораторией физики частиц.  
**Александр Васильевич Игнатенко** – научный сотрудник.  
**Александр Васильевич Литомин** – научный сотрудник.  
**Виталий Валентинович Шевцов** – научный сотрудник.