

УДК 539.1.074.3

ЧЕРЕНКОВСКИЕ КРИСТАЛЛЫ $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2:\text{In}$ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАЛОРИМЕТРИИ

Б. И. Заднепровский¹, В. А. Козлов, Л. Н. Моисеева,
В. А. Нефедов¹, А. Р. Теркулов¹

В данной работе были разработаны и исследованы бесцветные черенковские кристаллы $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2:\text{In}$. Уменьшение концентрации центров окраски обеспечивает смещение спектра оптического пропускания в кристаллах NBW на 50 нм в область коротких длин волн. При облучении этих кристаллов γ -квантами дозой $3 \cdot 10^7$ рад спектры оптического пропускания кристаллов остались практически прежними. В работе также обсуждается полученное с помощью вычислений методом Монте-Карло энергетическое разрешение калориметров, изготовленных из кристаллов NBW различного состава.

Монокристаллы двойного вольфрамата натрия-висмута $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$ (NBW), известные ранее своими акусто-оптическими и лазерными свойствами, были предложены для использования в электромагнитной калориметрии в экспериментах по физике высоких энергий в 1991 г. [1–2]. Основные характеристики черенковских кристаллов (NBW) приведены в табл. 1.

Кристаллы NBW больших размеров были впервые выращены во ВНИИ синтеза минерального сырья (г. Александров) в 1990 г. Кристаллы выращивали методом Чохральского в воздушной атмосфере из платиновых тиглей при температуре расплава 940–980°C, используя шихтовую смесь $\text{Na}_2\text{CO}_3:\text{Bi}_2\text{O}_3:4\text{WO}_3$.

Освоение производства кристаллов NBW больших размеров стимулировало исследования их оптических характеристик и радиационной стойкости [1, 3, 4]. В этих работах

¹ВНИИ синтеза минерального сырья (г. Александров).

было показано, что радиационные повреждения кристаллов NBW незначительны для доз $\sim 10^6$ рад, что открывало возможность использования этих кристаллов в радиационных полях с дозами до 10^6 рад/год и выше.

Т а б л и ц а 1

| | | |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| Метод выращивания | | По Чохральскому |
| Плотность, ρ | г/см ³ | 7.57 |
| Твердость | Моос | 4.9 |
| Показатель преломления, n | | 2.15 |
| Радиационная длина, X_0 | см | 1.03 |
| Радиус Мольера, R_m | см | 2.38 |
| Критическая энергия, E_c | МэВ | 9.95 |
| Оптическое пропускание | нм | ≥ 380 |
| Точка плавления | С ⁰ | 920 |
| Гигроскопичность | | нет |

С 1995 г. кристаллы NBW успешно используются в мониторе светимости, а также в калориметре продольного поляриметра эксперимента ГЕРМЕС [5].

Монитор светимости и калориметр продольного поляриметра эксперимента ГЕРМЕС эксплуатируются в тяжелых радиационных условиях на расстоянии в несколько миллиметров от первичного пучка. И хотя кристаллы NBW удовлетворяют стационарным условиям работы по радиационной стойкости, возможность существенного превышения дозы радиации всегда существует за счет внезапных потерь электронного пучка и фона от коллиматоров при плохом наведении пучка.

Кроме того, в последнее время в связи со строительством новых ускорителей возникла необходимость в сверхрадиационностойких черенковских радиаторах, способных работать в областях вблизи пучка. Все это стимулировало продолжение работ по улучшению радиационной стойкости кристаллов NBW.

Другой проблемой кристалла NBW является низкий световыход черенковских фотонов (около 30% от полного выхода). Из-за высокого показателя преломления ($n = 2.15$) значительная часть черенковских фотонов претерпевает полное внутреннее отражение и остается в кристалле. Кроме того, кристаллы NBW с границей оптического пропускания выше 380 нм недостаточно прозрачны для черенковского света. Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра на основе кристаллов NBW, измеренное на электронном пучке в DESY, составило около $9\%/\sqrt{E}$. Очевидно, что дальнейшее

улучшение энергетического разрешения электромагнитных калориметров на базе NBW связано с получением кристаллов, имеющих большую оптическую прозрачность. Количество черенковских фотонов на выходе кристалла NBW может быть увеличено путем расширения диапазона оптического пропускания в УФ область, где наблюдается резкий рост интенсивности черенковского излучения.

Улучшение оптических характеристик и радиационной стойкости кристаллов NBW проводилось в рамках специальной программы. Исследовалось влияние исходного сырья, изменение стехиометрии кристалла, а также эффект различных добавок.

Анализ полученных ранее данных [6] показывает, что смещение края фундаментального поглощения в длинноволновую область, присутствие центров желтой окраски и радиационная стойкость кристаллов NBW коррелируют с наличием и интенсивностью полосы поглощения в районе 350–420 нм. Было показано, что эта полоса связана с присутствием вакансий вольфрама и катионами висмута в позициях Na.

По-видимому, присутствие этих дефектов приводит к формированию в запрещенной зоне глубоко лежащих полос акцепторных и донорных уровней, переходы между которыми и зонами (проводимости и валентной), определяют наблюдаемое смещение края поглощения кристаллов в длинноволновую область. Допирование кристаллов некоторыми примесями, например, Sc, и создание избытка вольфрама при выращивании кристаллов позволило частично компенсировать влияние этих дефектов и улучшить пропускание кристаллов в области ближнего ультрафиолета и повысить их радиационную стойкость [6].

В результате дальнейшей апробации ряда других примесей нами было установлено, что одним из наиболее эффективных является In. Не детализируя здесь физико-химический механизм достигнутого эффекта, отметим, что он может быть связан с заполнением низкоэнергетических состояний в зоне проводимости. В этом случае собственное поглощение, связанное с переходами в эти состояния, невозможно, что и вызывает смещение края поглощения в сторону больших энергий и, соответственно, ослабление и устранение полосы 350–420 нм.

Допирование кристаллов In проводили с помощью оксида In_2O_3 , вводимого в исходный расплав. Концентрации In_2O_3 варьировали в диапазоне 0.1–2% масс. Эффект допирования визуально был выражен в ослаблении, вплоть до полного исчезновения, желтой окраски кристаллов. В спектрах пропускания это сопровождалось смещением края поглощения в УФ область на 50 нм (рис. 1). Появление каких-либо дополнительных полос поглощения не отмечено.

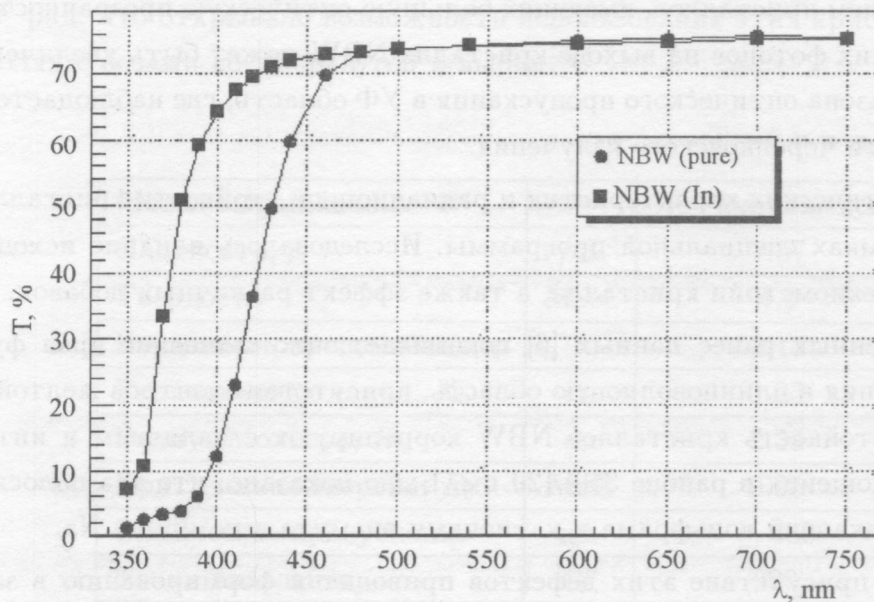


Рис. 1. Спектры оптического пропускания для кристаллов NBW(*pure*) и NBW(*In*).

Радиационная стойкость кристаллов NBW(*pure*) и NBW(*In*) изучалась с помощью радиоактивного источника ^{60}Co мощностью 200 рад/сек. Каждый кристалл облучался дозой $3 \cdot 10^7$ рад. Спектры оптического пропускания до и после облучения представлены на рис. 2. Отметим, что для такой дозы радиационные повреждения новых кристаллов NBW(*In*) отсутствуют.

Для определения энергетического разрешения калориметра на основе матриц из кристаллов NBW(*pure*) и NBW(*In*) проводилось моделирование методом Монте-Карло с помощью программы LITRANI, разработанной F. Gentit (коллаборация CMS) [7].

Моделировалась кристаллическая матрица 3×3 с размерами каждого кристалла NBW $22 \times 22 \times 200$ мм. Кристаллы в модели были обернуты в фольгу из алюминированного майлара толщиной 25 мк. Оптический контакт кристалла с ФЭУ осуществлялся с помощью специальной оптической смазки Dow Corning Q2-3067. В качестве характеристик детекторов черенковских фотонов использовались параметры фотоумножителя Hamamatsu R4125Q с кварцевым окном и диаметром фотокатода 15 мм.

В расчетах использовалась длина поглощения, рассчитанная по формуле

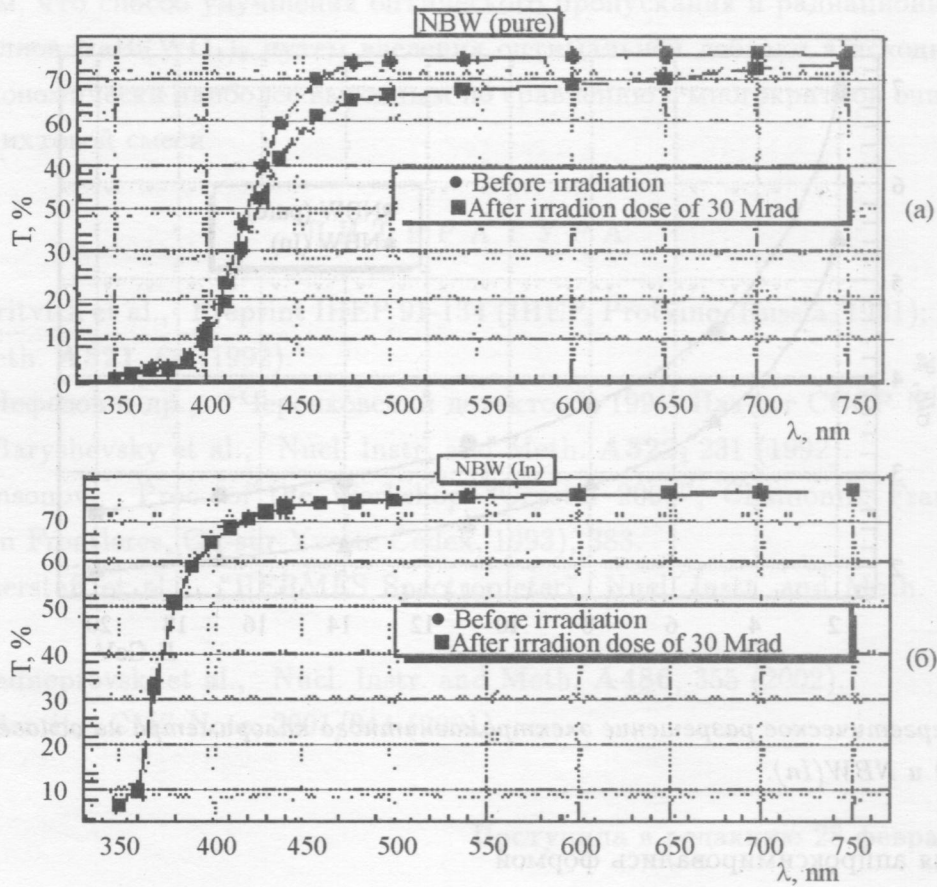


Рис. 2. Спектры оптического пропускания для кристаллов NBW(pure) (а) и NBW(In) (б) до и после облучения дозой $3 \cdot 10^7$ рад.

$$LAL = \frac{l}{\ln\left[\frac{T(1 - T_S)^2}{\sqrt{4T_S^4 + T^2(1 - T_S^2)^2 - 2T_S^2}}\right]}, \quad (1)$$

где l – длина кристалла, T – измеренное продольное пропускание, T_S – идеальное пропускание, ограниченное только потерями на двух торцах кристалла.

Центральный кристалл NBW в 3×3 матрице облучался электронами с энергиями: 2, 5, 10, 15, 20 ГэВ. Фотоны и электроны электромагнитного ливня с энергией ниже 10 КэВ не использовались в расчетах.

Для данной статистики частиц электронного пучка получалось распределение числа фотоэлектронов, имеющее форму распределения Гаусса с параметрами σ и E . Энергетическое разрешение вычислялось как $\sigma(E)/E$. Расчетные значения энергетического

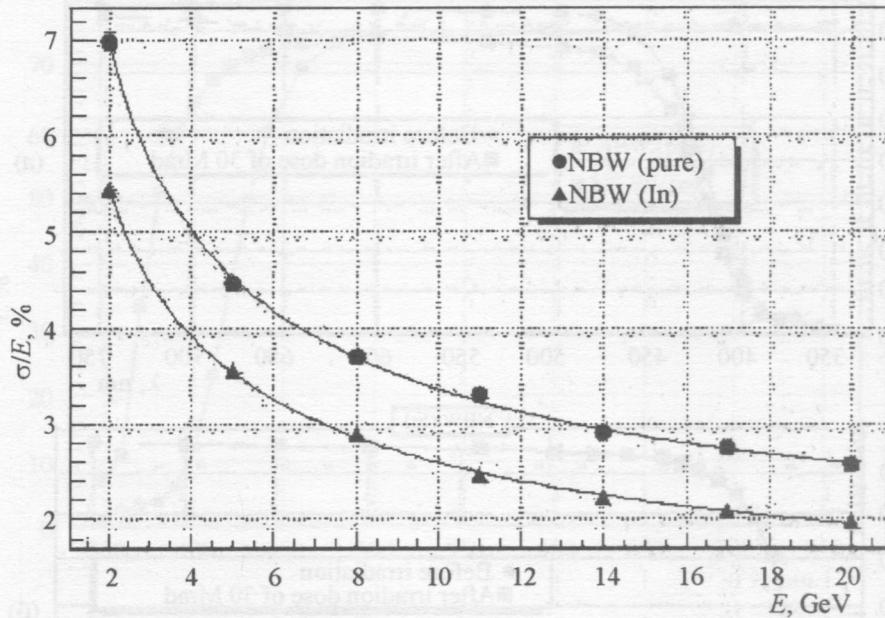


Рис. 3. Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра на основе кристаллов *NBW(pure)* и *NBW(In)*.

разрешения аппроксимировались формой

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{b}{\sqrt{E}} \oplus c, \quad (2)$$

где \oplus означает, что суммирование производится квадратично.

Расчетная зависимость энергетического разрешения 3×3 матриц из кристаллов *NBW(pure)* и бесцветных *NBW(In)* представлены на рис. 3. Параметры аппроксимации приведены в таблице.

| | <i>NBW(pure)</i> | <i>NBW(In)</i> |
|------|------------------|----------------|
| b(%) | 9.6 ± 0.4 | 7.6 ± 0.4 |
| c(%) | 1.4 ± 0.3 | 1.0 ± 0.2 |

Из таблицы видно, что за счет сдвига спектра оптического пропускания в УФ область и соответственно увеличения выхода из кристалла черенковских фотонов, энергетическое разрешение электромагнитного калориметра на основе *NBW* существенно улучшено.

Отметим, что способ улучшения оптического пропускания и радиационной стойкости кристаллов $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$ путем введения оптимальной добавки в исходную шихту является экономически наиболее выгодным по сравнению с многократной очисткой компонентов шихтовой смеси.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] G. I. Britvich et al., Preprint IHEP 91-134 (IHEP, Protvino, Russia, 1991); Nucl. Instr. and Meth. **A321**, 64 (1992).
- [2] В. А. Нефедов и др., "Черенковский детектор", 1991, Патент СССР N 1817932.
- [3] V. G. Baryshevsky et al., Nucl. Instr. and Meth. **A322**, 231 (1992).
- [4] V. Samsonov, Proc. of the Workshop "Crystal 2000", Chamonix, France, (1993) (Edition Frontleres, Gif-sur-Yvette Cedex, 1993), 383.
- [5] K. Akerstaff et al., "HERMES Spectrometer", Nucl. Instr. and Meth. **A417**, 230 (1998).
- [6] B. I. Zadneprovski et al., Nucl. Instr. and Meth. **A486**, 355 (2002).
- [7] F. X. Gentit, CMS Note, 2001/044 (2001).

Поступила в редакцию 28 февраля 2007 г.