

УДК 621.039.4

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА ДЛЯ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ АЭС

Н.М. КАЗЮЧИЦ, Л.Ф. МАКАРЕНКО, М.С. РУСЕЦКИЙ, А.С. ШУЛЕНКОВ*

Белорусский государственный университет
Ленинградская, 14, Минск 220050, Беларусь

*Минский научно-исследовательский институт радиоматериалов
Лейтенанта Кижеватова, 86-2, Минск, 220024, Беларусь

Поступила в редакцию 09 февраля 2015

Прочные ковалентные связи между атомами углерода обеспечивают высокую химическую и радиационную стойкость алмаза. Высокие значения скорости насыщения носителей заряда ($2,7 \cdot 10^7$ см с⁻¹ для электронов и $1,1 \cdot 10^7$ см с⁻¹ для дырок) и подвижности (2200 см²В⁻¹с⁻¹ для электронов и 1600 см²В⁻¹с⁻¹ для дырок) наряду с низким значением их времени жизни (единицы нс) определяют высокое быстродействие алмазных приборов. Большая ширина запрещенной зоны алмаза (5,5 эВ) обеспечивает малые токи утечки и низкий уровень шума приборов. Собственная концентрация носителей заряда, составляющая всего 10^5 см⁻³ даже при 1000 К, позволяет рассматривать алмаз как наиболее перспективный материал для высокотемпературной электроники. Тканезквивалентность алмаза позволяет непосредственно измерять поглощенную дозу радиации без соответствующей коррекции на природу материала детектора. Совокупность этих характеристик делает алмаз привлекательным также и для изготовления детекторов ультрафиолетового (УФ) и ионизирующих излучений [1]. Кроме того высокая теплопроводность алмаза (до 22 Вт см⁻¹К⁻¹) позволяет создавать эффективные теплоотводы и быстрые датчики температуры [2].

Цель работы – создание экспериментальных образцов терморезисторов, детекторов ультрафиолетового и ионизирующих излучений на основе синтетических алмазов.

Приборные структуры были созданы из монокристаллов алмаза, синтезированных методом высоких давлений и высоких температур в РУП «Адамас» [3]. Торговая марка продукции – сверхтвердый материал (СТМ) «Алмазот». Из кристаллов изготавливали полированные плоскопараллельные пластины толщиной около 300 мкм. С использованием имплантации ионов бора и последующего активационного отжига на пластинах создавали омические контакты. Структуры со сплошными контактами на обеих поверхностях пластин служили для регистрации глубоко проникающих ионизирующих излучений. Для регистрации УФ излучений использовали контакты встречно-штыревого типа, нанесенные на одну из поверхностей пластины. Термочувствительные слои в терморезисторах создавали имплантацией ионов фосфора по описанной в работах [4, 5] технологии.

На основании данных исследований распределения примесей и дефектов в СТМ Алмазот [6, 7] была установлена корреляция между примесно-дефектным составом и основными эксплуатационными характеристиками приборных структур [8], что позволило выработать критерии отбора синтетических алмазов «детекторного качества». Основные характеристики терморезисторов, детекторов УФ и ионизирующих излучения на основе СТМ Алмазот приведены ниже на рис. 1 – 3 и в табл. 1–3.

Исследования характеристик алмазного теплоотвода проводились в условиях, имитирующих эксплуатацию мощных полупроводниковых приборов [9]. Для этого пластина СТМ Алмазот с терморезисторами (рис. 1а) устанавливалась на медный радиатор. Толщина

алмазной пластины составляла 360 мкм, площадь – 16 мм², размеры медного радиатора – 62×42×4,9 мм. Тепловой контакт между алмазным теплоотводом и медным радиатором обеспечивался 10 мкм слоем теплопроводящей пасты марки КПТ-8. Тепловыделение от работающего прибора имитировала одна из контактных площадок терморезистора размером 200×200 мкм, которая использовалась в качестве нагревателя. С помощью игольчатых зондов к ней подводилась электрическая мощность равная 0,7 Вт. Матрица терморезисторов вокруг нагревателя позволяла исследовать распределение температуры вдоль поверхности алмазного теплоотвода. Для получения абсолютных значений температуры терморезисторы предварительно калибровались на автоматизированной установке для измерения температурных зависимостей проводимости [10]. Температура перегрева алмазного теплоотвода относительно равновесной температуры окружения показана на рисунке 1а. В окрестности источника тепла перегрев составляет всего 1,6 °С, а перепад температуры вдоль поверхности теплоотвода не превышает 0,8 °С. На рис. 1, б приведены кинетики разогрева алмазного теплоотвода на различных расстояниях от «точечного» нагревателя мощностью 0,7 Вт. Кинетики разогрева характеризуются быстрой (10 мс) и медленной (450 мс) составляющими, связанными с нагревом алмазной пластины и медного радиатора, соответственно.

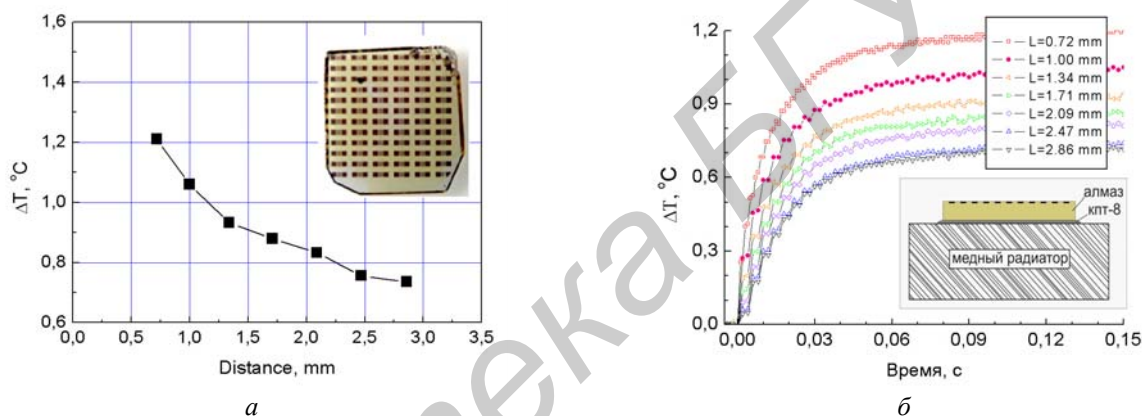


Рис. 1. Перегрев алмазного теплоотвода на различных расстояниях от нагревателя (а), на вставке показана фотография алмазной пластины с терморезисторами; кинетики разогрева алмазного теплоотвода на различных расстояниях от «точечного» нагревателя мощностью 0,7 Вт (б), на вставке показана схема размещения теплоотвода на медном радиаторе

Таблица 1. Основные характеристики терморезисторов на основе СТМ «Алмазот»

Сопротивление при 20 °С, МОм	0,1–4
Энергия активации проводимости, эВ	0,10–0,15
Постоянная времени, мс	4–10

Типичные характеристики детекторов УФ излучения на основе СТМ «Алмазот» приведены на рис. 2 и в табл. 2. Спектры чувствительности (рис. 2, а) содержат область собственной фотопроводимости на участке длин волн 200–230 нм с максимумом в окрестности 220 нм и более длинноволновую область примесной фотопроводимости. В бесцветных областях кристалла с пониженным содержанием азота чувствительность детекторов в максимуме приблизительно на 6–7 порядков превышает уровень шума, в обогащенных азотом желтых областях чувствительность на 2–3 порядка ниже. Отношение сигналов в максимуме спектра и при 400 нм составляет 5–6 порядков величины.

С ростом температуры от комнатной до 350 °С фоточувствительность детекторов уменьшается в области собственной фотопроводимости (рис. 2, б) и возрастает в области примесной фотопроводимости. Изменение чувствительности с температурой в собственной и примесной областях спектра определяется примесно-дефектным составом СТМ «Алмазот». Предельная рабочая температура детекторных структур на основе «беспримесных» алмазов, полученная экстраполяцией температурной зависимости фототока к уровню шумов, составляет около 800 °С. Оценка быстродействия фотодетекторов на основе СТМ «Алмазот» проводилась путем регистрации импульсного лазерного излучения. Для излучения длительностью 12 нс с

длиной волны 213 нм и энергией в импульсе 0,01 мДж величина регистрируемого на 50 Ом нагрузке сигнала составляла до 50 % от приложенного напряжения смещения (рис. 2, в). Регистрируемая длительность импульса на половине высоты составляла 14 нс. Для излучения с длиной волны 532 нм чувствительность детекторов близка к уровню шумов, но большие значения энергии в импульсе, составляющие 15 мДж, позволили надежно записать осциллограмму (рис. 2, з). Короткая длительность возбуждающего примесную фотопроводимость импульса (0,07 нс) позволяет определить быстродействие детектора, составляющее 2,3 нс на половине высоты регистрируемого импульса.

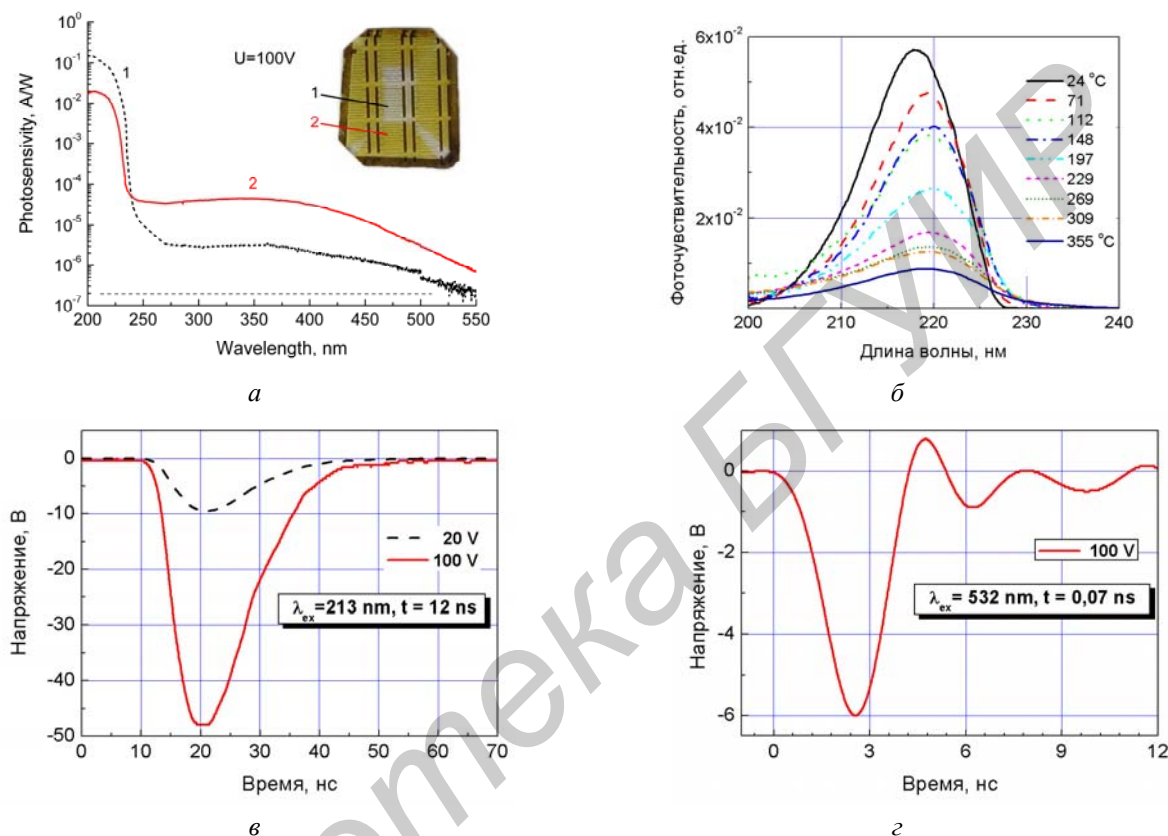


Рис. 2. Типичные спектры фотопроводимости СТМ «Алмазот» с низким (кривая 1) и высоким (кривая 2) содержанием примеси азота (а), на вставке показана фотография тестовой структуры; изменение спектров фотопроводимости в собственной области с ростом температуры (б); записанные детектором из СТМ «Алмазот» осциллограммы импульсного лазерного излучения длительностью 12 нс, длина волны 213 нм (в) и длительностью 0,07 нс, длина волны 532 нм (з)

Таблица 2. Характеристики детекторов УФ излучения на основе СТМ «Алмазот»

Спектральный диапазон, нм	200 – 280
Максимум чувствительности, нм	225
Чувствительность в максимуме, А/Вт	0,1–1
Диапазон напряжения смещения, В	0 – 100
Темновой ток при напряжении 100 В, пА	< 1
Быстродействие, нс	< 10
Отношение сигнала в УФ к сигналу в видимой области	10^3 – 10^6

Дозиметрические детекторы должны иметь стабильный во времени и достаточный для надежной регистрации уровень сигнала, линейно зависящий от мощности дозы. Зависимость ионизационного тока от мощности дозы γ -квантов ^{60}Co и ^{137}Cs для детекторов на основе природного и синтетического алмазов приведена на рисунке 3а. Величина сигнала слабо зависит от энергии γ -квантов. Типичный уровень сигнала для детекторов из природного алмаза типа Па не превышает 20 нА. Детекторы из СТМ «Алмазот» в большинстве случаев менее чувствительны, чем детекторы из специально отобранных природных алмазов. Однако в кристаллах СТМ «Алмазот» имеются области, обладающие аномально высокой чувствительностью. Так, чувствительность детектора из СТМ «Алмазот», приведенная на рис. 3а, на порядок превышает типичные значения чувствительности детекторов из природного

алмаза. Зависимость между током детектора и мощностью дозы γ -квантов может быть описана степенной функцией $I \sim D^\Delta$. Показатель степени для исследованных детекторов равен $\Delta = 1,011$ для природного алмаза и $\Delta = 0,993$ – для СТМ «Алмазот».

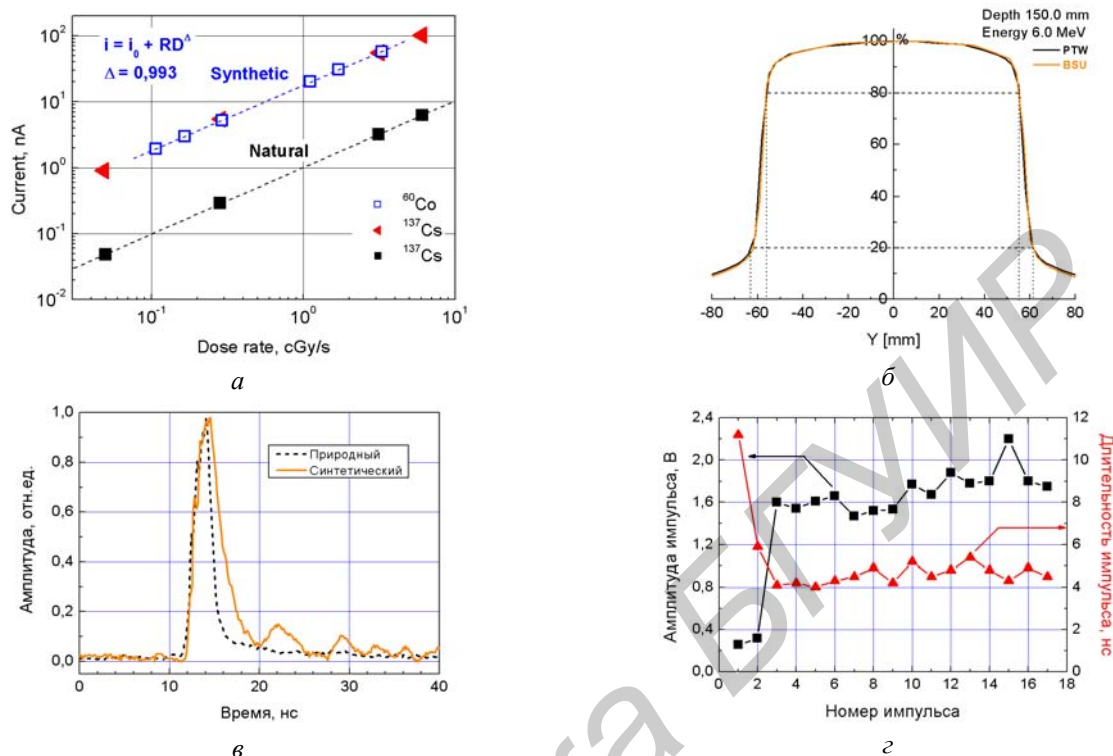


Рис. 3 – Зависимость тока фотоионизации от мощности дозы γ -квантов для детекторов на основе природного алмаза и СТМ Алмазот (а); распределение радиационного поля линейного ускорителя «Varian», измеренное детектором фирмы PTW и детектором из СТМ Алмазот (б); осциллограммы импульса тормозного излучения установки «Аргумент-1000», записанные детектором из природного алмаза и детектором из СТМ Алмазот (в); регистрация последовательности импульсов тормозного излучения установки «Аргумент-1000» (г)

Таблица 3. Характеристики дозиметрических детекторов на основе СТМ «Алмазот»

Диапазон энергий фотонов, МэВ	0,08 – 20
Чувствительность, мкКл/Гр	до 1,8
Диапазон мощностей доз, сГр/с	0,05 – 10
Линейность в номинальном диапазоне мощностей доз	0,978
Стабильность сигнала	3%
Напряжение смещения, В	до 100
Темновой ток при напряжении 100 В, пА	< 1

Сравнительные испытания детектора из СТМ «Алмазот» в клинических условиях (рис. 3б) на примере регистрации поперечного распределения плотности потока фотонного излучения линейного ускорителя «Varian» показали практически одинаковые результаты с детектором из природного алмаза фирмы PTW [11].

Детекторы из СТМ «Алмазот» эффективны при регистрации мощных импульсных потоков ионизирующего излучения. На рис. 3в, 3г приведены результаты регистрации импульсного тормозного излучения установки «Аргумент-1000». Мощность дозы тормозного излучения установки составляла 10^{11} Р/с, длительность импульса на полувысоте 3,5 нс. Из рис. 3г видно, что, начиная с третьего импульса, регистрируемые детекторами из СТМ Алмазот сигналы стабилизируются по амплитуде и длительности. При этом длительность регистрируемых сигналов сопоставима с длительностью импульса тормозного излучения.

Таким образом, чувствительные элементы дозиметров, импульсных детекторов и фотоприемников УФ-диапазона, изготовленные из специально отобранных СТМ «Алмазот», имеют высокие эксплуатационные характеристики, сопоставимые с характеристиками лучших прототипов детекторов ионизирующих излучений на основе природных алмазов типа Па.

Список литературы

1. *Tapper R.J.* Diamond detectors in particle physics. Rep. Prog. Phys. 2000. Vol. 63. P. 1273–1316.
2. *Бормашов В.С., Буга С. Г., Бланк В.Д., и др.* Быстродействующие терморезисторы из синтетических монокристаллов алмазов. ПТЭ 2009. № 5. С. 134–139.
3. Adamas. Электронный ресурс. – Режим доступа: www.adamas.by. – Дата доступа: 02.02.2015.
4. *Русецкий М.С., Казюциц Н.М., Казюциц В.Н., Наумчик Е.В.* // Матер. 4-й Междунар. науч.-технич. Конф. «Приборостроение-2011». Минск, 16–18 ноября 2011 г. С. 393–394.
5. *Rusetsky M.S., Kazuchits N.M., Naumchik E.V.* // 4th International Conference «Radiation interaction with material and its use in technologies». Kaunas, May, 14–17 2012. P. 320–323.
6. *Казюциц Н.М., Коновалова А.В., Азарко И.И. и др.* // Неорганические материалы. 2014. Т. 50, № 2. С. 1449–1461.
7. *Gaubas E., Ceponis T., Jasiunas A., Kalendra V., Pavlov J., Kazuchits N., Naumchik E. and Rusetsky M.* // Diamond and Related Materials. 2014. Vol. 47. P. 15–26.
8. *Казюциц Н.М., Макаренко Л.Ф., Наумчик Е.В. и др.* // Труды XXIII Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела». Севастополь, 8 – 13 июля 2013 г. С. 446–453.
9. *Хорунжий И.А., Мартинович В.А., Русецкий М.С., Казюциц Н.М.* / Матер. 6 Междунар. науч.-технич. Конф. «Приборостроение-2013». Минск, 20–22 ноября 2013 г. С. 382–383.
10. *Русецкий М.С., Казюциц Н.М.* / Матер. 7 Междунар. науч.-технич. Конф. «Приборостроение-2014». Минск, 19–21 ноября 2014 г. С. 131–133.
11. *Казюциц Н.М., Наумчик Е.В., Русецкий М.С. и др.* / Труды XXI междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела». Севастополь, 22–27 августа 2011 г. С. 644–651.