

## ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.5

### ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК АЛМАЗА, ПОЛУЧЕННЫХ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

© 2019 г. С. В. Черных<sup>a,\*</sup>, С. А. Тарелкин<sup>a,b</sup>, А. В. Черных<sup>a</sup>, С. Ю. Трошиев<sup>b</sup>,  
Н. В. Лупарев<sup>b</sup>, Н. В. Корнилов<sup>b</sup>, Д. В. Тетерук<sup>b</sup>, С. А. Терентьев<sup>b</sup>, В. Д. Бланк<sup>a,b</sup>,  
А. В. Антипов<sup>c</sup>, А. П. Чубенко<sup>a,d</sup>, Ю. Н. Глыбин<sup>e</sup>, Н. И. Полушин<sup>a</sup>, С. И. Диденко<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”  
Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., 4

<sup>b</sup> Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов  
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Центральная, 7а

<sup>c</sup> Центр гигиены и эпидемиологии № 174 Федерального медико-биологического агентства  
Россия, 142280, Протвино Московской обл., ул. Мира, 1

<sup>d</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН  
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

<sup>e</sup> ООО “СНИИП-Плюс”  
Россия, 123060, Москва, ул. Расплетина, 5, стр. 2

\*e-mail: chsv\_84@mail.ru

Поступила в редакцию 21.12.2018 г.

После доработки 14.02.2019 г.

Принята к публикации 21.02.2019 г.

Представлены результаты испытаний прототипа поверхностно-барьерного детектора заряженных частиц на основе монокристаллических эпитаксиальных слоев алмаза. Пленки алмаза *p*-типа проводимости с концентрацией бора на уровне  $(4-8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  толщиной 65 мкм были выращены с использованием осаждения из газовой фазы на сильнолегированных бором алмазных подложках, выращенных методом высокого давления и высокой температуры. Барьер Шоттки площадью 17 мм<sup>2</sup> был сформирован с помощью напыления Pt толщиной 30 нм. При облучении от  $\alpha$ -источника <sup>238</sup>Pu (линия 5.499 кэВ) детектор при обратном смещении 90 В имел эффективность сбора заряда, близкую к 100%, и высокое энергетическое разрешение FWHM на уровне 0.56%. Полученное разрешение находится на уровне стандартных кремниевых детекторов.

DOI: 10.1134/S0032816219040220

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно ведется разработка детекторов на алмазе. Высокие значения ширины запрещенной зоны (5.5 эВ) и удельного сопротивления (до 10<sup>14</sup> Ом·см) вместе с высокими транспортными параметрами неравновесных носителей [1] позволяют эксплуатировать такие детекторы вплоть до температуры 300°C практически без изменения их характеристик [2, 3]. К тому же благодаря большой энергии смещения атомов кристаллической решетки (43 эВ) алмаз обладает значительной радиационной стойкостью [4, 5]. Сочетание вышеперечисленных качеств алмаза делает детекторы на его основе идеальными кандидатами для работы в экстремальных условиях эксплуатации.

Несмотря на все еще сохраняющиеся проблемы, среди которых основными остаются высокая цена и небольшие площади коммерчески доступных подложек монокристаллического алмаза (до 1 × 1 см<sup>2</sup>), развитие CVD-технологии (CVD – chemical vapor deposition) позволило получить значительный прогресс в области разработки детекторов ядерных излучений. На сегодняшний день уже представлены детекторы заряженных частиц спектрометрического качества на алмазе площадью до 16 мм<sup>2</sup> с энергетическим разрешением FWHM 0.30–0.35% ( $\alpha$ -частицы с энергией 5.5 МэВ) [6, 7]. Активно ведутся работы по разработке детекторов тепловых [8, 9] и быстрых нейтронов [10, 11], сообщается о разработке детекторов для измерений характеристик высокоэнергетической плазмы в космосе [12], регистрации осколков деления [13] и др.

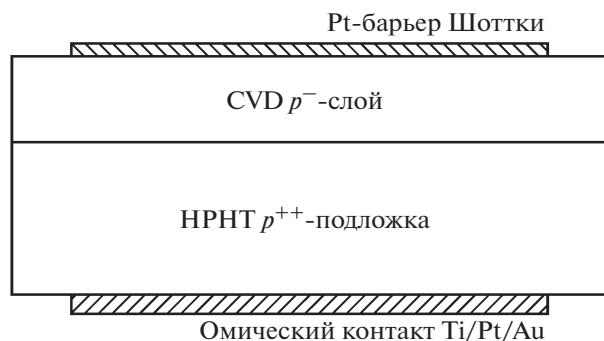


Рис. 1. Конструкция детектора с барьером Шоттки на основе CVD-алмазных пленок.

Как правило, такие детекторы изготавливаются на основе утоненных до требуемой толщины (обычно 50–300 мкм) CVD-алмазных подложек с контактами, сформированными на обеих сторонах пластины [6, 7, 14], либо CVD-слоев, выращенных на высокоомных НРНТ-подложках (НРНТ — high-pressure-high-temperature), при этом контакт к нижнему электроду осуществляется с торцевой стороны подложки [8, 9].

Альтернативой является рост высокоомных CVD-слоев сразу на сильнолегированных НРНТ-подложках, что значительно упрощает технологию формирования нижнего контакта. В данной статье представлен прототип детектора заряженных частиц на основе такой технологии, исследованы его электрические характеристики, а также проведено тестирование разработанного детектора с использованием источников  $\alpha$ -частиц.

## 1. КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА

Изготовление исходной подложки, рост эпитаксиальной структуры и технологические операции изготовления детектора осуществлялись в ТИСНУМ (Москва, Троицк). Принципиальная конструкция разработанного алмазного детектора представлена на рис. 1.

Исходная подложка алмаза (тип IIb) толщиной 200 мкм, легированная бором до  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , выращивалась методом температурного градиента при высоком давлении и высокой температуре — НРНТ [15]. Далее проводилась полировка с обеих сторон с последующим химическим травлением для удаления металлических и органических поверхностных загрязнений. Эпитаксиальная пленка монокристаллического алмаза толщиной 65 мкм была выращена методом химического осаждения из газовой фазы — CVD.

После этого поверхность механически полировалась. Далее с использованием лазера вырезался образец размером  $5 \times 5 \text{ мм}$ . Особенности процесса роста, а также некоторые особенности

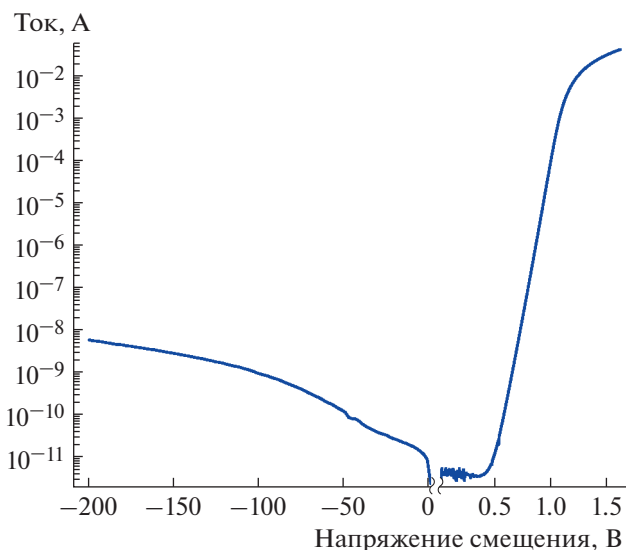


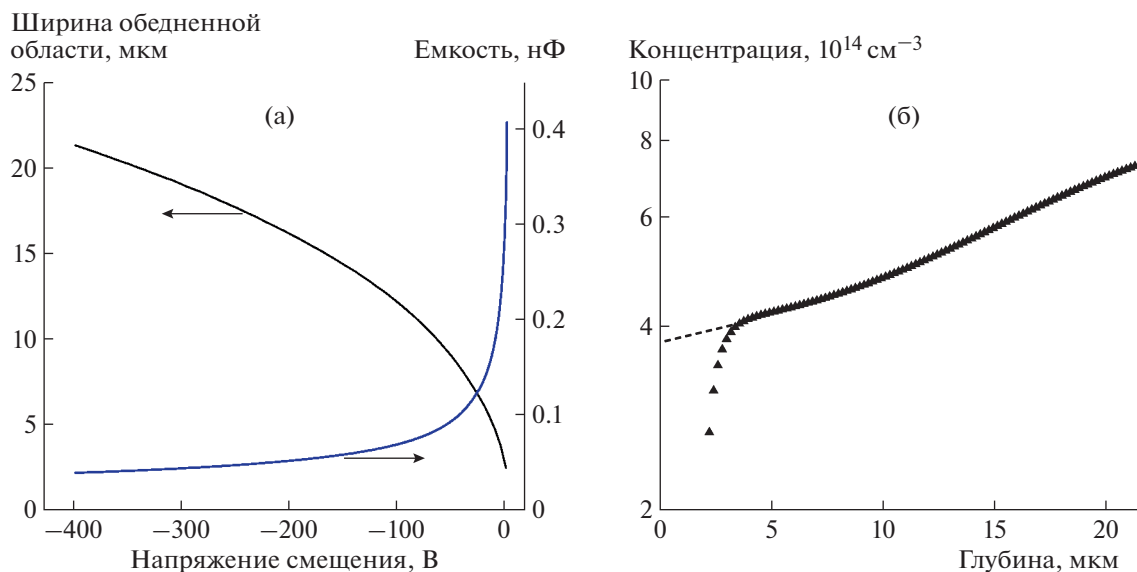
Рис. 2. Вольт-амперная характеристика изготовленного алмазного детектора с Pt-барьером Шоттки (полярность указана относительно  $p^{++}$ -подложки).

изготовления тестового кристалла можно найти в работах [16, 17]. Отметим, что, в отличие от представленной в них технологии, во время роста слою специально не легировались, однако они имели проводимость  $p$ -типа и фоновый уровень легирования на уровне  $1 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , что, по всей видимости, обусловлено подлегированием бором из атмосферы ростовой камеры. При комнатной температуре удельное электрическое сопротивление выращенных эпитаксиальных алмазных пленок составило около  $100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , а холловская подвижность дырок находилась на уровне  $2000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

Далее к обратной стороне ( $p^{++}$ -подложка) формировался омический контакт на основе системы Ti (30 нм)/Pt (30 нм)/Au (50 нм). Сразу после нанесения слоя Ti непосредственно в вакуумной камере напылительной установки проводился его отжиг при температуре  $700^\circ\text{C}$  для получения карбида титана, улучшающего омические характеристики контакта. Затем на рабочей стороне методом магнетронного распыления формировался квадратный контакт Шоттки на основе Pt толщиной 30 нм площадью  $17 \text{ мм}^2$ . Для ограничения размеров омического контакта и барьера Шоттки напыление проводилось через металлическую маску.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Электрические характеристики изготовленного детектора измерялись при комнатной температуре. На рис. 2 представлена его вольт-амперная характеристика, где видно, что при обратном смещении 200 В ток детектора составляет не более 7.0 нА.



**Рис. 3.** В.ф.х. детектора, измеренная на частоте тестового сигнала 1 МГц, а также зависимость ширины обедненной области от приложенного смещения (а) и профиль легирования по глубине эпитаксиального слоя (б, пунктирно обозначено предполагаемое распределение примеси в приповерхностном слое).

Для оценки толщины обедненной области использовались измерения вольт-фарадных характеристик (в.ф.х.). Профиль распределения примеси по глубине слоя был получен с использованием вольт-емкостного профилирования. Концентрация некомпенсированных электрически активных акцепторов и глубина обедненной области рассчитывались согласно выражениям [18]

$$N_a(x) = -\frac{C^3}{q\epsilon\epsilon_0 S^2} \left( \frac{dC}{dU} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$W(U) = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C(U)}, \quad (2)$$

где  $N_a$  — концентрация ионизированных акцепторов,  $C$  — барьерная емкость детектора,  $q$  — заряд электрона,  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость алмаза,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $S$  — площадь детектора,  $U$  — внешнее напряжение смещения,  $W$  — ширина обедненной области.

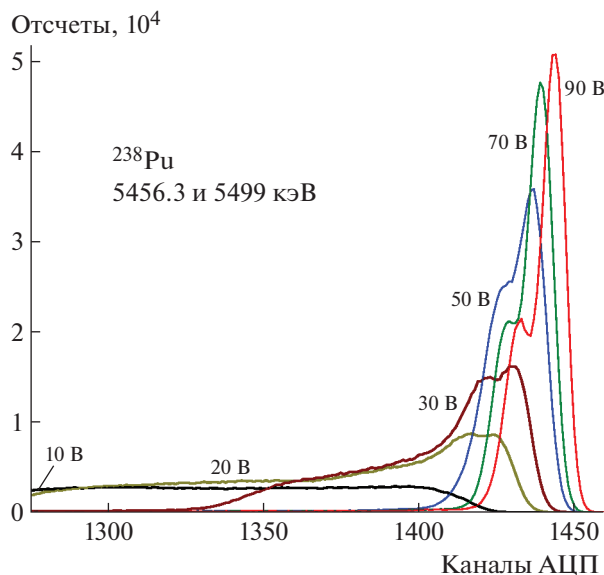
В.ф.х. детектора, измеренная на участке от 0.8 до  $-400$  В (здесь и далее полярность указана относительно  $p^{++}$ -подложки) при частоте тестового сигнала 1 МГц, а также рассчитанные из нее зависимость ширины обедненной области от приложенного смещения и профиль легирования по глубине эпитаксиального слоя представлены на рис. 3. Исходя из результатов профилирования можно сделать вывод, что приповерхностный слой толщиной 2 мкм имеет существенно более низкий уровень легирования по сравнению с остальным объемом и обеднен уже при прямом смещении. Однако необходимо отметить, что при

утонении рабочего слоя до некоторой глубины и последующем формировании барьера Шоттки данный эффект также наблюдается. По этой причине наблюдаемую картину стоит связывать с искажениями результатов профилирования за счет большой плотности поверхностных состояний на границе полупроводник/металл, нежели с реальным распределением примеси. Таким образом, можно полагать, что концентрация в слое непрерывно увеличивается с  $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  на поверхности и достигает  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  на глубине 21 мкм.

### 3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Измерение спектрометрических характеристик алмазного детектора проводили с использованием  $\alpha$ -источников  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{226}\text{Ra}$  при остаточном давлении 1.33 Па и комнатной температуре. Детектор через малошумящий зарядочувствительный предусилитель БУИ-52 разработки «СНИИП-Плюс» (Россия) и усилитель-формирователь ORTEC 572A подключался к 8192-канальному амплитудно-цифровому преобразователю АЦП-8К-2М (АСПЕКТ, Россия).

При измерении эффективности сбора заряда (CCE — charge collection efficiency) источник располагали непосредственно на корпусе детектора (расстояние до активной области детектора 2–3 мм), время набора каждого спектра — 15 мин. На рис. 4 показано поведение спектра источника  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$ , измеренного при различных напряжениях смещения. При низких смещениях спектр имеет несимметричную форму с низкоэнергетическим



**Рис. 4.** Амплитудный спектр  $\alpha$ -частиц от источника  $^{238}\text{Pu}$  при различных напряжениях смещения (энергия  $\alpha$ -частиц 5456.3 и 5499 кэВ).

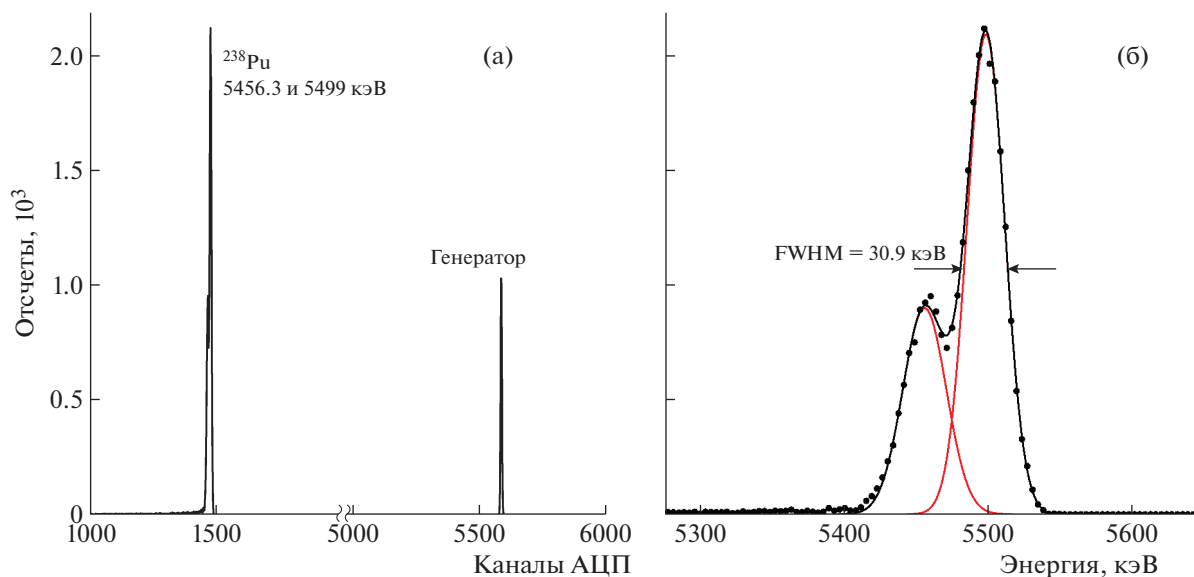
“хвостом”. Это очевидно связано с низкой эффективностью сбора заряда.

С увеличением обратного напряжения смещения центр тяжести распределения смещается в сторону высоких каналов и улучшается энергетическое разрешение детектора: при 70 В оба пика становятся различимыми. Увеличение обратного напряжения смещения более 90 В несколько увеличивало эффективность сбора заряда, но при

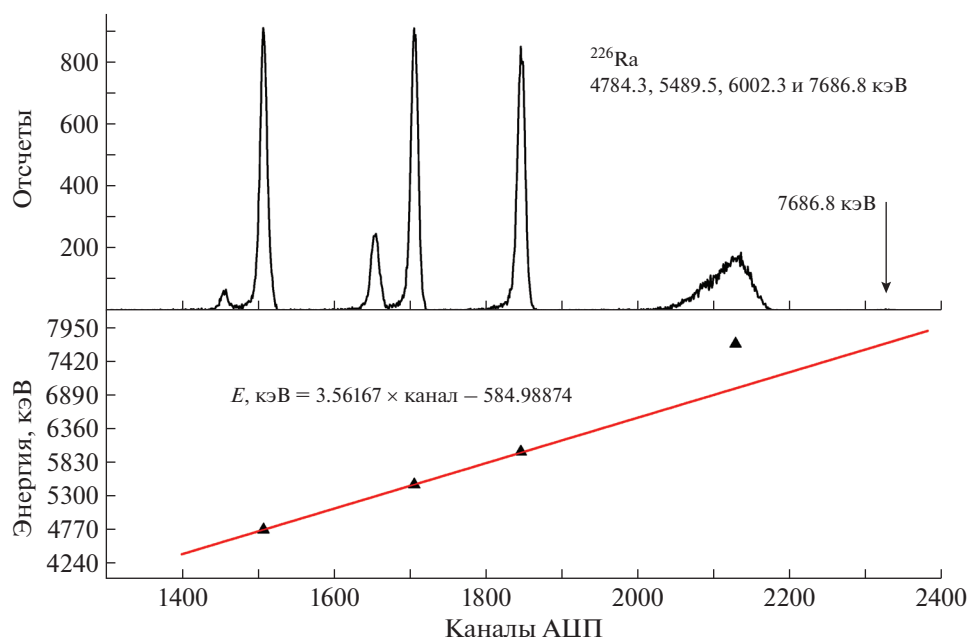
этом не приводило к заметному улучшению энергетического разрешения.

Оценку величины эффективности сбора заряда проводили из сравнительных измерений с кремниевым  $p-i-n$ -детектором. На рис. 5а представлены спектр  $^{238}\text{Pu}$ , измеренный при напряжении смещения 90 В, и пик генератора, настроенный на 5.5 МэВ по кремниевой шкале. Соответствующее положение пика генератора находится в 5578-м канале, и, учитывая положение пика 5499 кэВ  $^{238}\text{Pu}$  в 1473-м канале, возможно оценить эффективность сбора заряда для этой линии. Очевидно, что соотношение положений пиков должно соответствовать отношению энергий ионизации алмаза и кремния (13.1 и 3.6 эВ), равному 3.66. В нашем случае отношение положений пиков было несколько больше — 3.78, что, по-видимому, связано с разницей емкостей алмазного и эталонного кремниевых детектора. Несмотря на это, можно сказать с уверенностью, что для данной линии эффективность сбора заряда близка к 100%.

Для измерений энергетического разрешения источник располагали на расстоянии 70 мм от детектора для снижения вклада косых пробегов в “мертвом” слое, время измерения было увеличено до 1 часа. Исходя из измерений энергетического эквивалента шума, постоянная времени для этих измерений была выбрана 0.5 мкс. Полученный спектр и его аппроксимация суммой гауссовых распределений представлены на рис. 5б. Энергетическое разрешение FWHM на линии 5.499 МэВ  $^{238}\text{Pu}$  составило 30.9 кэВ (0.56%), энергетический эквивалент шума при этом составил



**Рис. 5.** Амплитудный (а) и энергетический (б) спектры  $\alpha$ -частиц от источника  $^{238}\text{Pu}$  при напряжении смещения  $-90$  В (энергия  $\alpha$ -частиц 5456.3 и 5499 кэВ).



**Рис. 6.** Амплитудный спектр  $\alpha$ -частиц от источника  $^{226}\text{Ra}$  (4784.3, 5489.5, 6002.3 и 7686.8 кэВ) при обратном напряжении смещения 90 В и энергетическая калибровка детектора на этом источнике.

5.5 кэВ. Отметим, что собственное уширение  $\alpha$ -линии источника было 7 кэВ.

В дальнейшем представлялось интересным оценить работоспособность детектора в более широком диапазоне энергий  $\alpha$ -частиц. Для этого использовали источник  $^{226}\text{Ra}$ , который испускает  $\alpha$ -частицы с энергиями 4784.3, 5489.5, 6002.3 и 7686.8 кэВ. Измерения проводили при условиях, аналогичных измерениям энергетического разрешения. Полученный спектр показан на рис. 6, также представлена зависимость центров тяжести пиков от энергии испускаемых источником  $\alpha$ -частиц.

Как видно, в диапазоне энергий от 4.8 до 6.0 МэВ отклик детектора практически линеен (для линии 6.002 кэВ наблюдается лишь незначительный дефицит амплитуды, 13.6 кэВ), однако для линии 7686.8 кэВ сбор заряда значительно ниже. Дефицит амплитуды составляет 195 каналов (694 кэВ), энергетическое разрешение для данной линии составило 220.3 кэВ, при этом для других линий оно было в среднем 42 кэВ (41.3, 41.5, 42.3 кэВ соответственно для линий 4784.3, 5489.5 и 6002.3 кэВ). Отметим, что собственное уширение  $\alpha$ -линии для этого источника несколько больше, чем для  $^{238}\text{Pu}$  — 20 кэВ.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдаемое поведение спектральных характеристик детектора объясняется неполным обеднением рабочего слоя. Как было показано ранее, обедненная область при напряжении 90 В имеет

ширину примерно 12 мкм и может быть увеличена только при значительном увеличении напряжения смещения по причине возрастания концентрации примеси в глубь подложки. На вкладке рис. 7 представлены кривые Брэгга, рассчитанные в SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) для энергий  $\alpha$ -частиц, соответствующих источнику  $^{226}\text{Ra}$ , также отмечены границы обедненного слоя для различных смещений. Как можно видеть, пробег  $\alpha$ -частиц с энергией >4784.3 кэВ превышает толщину обедненной области, а для частиц с энергией 7686.8 кэВ пробег больше толщины обедненной области в 2 раза. По этой причине часть заряда в треке может быть собрана только за счет диффузионного механизма.

Для описания эффективности сбора заряда в зависимости от внешнего смещения использовали диффузионно-дрейфовую модель, предложенную в [19]:

$$\text{CCE}(U) = \frac{1}{E_\alpha} \int_0^{W(U)} \frac{dE}{dx} dx + \frac{1}{E_\alpha} \int_{W(U)}^R \frac{dE}{dx} \exp\left(-\frac{x - W(U)}{L_e}\right) dx, \quad (3)$$

где  $E_\alpha$  — энергия налетающей  $\alpha$ -частицы,  $dE/dx$  — распределение энергетических потерь частицы,  $R$  — пробег,  $L_e$  — средняя диффузионная длина электронов.

На рис. 7 представлена эффективность сбора заряда для линий 5.456 и 5.499 МэВ, полученная

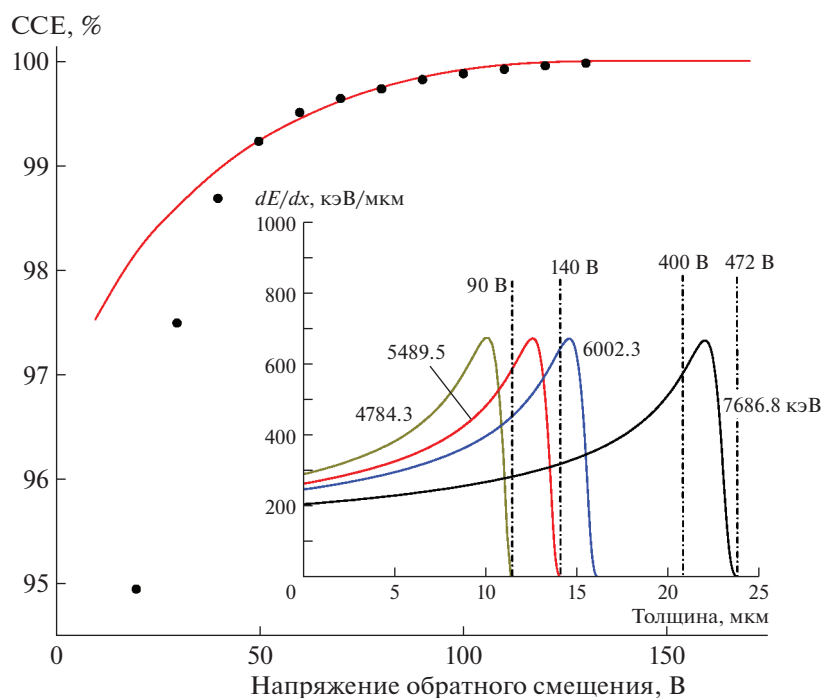


Рис. 7. Эффективность сбора заряда (CCE) в зависимости от приложенного смещения. На вставке кривые Брэгга, рассчитанные с помощью SRIM для энергий  $\alpha$ -частиц, испускаемых источником  $^{226}\text{Ra}$ .

из измерений центров тяжести суммарного распределения обоих пиков. Как видно, при смещениях до 30 В зависимость (3) не описывает поведение CCE. Для обратных напряжений смещения  $>30$  В наблюдается хорошее согласие. Это позволяет оценить нижнюю границу значения средней диффузионной длины для электронов в используемом материале.

Подгонка зависимости (3) под экспериментальные данные дает минимальное значение диффузионной длины 110 мкм. С учетом того, что используемая модель не учитывает возникновения плазменного состояния в треке и значительную рекомбинацию в квазинейтральной области в начальный момент времени, можно полагать, что ее значение гораздо выше.

Таким образом, получаем несколько неожиданный результат: при обратном смещении 90 В благодаря большим значениям диффузионной длины электронов в материале для энергий до 6 МэВ детектор демонстрирует CCE, близкую к 100%, и высокое энергетическое разрешение FWHM на уровне 0.5–0.6% несмотря на то, что ширина обедненного слоя все еще меньше пробега частицы. Проведенная оценка также позволяет оценить диапазон оптимальных смещений для эффективной регистрации частиц с энергией до 8 МэВ. Как видно из вкладки на рис. 7, полный сбор для этой энергии будет наблюдаться при смещениях порядка 470 В, однако учитывая высокие длины

диффузии в материале, можно ожидать, что детектор будет работоспособен в этом интервале энергий при смещениях до 400 В.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено тестирование прототипа поверхностно-барьерного детектора заряженных частиц на основе монокристаллических пленок алмаза  $p$ -типа проводимости толщиной 65 мкм, выращенных с использованием осаждения из газовой фазы на сильнолегированных бором подложках, полученных методом НРНТ.

При облучении от  $\alpha$ -источника  $^{238}\text{Pu}$ , детектор демонстрировал эффективность сбора заряда, близкую к 100%, и высокое энергетическое разрешение FWHM на уровне 30.9 кэВ (0.56%) при внешнем смещении 90 В. При тестировании на источнике  $^{226}\text{Ra}$  было показано, что детектор сохраняет рабочие характеристики до энергии  $\alpha$ -частиц 6.0 МэВ даже несмотря на недостаточную толщину обедненного слоя, обусловленную высоким уровнем фонового легирования в используемых слоях  $((4-8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3})$ .

Полученный результат был объяснен высокими значениями диффузионной длины неосновных носителей в используемом материале. Оценка, проведенная из измерений зависимости эффективности сбора заряда от внешнего напряжения смещения, дала минимальное значение диффузи-

онной длины электронов в пленках порядка 110 мкм. Для более высоких энергий наблюдался неполный сбор заряда. Было показано, что для детектирования  $\alpha$ -частиц с энергией до 8 МэВ требуется увеличение обратного смещения до 400 В.

Таким образом, полученный результат близок к уровню стандартных кремниевых детекторов (FWHM 0.25–0.5%), и можно утверждать, что детекторы, изготовленные на основе представленной технологии, могут уже сегодня найти свое применение для дозиметрических и спектрометрических приложений в жестких условиях эксплуатации.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа получила финансовую поддержку со стороны Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение о предоставлении Субсидии № 075-02-2018-210 от 26.11.2018 г., уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57818X0266).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pomorski M., Berdermann E., De Boer W., Furgeri A., Sander C., Morse J. // *Diamond and Related materials*. 2007. V. 16. № 4–7. P. 1066. doi 10.1016/j.diamond.2006.11.016
2. Kumar A., Kumar A., Topkar A., Das D. // *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2017. V. 858. P. 12. doi 10.1016/j.nima.2017.03.033
3. Kumar A., Topkar A. // *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* 2018. V. 65. № 1. P. 630. doi 10.1109/TNS.2017.2783919
4. Hassard J. // *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1995. V. 368. № 1. P. 217. doi 10.1109/TNS.2017.2783919
5. Seidel S. // *J. of Instrumentation*. 2014. V. 9. №. 01. P. C01013. doi 10.1088/1748-0221/9/01/C01013
6. Pomorski M., Berdermann E., Caragheorgheopol A., Ciobanu M., Kiš M., Martemiyarov A., Nebel C., Moritz P. // *Physica status solidi (a)*. 2006. V. 203. № 12. P. 3152. doi 10.1002/pssa.200671127
7. Dueñas J.A., de la Torre Pérez J., Sánchez A.M., Martel I. // *Appl. Radiation and Isotopes*. 2014. V. 90. P. 177. doi 10.1016/j.apradiso.2014.03.032
8. Marinelli M., Milani E., Prestopino G., Scoccia M., Tucciarone A., Verona-Rinati G., Angelone M., Pillon M., Lattanzi D. // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 143509. doi 10.1063/1.2356993
9. Bolshakov A.P., Zyablyuk K.N., Kolyubin V.A., Dravin V.A., Khmel'nitskii R.A., Nedosekin P.G., Pashentsev V.N., Tyurin E.M., Ralchenko V.G. // *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2017. V. 871. P. 142. doi 10.1016/j.nima.2017.07.058
10. Rebai M., Milocco A., Giacomelli L., Cippo E.P., Tardocchi M., Fazzi A., Pietropaolo A., Gorini G. // *J. of Instrumentation*. 2013. V. 8(10). P. 10007. doi 10.1088/1748-0221/8/10/P10007
11. Osipenko M., Ripani M., Ricco G., Caiffi B., Pompili F., Pillon M., Verona-Rinati G., Cardarelli R. // *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2016. V. 817. P. 19. doi 10.1016/j.nima.2016.02.008
12. Ogasawara K., Broiles T.W., Coulter K.E., Dayeh M.A., Desai M.I., Livi S. A., McComas D.J., Walther B.C. // *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2015. V. 777. P. 131. doi 10.1016/j.nima.2014.12.098
13. Frégeau M.O., Oberstedt S., Brys T., Gamboni T., Geerts W., Hambsch F.J., Oberstedt A., Vidali M. // *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2015. V. 791. P. 58. doi 10.1016/j.nima.2015.04.030
14. Schirru F., Chokheli D., Kiš M. // *Diamond and Related Materials*. 2014. V. 49. P. 96.
15. Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Buga S.G., Kuznetsov M.S., Terentiev S.A., Semenov A.N., Blank V.D. // *Diamond and Related Materials*. 2013. V. 35. P. 19. doi 10.1016/j.diamond.2013.02.011
16. Blank V.D., Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Buga S.G., Kuznetsov M.S., Teteruk D.V., Kornilov N.V., Terentiev S.A., Volkov A.P. // *Diamond and Related Materials*. 2015. V. 57. P. 32. doi 10.1016/j.diamond.2015.01.005
17. Tarelkin S., Bormashov V., Buga S., Volkov A., Teteruk D., Kornilov N., Kuznetsov M., Terentiev S., Golovanov A., Blank V. // *Physica status solidi (a)*. 2015. V. 212. № 11. P. 2621. doi 10.1002/pssa.201532213
18. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
19. Breese M.B.H. // *J. Appl. Phys.* 1993. V. 74. № 6. P. 3789.