

УДК 539.1.07

СdTe-ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2011 г. С. Л. Эльяш, А. В. Родигин, Т. В. Лойко, А. И. Поляков*, С. В. Капитанов*

РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики

Россия, 607190, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

**ВНИИ автоматики*

Россия, 101000, Москва, а/я 918

Поступила в редакцию 07.02.2011 г.

Приведены характеристики и технология изготовления полупроводниковых детекторов из прессованного теллурида кадмия. Чувствительность детекторов $\sim(1-5) \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с/квант}$. Проведена калибровка детекторов СППД29к и СППД29-02 с помощью рентгеновского излучения субнаносекундной длительности, генерируемого ускорителем СПИН-2. Измеренные длительности импульсов составили $\tau_{0,5} = 0.29 \text{ нс}$ и $\tau_{0,5} = 0.47 \text{ нс}$ соответственно. Зарегистрирована форма импульса рентгеновского излучения ускорителя АРСА.

Полупроводниковые детекторы широко используются для регистрации рентгеновского излучения в научных и прикладных работах [1]. Взаимодействие квантов рентгеновского излучения с чувствительным элементом (ч.э.) детектора приводит к образованию электронно-дырочных пар в полупроводнике, которые под действием электрического поля, созданного напряжением питания, вызывают ток в нагрузке. Временное разрешение детекторов определяется подвижностью, временем жизни, скоростью насыщения носителей заряда и структурой чувствительного элемента. С развитием наносекундной высоковольтной техники появилась необходимость в регистрации интенсивных потоков рентгеновского излучения наносекундной длительности, что привело к появлению полупроводниковых детекторов с субнаносекундным временным разрешением.

Во ВНИИА разработаны полупроводниковые детекторы рентгеновского излучения СППД29к и СППД29-02. Детектор СППД29-02 предназначен для регистрации рентгеновского излучения с энергией выше 4 кэВ, детектор СППД29к – выше 30 кэВ. Чувствительный элемент детекторов СППД29 изготовлен на основе теллурида кадмия СdTe по методу порошковой металлургии. Использован поликристаллический теллурид кадмия с удельным сопротивлением $\rho > 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, который подвергался измельчению, просеиванию, прессовке и термическому отжигу [2]. В процессе прессовки и последующего отжига формируется полностью разориентированная структура, характеризующаяся наличием потенциальных барьеров между частицами. Высокая

концентрация дефектов на границах раздела между частицами обуславливает высокую радиационную стойкость материала. Время пролета носителей заряда в зависимости от размера частицы полупроводника составляет $10^{-12} - 10^{-9} \text{ с}$.

Чувствительность детектора к ионизирующему излучению определяется размером частиц и степенью “заращивания” дефектов в процессе термического отжига. В результате отжига чувствительность прессованного ч.э. увеличивается в десятки раз и составляет $\sim(1-5) \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с/квант}$ для γ -излучения с энергией 1.25 МэВ.

Метод порошковой металлургии позволяет формировать ч.э. детектора различной формы, в частности, для детектора СППД29-02 он выполнен в форме диска диаметром 5 мм и толщиной 1 мм. Электроды нанесены напылением слоя алюминия толщиной до 0.5 мкм на обе торцевые стороны ч.э. В плоской геометрии носители заряда находятся в однородном электрическом поле. Чувствительный элемент детектора СППД29к выполнен в виде коаксиальной структуры: центральный электрод-стержень диаметром 2 мм и внешний электрод-цилиндр диаметром 6 мм и длиной 3 мм. При такой геометрии ч.э. находится в неоднородном поле. Цилиндрические конфигурации ч.э. по сравнению с плоской конструкцией дают преимущество по временному разрешению [3].

В работе [4] проведены расчеты для цилиндрического и дискового ч.э. на основе монокристаллического полупроводника (гипотетическая модель). Полученные результаты: $\tau_{0,5} = 9 \text{ нс}$ для цилиндрического ч.э. и $\tau_{0,5} = 40 \text{ нс}$ для дискового –

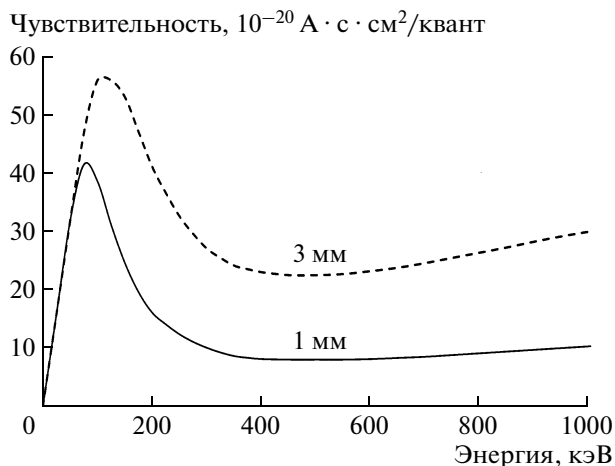


Рис. 1. Зависимости чувствительности детектора СППД29 от энергии γ -излучения для ч.э. разной толщины (цифры у кривых).

подтверждают преимущество цилиндрической конфигурации по временному разрешению. Проведенные расчеты для ч.э. из теллурида кадмия в коаксиальной цилиндрической геометрии показали, что временное разрешение может достигать $\tau_{0.5} = 0.2\text{--}0.3$ нс [4]. Таким образом, при переходе от монокристаллического материала к поликристаллическому временное разрешение значительно улучшается.

Детекторы изготовлены в корпусе разъема СР50-1ФВ. Корпус позволяет подсоединять кабельные линии с разъемами СР50-74ФВ. Темновой ток детектора при рабочем напряжении в нормальных условиях не превышает 100 мкА. Максимальный импульсный линейный выходной ток на сопротивлении нагрузки 50 Ом при отклонении от линейности 10% не менее 0.5 А. Расчетные зависимости чувствительности детектора от энергии γ -излучения для ч.э. толщиной 1 и 3 мм приведены на рис. 1. При расчетах энергия образования пары носителей заряда принята равной 4.7 эВ.

Измерение временного разрешения полупроводниковых детекторов проводилось с помощью рентгеновского излучения субнаносекундной длительности, генерируемого ускорителем СПИН-2 [5]. Ускоритель СПИН-2, нагруженный на электронную трубку ИМАЗ-150Э, генерирует на ее выходе электронный пучок субнаносекундной длительности с током ~ 2 кА и максимальной энергией ~ 600 кэВ. Преобразование электронного излучения в рентгеновское происходит при торможении электронов на внешней мишени (танталовой фольге толщиной 20 мкм), которая расположена на выходном окне трубки. Прошедшие фольгу

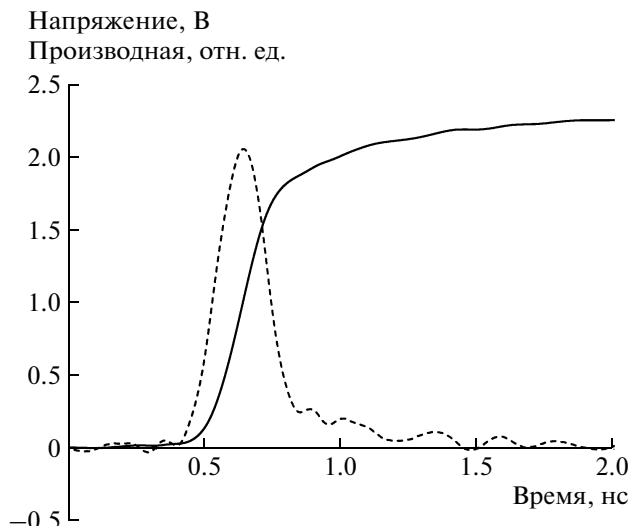


Рис. 2. Сигнал $h(t)$ с калибратора Fluke-9500В, прошедший через тракт регистрации (сплошная линия), и производная $g(t)$ этого сигнала (пунктирная линия).

электроны поглощались в фильтре из алюминия толщиной 1 мм. Длительность импульсов излучения, зарегистрированная ранее в [6] осциллографом СРГ-7, составила 0.3 нс, восстановленная — 0.15 нс.

При регистрации импульса рентгеновского излучения детекторы СППД29 располагались на расстоянии 1 см от окна трубки. Доза излучения измерялась термолюминесцентным дозиметром ИКС [7] и составила 20–25 Р/импульс, мощность дозы $\sim 10^{11}$ Р/с, эффективная энергия квантов ~ 50 кэВ. Сигнал с детектора по кабелю РК-50-2-22 длиной 6 м через разделительный конденсатор $0.05 \text{ мкФ} \times 2 \text{ кВ}$ подавался на вход регистрирующего осциллографа LeCroy WM8500А с полосой пропускания 5 ГГц. При необходимости регистрируемый импульс ослаблялся в 10 раз с помощью быстродействующего делителя коаксиальной конструкции. Напряжение питания детектора составляло 1.6 кВ.

Предварительно были определены переходные характеристики тракта регистрации при помощи калибратора Fluke-9500В. С этой целью сигнал с калибратора сначала подавался на осциллограф LeCroy. Зарегистрированный сигнал имел форму «ступеньки» с фронтом (по уровням 0.1–0.9) $\tau_{\text{ф}} = 0.18$ нс. Затем сигнал с калибратора подавался на тракт регистрации, содержащий кабель и разделительный конденсатор. Осциллограмма сигнала приведена на рис. 2 (сплошная линия). Длительность участка быстрого нарастания переходного процесса составила 0.26 нс. В импульсной технике при определении временного разрешения используют как переходную

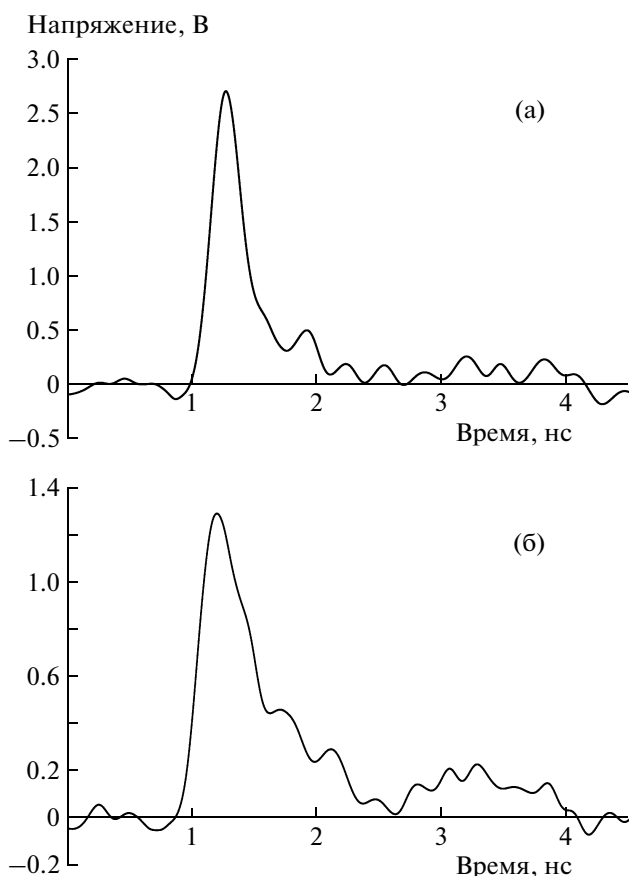


Рис. 3. Осциллограммы рентгеновского излучения ускорителя СПИН-2, зарегистрированные с помощью детекторов: **а** – СППД-29к, **б** – СППД-29-02.

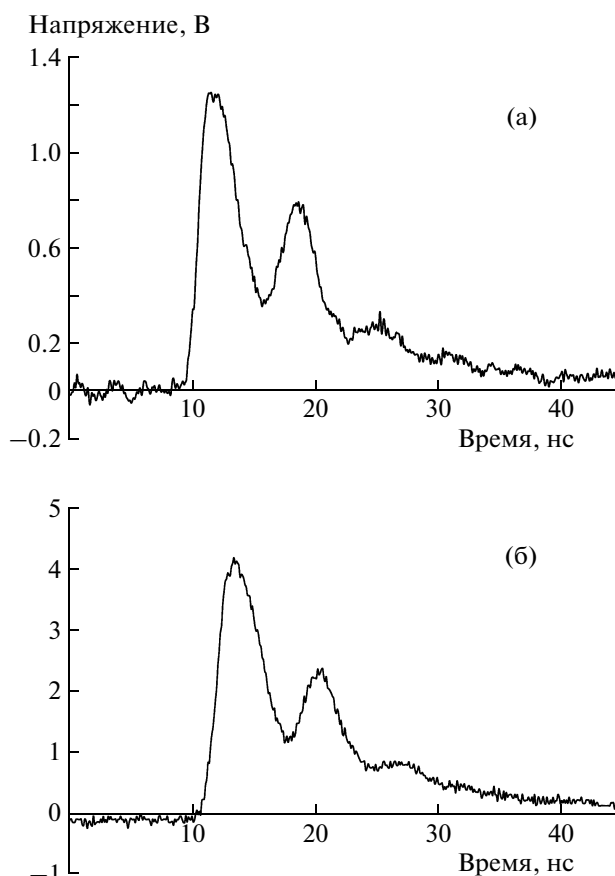


Рис. 4. Осциллограммы рентгеновского излучения ускорителя АРСА, зарегистрированные с помощью детекторов: **а** – СППД-29к, **б** – СППД-29-02.

$h(t)$, так и импульсную $g(t)$ характеристики, которые связаны соотношением:

$$g(t) = dh(t)/dt.$$

За временное разрешение принимается ширина на полувысоте $\tau_{0.5}$ сигнала импульсной характеристики $g(t)$ [8]. Поэтому измеренные переходные характеристики дифференцировались. В результате дифференцирования получены длительности сигнала с калибратора $\tau_{0.5к} = 0.18$ нс и с тракта регистрации $\tau_{0.5г} = 0.22$ нс (рис. 2, пунктирная линия). Отсюда можно определить импульсную характеристику тракта регистрации:

$$g(t) = \sqrt{\tau_{0.5г}^2 - \tau_{0.5к}^2} = 0.13 \text{ нс.}$$

Осциллограммы рентгеновского излучения ускорителя СПИН-2, зарегистрированные с помощью детекторов СППД-29к и СППД-29-02, приведены на рис. 3. Длительности импульсов излучения на полувысоте $\tau_{0.5}$ составили 0.29 и 0.47 нс соответственно. С учетом калибровки тракта регистрации и длительности рентгеновского излучения

импульсные характеристики детекторов СППД-29к и СППД-29-02 составили соответственно $\tau_{0.5} \approx 0.21$ нс, $\tau_{0.5} \approx 0.42$ нс.

Описанные детекторы использовались для регистрации наносекундных импульсов рентгеновского излучения малогабаритного ускорителя АРСА на напряжение 1 МВ [9]. Осциллограммы рентгеновского излучения приведены на рис. 4. Наблюдаемые три максимума соответствуют форме импульса высокого напряжения, приложенного к ускорительной трубке, и совпадают с импульсами, зарегистрированными другими детекторами.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что полупроводниковые детекторы СППД29 на основе теллурида кадмия, изготовленные по методу порошковой металлургии, обладают субнаносекундным временным разрешением. Зарегистрированные длительности импульсов излучения 0.29 и 0.47 нс свидетельствуют о преимуществе коаксиальных ч.э. по сравнению с плоскими, что соответствует ранее проведенным расчетам [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов Ю.К., Игнатъев О.В., Калинин А.И. и др.* Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. *Поляков А.И.* Патент № 2103765 РФ. Класс H01L21/02 // БИ. 1998. № 3.
3. *Malm H.* // *Revue de Physique Appliquee.* 1977. V. 12. P. 303.
4. *Андреев В.В., Поляков А.И.* // Технический прогресс в атомной промышленности. Серия Организация производства. 1990. № 10–11. С. 73.
5. *Желтов К.А.* Пикосекундные сильноточные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. *Лойко Т.В., Недойкаш Ю.М., Павловская Н.Г. и др.* // ПТЭ. 2000. № 4. С. 86.
7. *Бочвар И.А.* Метод дозиметрии ИКС. М.: Атомиздат, 1977.
8. *Альбиков З.А., Веретенников А.И., Козлов О.В.* Детекторы импульсного ионизирующего излучения. М.: Атомиздат, 1978.
9. *Эльяш С.Л., Калиновская Н.И., Донской Е.Н. и др.* // Атом. энергия. 1995. Т. 79. № 46. С. 462.