

УДК 539.1.074.5

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКИХ КВАНТОВ

В. Л. Кашеваров, Л. Н. Павлюченко, Г. А. Сокол, С. С. Сидорин

*Рассмотрены возможности кремниевого детектора с внутренним лавинным умножением заряда как регистратора мягкого рентгеновского излучения. Приведены экспериментальные данные по регистрации лавинным детектором квантов с энергией 5,9 кэВ ( $^{55}\text{Fe}$ ).*

Регистрация рентгеновских квантов в области энергий  $E_x < 10$  кэВ связана с решением, по крайней мере, двух проблем. Первая состоит в обеспечении достаточно высокой эффективности проникновения квантов в чувствительную область детектора, что определяется толщиной входного "окна" детектора. Вторая связана с обеспечением достаточно высокой чувствительности детектора, т.е. с соотношением сигнал/шум для квантов, поглотившихся в чувствительном объеме.

В настоящее время для регистрации рентгеновского излучения применяются в основном кремниевые полупроводниковые детекторы и газовые пропорциональные камеры. Разработаны и применяются также методы с использованием микроканальных пластин и электронно-оптических преобразователей в сочетании с люминофорами. Эти методы, однако, характеризуются квантовой эффективностью регистрации не более 25% и являются более дорогостоящими по сравнению с полупроводниковыми и газовыми детекторами. В то же время последние обладают значительной толщиной входного "окна" детектора, что снижает эффективность регистрации мягкой части рентгеновского спектра. Для кремниевых детекторов, в случае использования их в качестве спектрометров, необходима, кроме того, малощумящая (достаточно дорогая) электроника.

Эти обстоятельства стимулируют поиски и разработки более эффективных и относительно дешевых методов регистрации рентгеновских квантов.

В этой связи перспективными, на наш взгляд, являются кремниевые детекторы с внутренним умножением заряда – кремниевые лавинные детекторы (КЛД), характеризующиеся, с одной стороны, относительно малой толщиной входного "окна" и высоким

значением квантовой эффективности регистрации, а с другой стороны, и это главное преимущество перед обычными кремниевыми детекторами без усиления, – высокой чувствительностью регистрации, определяемой внутренним усилением.

В последние годы были получены значительные успехи в создании новых типов кремниевых детекторов [1, 2, 3]. Стало возможным увеличить коэффициент умножения до  $10^5$  при сравнительно небольшом уровне собственных шумов детектора и реализовать площадь чувствительной поверхности до  $25 \text{ мм}^2$ . Параметры детектора, таким образом, оказались достаточно весомым обоснованием для рассмотрения КЛД на основе МРП-структуры (металл – резистивный слой – полупроводник) в качестве перспективного детектора рентгеновских квантов. Цель настоящей работы – экспериментально показать возможность применения КЛД в качестве высокочувствительного рентгеновского детектора.

В работе использовался КЛД с  $\text{SiC}$  в качестве резистивного слоя.  $\text{SiC}$  наносился с помощью плазменного напыления на пластинку кремния  $p$ -типа проводимости, на которой предварительно создавались регулярные неоднородности путем внедрения кремния  $n$ -типа. Для создания КЛД использовался кремний с удельным сопротивлением  $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . При напряжении смещения  $U = 37 \text{ В}$  ширина области пространственного заряда (ОПЗ) равна  $2 \text{ мкм}$ , ширина области умножения равна  $0,25 \text{ мкм}$ . В таблице 1 приведены толщины различных слоев КЛД: слоя  $\text{SiC}$ , металлического контакта  $\text{Ti}$  и окисного слоя  $\text{SiO}_2$ , который неизбежно возникает при обработке поверхности кремниевой пластинки, и ОПЗ. Геометрическая структура КЛД представлена на рис. 1.

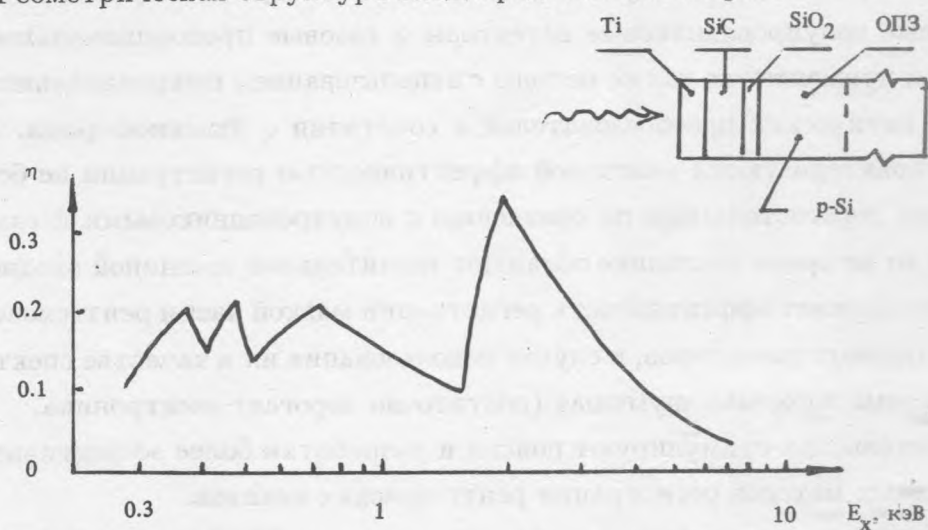


Рис. 1. Зависимость эффективности регистрации от энергии квантов  $E_x$  для КЛД с геометрическими параметрами, указанными в табл. 1.

Расчет эффективности регистрации рентгеновских квантов с учетом геометрических параметров КЛД для интервала энергий квантов от 0,1 до 10 кэВ проводился с использованием формулы ослабления потока рентгеновского излучения при прохождении через слой вещества:

$$I = I_0 \exp(-\mu d),$$

где  $I_0$  – первичный поток рентгеновского излучения,  $I$  – поток после прохождения слоя вещества толщиной  $d$  (см),  $\mu$  – коэффициент поглощения квантов с энергией  $E_x$ :

Т а б л и ц а 1

Геометрические параметры КЛД

Слой	Ti	SiC	SiO <sub>2</sub>	ОПЗ
Толщина, мкм	0,05	0,4	0,02	2,0

Коэффициенты  $\mu$  в зависимости от  $E_x$  для разных веществ брались из таблиц работы [4]. Результаты расчета представлены на рис. 1. Как видно из рисунка 1, КЛД благодаря малой толщине "окна" способен в принципе (при достаточно малых шумах) регистрировать одиночные рентгеновские кванты начиная с  $E_x = 0,3$  кэВ, причем с достаточно высокой эффективностью. Зависимость эффективности от энергии имеет несколько максимумов в области малых энергий. Положение и ширины этих максимумов зависят от конкретных веществ, входящих в состав детектора, но из-за малой относительной толщины этих слоев по сравнению с кремнием зависимость определяется в основном кремнием.

На рис. 2 даны расчетные зависимости эффективности регистрации от толщины ОПЗ (или слоя поглощения) для разных энергий квантов от 5 кэВ до 20 кэВ. Зависимость от толщины практически линейная из-за малости самих толщин поглощения.

Измерения эффективности регистрации рентгеновских квантов проводились с КЛД, который обладал следующими параметрами: площадь чувствительной поверхности 1,8 мм<sup>2</sup>, коэффициент умножения  $5 \cdot 10^3$  (при  $U = 37$  В), темновой ток  $5 \cdot 10^{-6}$  А (при  $U = 20$  В), область оптимального напряжения смещения  $U = 32-37$  В, полная толщина детектора 300 мкм.

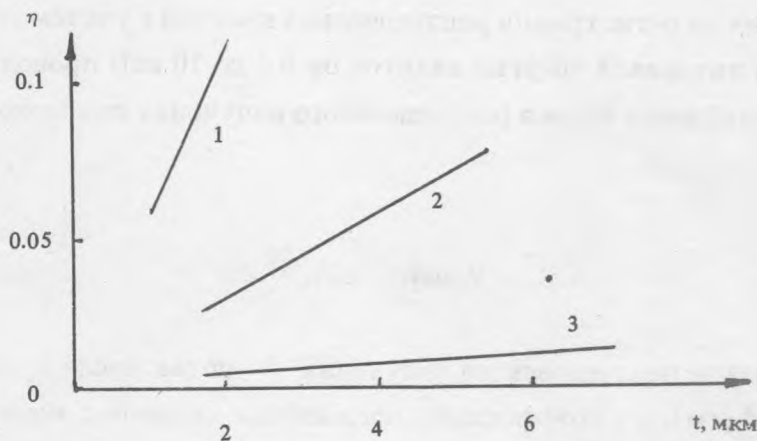


Рис. 2. Зависимость эффективности регистрации  $\eta$  от толщины ОПЗ детектора  $t$  для рентгеновских квантов с энергией  $E_x = 5$  (1); 10 (2) и 20 кэВ (3).

В качестве источника рентгеновского излучения использовался источник  $^{55}\text{Fe}$  с энергией  $E_x = 5,9$  кэВ. На рис. 3 представлен амплитудный спектр при облучении детектора квантами с энергией 5,9 кэВ. Как видно из рисунка, КЛД обладает достаточно высокой чувствительностью регистрации таких квантов. Введение порога, соответствующего положению минимума в амплитудном спектре, позволяет практически полностью отделиться от шума детектора.

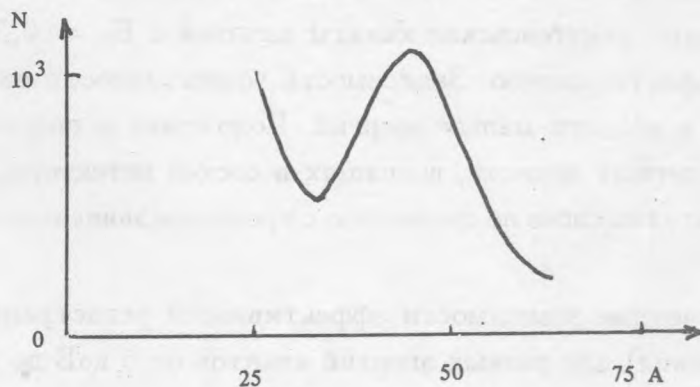


Рис. 3. Амплитудный спектр, полученный при облучении детектора квантами с энергией 5,9 кэВ ( $^{55}\text{Fe}$ ).

Таким образом, экспериментально показана способность КЛД, изготовленного на основе МРП-структуры, к регистрации рентгеновских квантов. Благодаря наличию внутреннего усиления в детекторе можно ограничиться сравнительно простым

усилителем-формирователем. В целом можно реализовать достаточно компактную и относительно дешевую конструкцию регистратора-дозиметра рентгеновского излучения для энергий  $E_x < 10$  кэВ.

Путем введения поглотителей и порогов регистрации можно получить регистраторы рентгеновского излучения, чувствительные к определенным интервалам энергии  $E_x$ .

Одним из существенных преимуществ дозиметра на основе КЛД является его высокая радиационная стойкость, поскольку КЛД изготавливается из низкоомного материала.

Использование КЛД перспективно при исследовании синхротронного излучения, а также в ядерной физике, дозиметрии, геологии, медицине и в других областях науки и техники, где требуются компактные, нечувствительные к магнитным полям, радиационно стойкие и относительно дешевые детекторы рентгеновского излучения.

Авторы выражают признательность З. Я. Садыгову за полезные обсуждения.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Г о л ь б р а й х Н. И., П л о т н и к о в А. Б., Ш у б и н В. Э. Квантовая электроника, **2**, 2624 (1975).
- [2] Г а с а н о в А. Г. и др. Письма в ЖЭТФ, **14**, 706 (1988).
- [3] Г а с а н о в А. Г. и др. Препринт ИЯИ АН СССР, П-0673, 1990.
- [4] Н е н к е В. L. et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, **27**, no. 1, 1982.

Поступила в редакцию 4 февраля 1993 г.