

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СБОРА ЗАРЯДА АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

В.В. Охотников, С.А. Линник, А.В. Гайдайчук

Научный руководитель: к.т.н. С.А. Линник

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [vvohotnikov@yandex.ru](mailto:vvohotnikov@yandex.ru)

Эффективность алмазных детекторов по отношению к радиационным повреждениям от ионизирующего излучения широко изучалась группой «Генерация радиационного детектора алмазного сердечника», получившей название совместной работы RD42 [1]. Это сотрудничество, созданное в 1995 году, изучало разработку детекторов на основе поликристаллического алмаза CVD (pCVD). Сотрудничество RD42 провело несколько исследований облучения алмазных детекторов для анализа радиационной деградации расстояния сбора заряда (CCD) алмазных сенсоров [2-6]. Основываясь на результатах этих исследований облучения, была создана модель, описывающая уменьшение CCD алмазных датчиков относительно радиационного повреждения [7, 8].

Эффективность сбора заряда алмазными детекторами определяется длиной свободного пробега  $\lambda$  носителей заряда. Алмазный детектор со средней длиной свободного пробега выше толщины детектора  $d$  имеет полную эффективность сбора заряда 100%, тогда как детектор с  $\lambda < d$  имеет уменьшенный ССЕ. Средняя длина свободного пробега носителей заряда определяется их временем жизни  $\tau$ , которое определяется количеством дефектов в материале, которые, возможно, захватывают носители заряда и, следовательно, уменьшают их время жизни. Стандартная модель облучения основана на предположении, что количество дефектов  $N$  линейно возрастает с дозой облучения:

$$N(\Phi) = N_0 + k_N \times \Phi, \quad (1)$$

где  $\Phi$  - плотность частиц, вызывающая радиационный ущерб,  $k_N$  - постоянная повреждения, определяющая линейность между дефектами, создаваемыми на единицу флюенса, и с  $N_0$  в качестве начального числа дефектов для материала без облученного алмазного детектора. Время жизни носителя заряда  $\tau$  обратно пропорционально числу дефектов  $N$  в решетке алмаза:

$$\tau_{e,h} \sim N^{-1} \quad (2)$$

Время жизни носителей заряда в алмазе различно для электронных и дырочных носителей. Для упрощения этой модели следующие шаги вычисляются с использованием только одного общего времени жизни носителей заряда для электронных и дырочных носителей:  $\tau_{e,h} = \tau$ . Это можно сделать, поскольку стандартная модель излучения окончательно будет выражена в терминах CCD, где электронные и дырочные носители больше не различаются. Объединение уравнений 1 и 2 приводит к:

$$\frac{1}{\tau(\Phi)} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \times \Phi, \quad (3)$$

где постоянная  $k_\tau$  сохраняет линейность до  $k_N$  в уравнении 1 и  $\tau_0$  - начальное время жизни носителей заряда для необлученного алмазного датчика. Длина свободного пробега  $\lambda$  может быть выражена как функция времени жизни  $\tau$  и скорости дрейфа  $V_{drift}$  носителей заряда:

$$\lambda = V_{drift} \times \tau \quad (4)$$

Заменяя время жизни носителей заряда в уравнении 3 с соотношением в уравнении 4 для длины свободного пробега получается следующее уравнение:

$$\frac{1}{\lambda(\Phi)} = \frac{1}{\tau_0 \times V_{drift}} + \frac{k_\tau}{V_{drift}} \times \Phi, \quad (5)$$

$\tau_0 \times V_{drift}$  может быть выражено как  $\lambda_0$ , начальная длина свободного пробега для необлученного алмазного датчика и  $k_\tau$  и  $V_{drift}$  может быть объединена с конечной постоянной радиационного повреждения  $k$ , что приводит к:

$$\frac{1}{\lambda(\Phi)} = \frac{1}{\lambda_0} + k \times \Phi \quad (6)$$

Уравнение 6 является широко используемой параметризацией, описывающей радиационные повреждения в алмазе. Так как длина свободного пробега не может быть измерена непосредственно, 6 обычно преобразуют в эквивалент в CCD, используя уравнение 7

$$\frac{1}{CCD(\Phi)} = \frac{1}{CCD_0} + k \times \Phi, \quad (7)$$

CCD алмазного детектора по отношению к радиационному повреждению полностью характеризуется постоянной излучения  $k$ , которая определяется типом частицы и энергией, вызывающей радиационный ущерб. Исследования облучения, проведенные совместным исследованием RD42, определили константу излучения  $k = 6,5 \times 10^{-19} \text{ см}^2\mu\text{м}^{-1}$  [5] для облучения протонами с энергией 24 ГэВ. В этих исследованиях, CCD поликристаллических алмазных датчиков CVD регулярно измеряли после нескольких этапов облучения. Таким образом, протоны с длиной 24 ГэВ являются «золотым стандартом», к которому необходимо преобразовать любой радиационный ущерб, чтобы провести расчёт характеристик алмазного детектора pCVD. Кроме того, было обнаружено, что стандартная модель излучения описывает также индуцированное радиацией снижение CCD алмаза sCVD с тем же  $k$ -фактором. Разница между алмазами pCVD и алмазами sCVD – только в начальном значении CCD –  $CCD_0$ , которое намного больше для алмазных датчиков sCVD. Алмазные датчики, используемые в этом исследовании, работали при напряжении смещения HV = 500 В, в результате чего достигалось электрическое поле  $E = 1 \text{ В} / \mu\text{км}$  [8].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agnew P. Displacement thresholds in sapphire // *Philosophical Magazine* – 1992. – Т. 65/2 С. 355–361.
2. Adam W. Radiation hard diamond sensors for future tracking applications // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* – 2006. – Т. 565/1. – С. 278 – 283
3. Trischuk W. Recent advances in diamond detectors // *Proceedings for IHCEP08* – 2008. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: arXiv:0810.3429v1 [physics.ins-det].
4. Kagan H. Development of Single Crystal Chemical Vapor Deposition Diamonds for Detector Applications // Доклад: The Ohio State University Research Foundation (United States). – USA, 2009.
5. Cristinziani M. Diamond prototypes for the ATLAS SLHC pixel detector // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* – 2010. – Т. 623/1. – С 174–176.
6. Tsung J.-W. Signal and noise of diamond pixel detectors at high radiation fluences // *Journal of Instrumentation*. – 2012. – Т. 7/09. – P09009.
7. Borch E. Radiation damage in silicon detectors // *La Rivista del Nuovo Cimento* . – 1994. – 11. – С. 1–63.
8. Kassel F.R. The Rate Dependent Radiation Induced Signal Degradation of Diamond Detectors. Диссертация к. т. н. – Karlsruhe, 2017 – 213 с.