

УДК 621.3.049

Влияние радиации на характеристики датчиков ультрафиолетового излучения на основе природного алмаза¹

¹Громов Д. В., ^{2,3}Полевич С. А.

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Российская Федерация

²АО «НПП “Исток” им. Шокина»

г. Фрязино, Московская обл., 141190, Российская Федерация

sapol@fryazino.net

³АО «ЭНПО СПЭЛС»

Каширское шоссе, 31, г. Москва, 115409, Российская Федерация

sapol@spels.ru²

Получено: 20 февраля 2021 г.

Отрецензировано: 9 марта 2021 г.

Принято к публикации: 10 марта 2021 г.

Аннотация: Проведено исследование остаточных и переходных радиационных эффектов при воздействии стационарного и импульсного облучения гамма-квантами на характеристики датчиков ультрафиолетового излучения на основе природного алмаза с различными концентрациями сопутствующей примеси азота. Установлено, что влияние переходных радиационных эффектов может быть оценено с помощью модели BARITT диода.

Ключевые слова: гамма излучение, радиационные эффекты, датчики, ультрафиолетовое излучение.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Громов Д. В., Полевич С. А. Влияние радиации на характеристики датчиков ультрафиолетового излучения на основе природного алмаза // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 3, № 4. С. 424—432.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Громов, Д. В. Влияние радиации на характеристики датчиков ультрафиолетового излучения на основе природного алмаза / Д. В. Громов, С. А. Полевич // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2021. — Т. 3, № 4. — С. 424—432.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Effect of radiation on the characteristics of ultraviolet radiation sensors based on natural diamond

D. V. Gromov¹ and S. A. Polevich^{2,3}

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute).
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russian Federation*

²*Scientific & Production Enterprise "Istok", JSC
Fryazino, Moscow Region, 141190, Russian Federation*

³*Scientific & Production Enterprise "SPELS", JSC
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russian Federation
DVGromov@mephi.ru*

Received: February 20, 2021

Peer-reviewed: March 9, 2021

Accepted: March 10, 2021

Abstract: *Total dose and dose rate effects are investigated in ultraviolet sensors based on natural diamond with various concentrations of nitrogen impurity. Transient effects in the devices based on Ila-group natural diamond are described with a BARITT diode model.*

Keywords: *gamma radiation, radiation effects, sensors, ultraviolet radiation.*

For citation (IEEE): D. V. Gromov et al. "Effect of radiation on the characteristics of ultraviolet radiation sensors based on natural diamond," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 424–432, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Датчики ультрафиолетового (УФ) излучения широко используются в космических исследованиях, в высокотемпературных исследованиях плазмы, в спектральном анализе, в экологии, медицине и во многих других отраслях науки и техники. Ультрафиолетовые датчики применяются для определения толщины озонового слоя Земли и негативных последствий УФ-облучения в некоторых географических регионах.

Алмаз является перспективным материалом для создания датчиков коротковолнового электромагнитного УФ-диапазона благодаря характерному строению запрещенной зоны и спектральной характеристике (рис. 1), а также высоким значениям оптической прочности и радиационной стойкости. При этом наилучших результатов удается достичь при использовании природных алмазов [1].

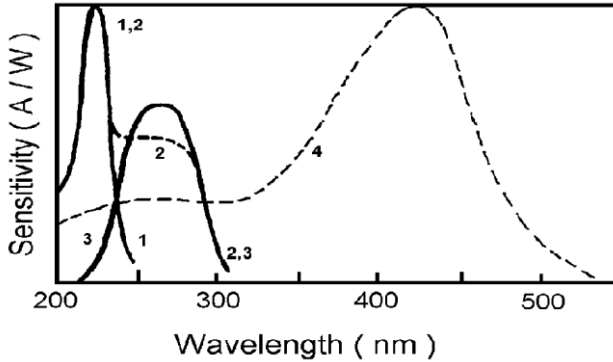


Рис. 1. Характеристики спектральной чувствительности натуральных алмазов: Па (1), «промежуточного» типа (2), Ia (3) и GaP диода (4).

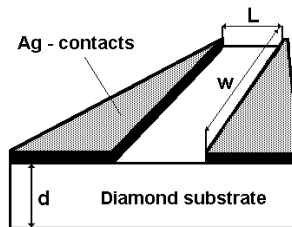
Fig. 1. Sensitivity spectral characteristics of natural diamond: Pa (1), “intermediate”-type (2), Ia (3) and of GaP diode (4)

В настоящей работе приведены результаты исследования характеристик датчиков для регистрации УФ-излучения на основе природного алмаза при воздействии стационарного и импульсного гамма-излучения.

Проведено расчетное моделирование деградации характеристик датчиков при воздействии импульсного ионизирующего гамма-излучения.

2. Объекты исследования и методика эксперимента

В качестве датчиков излучения использовались пластины природного алмаза типа Па с нанесенными серебряными контактами. Кристаллы датчиков были установлены в стандартные транзисторные корпуса без крышки. Исследовались два типа образцов датчиков, отличающихся значениями концентраций сопутствующих примесей азота ($N_{d1}=10^{14} \text{ см}^{-3}$ — Обр. 1 и $N_{d2}=10^{15} \text{ см}^{-3}$ — Обр. 2). Конструкция датчика показана на рис. 2.



$$d = 0.6...0.8 \text{ mm}; \quad L = 0.8...0.9 \text{ mm}; \quad W = 2.7...3.0 \text{ mm}$$

Рис. 2. УФ датчик на алмазном кристалле.

Fig. 2. UV-sensor based on diamond crystal

Радиационные испытания проводились на экспериментальной базе АО «НИИП». Импульсная гамма-установка характеризовалась средней длительностью импульса 22 нс, испытания проводились до максимальных уровней мощности дозы $5,0 \times 10^{10}$ рад/с. Интенсивность источника стационарного гамма-излучения Co^{60} составляла 280 рад/с. Образцы испытывались в диапазоне доз $1,7 \times 10^4$ — $1,2 \times 10^6$ рад. Диапазон рабочих напряжений датчиков составлял 10—100 В. Для учета вклада в ток непосредственно кристалла датчика других составляющих, связанных с радиационным экспериментом (проводимость воздушных промежутков и диэлектрических элементов корпусов, электретных эффектов в кабельных линиях, токов натекания, обусловленных проведением измерений в ионизованной среде и т. д.) использовался аналогичный транзисторный корпус без кристалла (далее «корпус»). Измерялись токи датчиков без дополнительной подсветки. Структурная схема для измерений при импульсном воздействии радиации приведена на рис. 3.

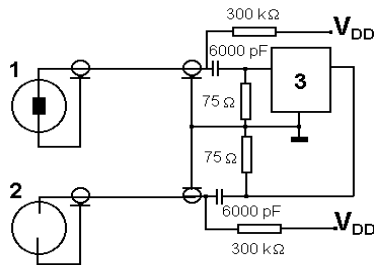


Рис. 3. Экспериментальная схема для измерения переходных характеристик:
 1 — образец в корпусе, 2 — образец без датчика, 3 — запоминающий осциллограф с дифференциальным входом.

Fig. 3. Experimental scheme for transient current response measurements: 1 – packaged sample; 2 – packaged sample without a sensor; 3 – storage oscilloscope with a differential input

3. Радиационные эффекты в алмазе

Структурные эффекты смещения представляют собой перемещения атомов из своего нормального положения в кристаллической решетке вещества, которые могут происходить вследствие передачи атому некоторой энергии при облучении. Образующиеся при этом нарушения кристаллической структуры носят название первичных радиационных дефектов.

Пороговая энергия смещения E_d определяется как минимальная энергия, которую необходимо приложить к атому, чтобы переместить его из нормального положения.

Пороговая энергия смещения (дефектообразования) E_d является фундаментальным показателем стойкости полупроводниковых материалов

к воздействию стационарных ионизирующих излучений при образовании радиационных дефектов в структуре материала. Наличие подобных дефектов в полупроводнике приводит к деградации основных электрофизических параметров — концентрации, времени жизни и подвижности носителей заряда. Следует также отметить, что значение пороговой энергии связано с постоянной решетки полупроводника a_0 .

Расчетные значения E_d для различных полупроводниковых материалов в зависимости от постоянной решетки материала приведены в табл. 1.

Табл.1. Величина пороговой энергии E_d в зависимости от постоянной решетки a_0 .

Table 1. The value of the threshold energy E_d depending on the lattice constant a_0 .

| Полупроводник | GaAs(Ge) | Si | C-SiC | Алмаз | GaN | H-SiC |
|------------------|----------|-------|-------|--------------|------|-------|
| $a_0, \text{Å}$ | 5,65 | 5,431 | 4,36 | 3,57 | 3,15 | 3,08 |
| $E_d, \text{эВ}$ | 9 | 12,8 | 37 | 80 | 145 | 153 |

С учетом данных табл. 1 можно ожидать, что алмаз является одним из наиболее стойких полупроводников, используемых в твердотельной электронике. Он уступает по этому фактору к только H-SiC и GaN.

Дозовые эффекты в первую очередь относятся к диэлектрическим слоям и покрытиям, которые используются при формировании приборных структур. Однако в ряде случаев в результате различных физических эффектов они являются причиной перестройки зарядовых состояний и в активных областях приборов.

В результате рассмотренных процессов в приборных слоях могут протекать дополнительные токи утечки, или, наоборот, первичные технологические дефекты могут компенсироваться с уменьшением общего тока прибора.

Действие импульсного ионизирующего излучения на полупроводниковые и диэлектрические элементы сопровождается ионизацией, т. е. генерацией неравновесных электронно-дырочных пар.

Мощность поглощенной дозы определяет скорость генерации неравновесных носителей заряда (интенсивность ионизации). Мерой интенсивности ионизации служит количество генерируемых излучением неравновесных электронно-дырочных пар в единице объема в единицу времени (скорость генерации носителей):

$$G\gamma(t) = 10^{14} \frac{\rho \cdot P\gamma(t)}{1,602E_{\text{и}}} = g_0 P\gamma(t), (1)$$

где ρ — плотность полупроводникового материала, г/см³; $P\gamma(t)$ — мощность поглощенной дозы, рад/с; $E_{\text{и}}=2,67 \times E_{\text{г}}+0,87$, эВ — энергия ионизации, $E_{\text{г}}$ —

ширина запрещенной зоны полупроводника, эВ; g_0 — эффективность ионизации, пар/(см³×рад), которая и определяет в конечном итоге значения фототоков, протекающих через прибор.

В табл. 2 приведены значения g_0 для различных материалов, применяемых в твердотельной СВЧ электронике.

Табл. 2. Значения g_0 для основных полупроводниковых материалов.

Table 2. g_0 for main semiconductor materials

| Материал | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Алмаз | H-SiC | GaN и Si | GaAs | Ge |
|--|------------------|--------------------------------|-----------|-------|----------|------|-----|
| $g_0 \times 10^{12}$, пар/(см ³ ×рад) | 5,9 | 10 | 14 | 23 | 40 | 71 | 110 |

При идентичных топологических и электрофизических параметрах элементов ионизационный ток в приборах на основе алмаза существенно меньше по сравнению с элементами на других полупроводниках.

4. Результаты экспериментальных исследований

При исследовании стационарных радиационных эффектов при воздействии гамма-излучения источника Co⁶⁰ до уровня 1,2 Мрад измерялись темновые (без воздействия УФ-излучения) токи датчика и ток «корпуса». Радиационные изменения характеристик для двух образцов датчиков представлены в табл. 3.

Табл. 3. Темновые токи алмазных датчиков до и после облучения.

Table 3. The dark currents of the diamond sensors before and after exposure

| Напряжение на датчике U, В | Темновой ток датчика до облучения, нА | | | Темновой ток датчика после облучения, нА | | |
|----------------------------|---------------------------------------|------------|----------|--|------------|----------|
| | Образец №1 | Образец №2 | «Корпус» | Образец №1 | Образец №2 | «Корпус» |
| 10 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 0,06 |
| 20 | 0,07 | 0,03 | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,12 |
| 40 | 0,15 | 0,09 | 0,18 | 0,13 | 0,09 | 0,25 |
| 60 | 0,25 | 0,15 | 0,28 | 0,22 | 0,14 | 0,38 |
| 80 | 0,35 | 0,22 | 0,38 | 0,30 | 0,18 | 0,49 |
| 100 | 0,49 | 0,30 | 0,49 | 0,39 | 0,23 | 0,53 |

Как и ожидалось, характеристики датчиков после облучения практически не деградировали. При этом токи «корпуса», как до, так и после облучения превышали токи алмазного датчика. Аналогичные результаты испытаний были получены и в исследованиях *p-i-n* структур, изготовленных на основе алмазных материалов [2].

Сводные данные для случая импульсного воздействия гамма-квантами приведены на рис. 4. На рисунке символами представлены экспериментальные значения фототоков. Пунктирной линией показана расчетная зависимость для фоторезистивной модели.

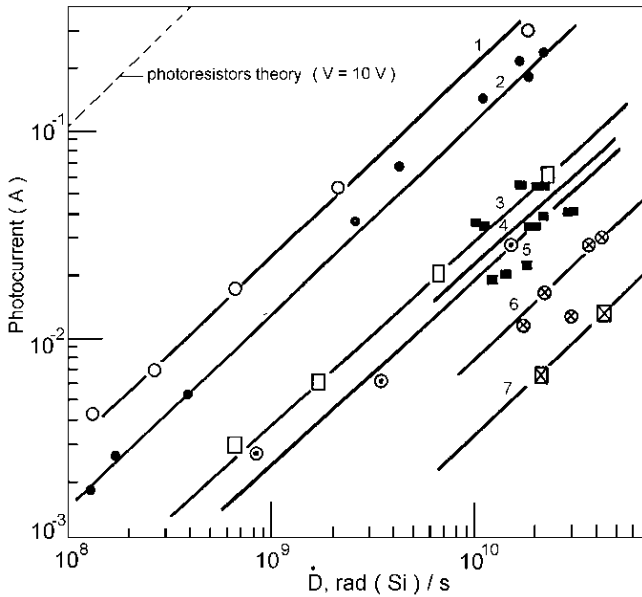


Рис. 4. Зависимости изменения фототока от мощности дозы: 1 — обр. № 2 с «корпусом», $U_d=100$ В; 2 — обр. № 2, $U_d=100$ В; 3 — обр. № 1 с «корпусом», $U_d=100$ В; 4 — обр. № 1, $U_d=100$ В; 5 — обр. № 2 с «корпусом», $U_d=10$ В; 6 — обр. № 2, $U_d=10$ В; 7 — обр. № 1 с «корпусом», $U_d=100$ В.

Fig. 4. Radiation-induced current to dose rate: 1 – Sample No. 2 with “packaged” sample, $V_{dd}=100$ V; 2 – Sample No. 2, $V_{dd}=100$ V; 3 – Sample No. 1 with “packaged” sample, $V_{dd}=100$ V; 4 – Sample No. 1, $V_{dd}=100$ V; 5 – Sample No. 2 with “packaged” sample, $V_{dd}=10$ V; 6 – Sample No. 2, $V_{dd}=10$ V; 7 – Sample No. 1 with “packaged” sample, $V_{dd}=10$ V

Как и в случае стационарного облучения, существенный вклад вносят токи утечки, определяемые корпусом, в котором установлен кристалл.

4. Обсуждение результатов

Как было отмечено выше, стационарное гамма-излучение слабо влияет на характеристики алмазных датчиков.

При воздействии импульсного воздействия гамма – излучения наблюдается генерация носителей заряда в объеме полупроводникового алмазного материала и формирование фототока между двумя контактами.

Если рассчитать фототок для структуры фоторезистора с двумя омическими контактами Ag — алмаз, то результаты расчета $I_{\text{ф}}$ будут существенно превышать экспериментальные значения (см. пунктирную зависимость на рис. 4).

В предположении, что контакты Ag к полупроводниковому алмазу не являются омическими, а рассматриваются как выпрямляющие, структура датчика представляет два встречно включенных диода с барьером Шоттки. Такой прибор нашел в литературе термин VARITT-диод [3].

Выражение для тока VARITT-диода может быть представлено в следующем виде:

$$I = A \times q \times n(D) \times v_s \times (U/U_{\text{FB}}),$$

где: A — эффективная площадь прибора; q — заряд электрона; $n(D) = g_0 \cdot D$, где g_0 — эффективность ионизации (пар/(см³·рад)); D — поглощенная за импульс доза гамма-квантов. Для алмаза $g_0 = 1,41 \times 10^{13}$ пар/(см³·рад); величина $D = P\gamma t_p$, где $P\gamma$ — мощность дозы импульсного излучения, t_p — длительность импульса гамма-излучения; v_s — дрейфовая скорость носителей заряда; $U_{\text{FB}} = q \times N_d \times L^2 / 2 \times \epsilon_d$ — напряжение плоских зон; L — расстояние между контактами; $N_d \approx n_{\text{dl}}$ — концентрация глубокой примеси азота; ϵ_d — диэлектрическая проницаемость алмаза.

Таким образом, зависимости тока для двойной барьерной диодной структуры зависит не только от процессов ионизации «зона — зона», но и от ионизации носителей с глубоких донорных уровней.

На рис. 5а и 5б представлены экспериментальные зависимости фототока алмазных датчиков от мощности дозы для двух образцов с различными значениями концентрации сопутствующих примесей азота.

Сравнение экспериментальных и расчетных результатов показал их удовлетворительное совпадение при использовании модели VARITT-диода.

5. Заключение

Проведено исследование остаточных и переходных радиационных эффектов в датчиках на основе натурального алмаза. Установлено, что параметры датчика показывают незначительное изменение до уровней дозы $1,2 \times 10^6$ рад (Si). Эффекты мощности в алмазных датчиках могут быть оценены с помощью модели VARITT-диода с учетом глубоких уровней.

Список литературы

- 1 Gromov D. V., Kvaskov V. B., Maltsev P. P., Nikiforov A. Y., Telets V. A. Ultraviolet Sensors Based on the Natural Diamond // Proc. of the Evrosensors X Conference, (Leuven, Belgium, 8–11 September (1996)). Vol. 5. Pp.1441–1444.

- 2 Denisenko A., Fahner W. R., Strahle U., Henschel H., Job R. Radiation Response of p-i-p Diodes on Diamond Substrates of Various Type : Electrical Properties of Semiconductor-Insulator Homojunctions // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. Vol. 43, No. 6. Pp. 3081–3088.
- 3 Chaffin R. G. Microwave semiconductor devices : Fundamentals and radiation effects. John Wiley & Sons, N.Y., 1973. 320 p.

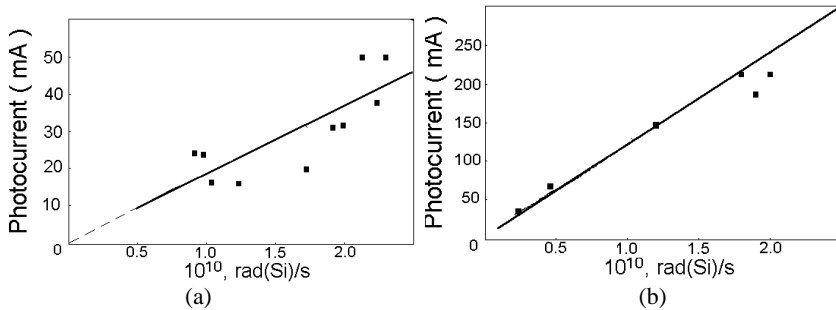


Рис. 5. Расчетные (линии) и измеренные (■) значения токов в зависимости от мощности дозы для обр. № 1 ($N_d=10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $U_d=100 \text{ В}$) (а); обр. № 2 ($N_d=10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $U_d=100 \text{ В}$) (б).
Эффективная площадь контактов $\approx 2,4 \text{ мм}^2$.

Fig. 5. The calculated (line) and measured (■) current as a function of dose rate for Sample No. 1 ($N_d=10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $V=100 \text{ V}$) (a); Sample No. 2 ($N_d=10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $V=100 \text{ V}$) (b), effective area $A \approx 2,4 \text{ mm}^2$

Информация об авторах

Громов Дмитрий Викторович, профессор Национального исследовательского университета «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-1601-9390.

Полевич Станислав Анатольевич, ведущий инженер АО «НПП “Исток” им. Шокина» г. Фрязино, Московская обл., Российская Федерация.

Information about the authors

Dmitry V. Gromov, Professor of National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0003-1601-9390.

Stanislav A. Polevich, leading engineer of Scientific & Production Enterprise “Istok”, JSC, Fryazino, Moscow Region, Russian Federation.