

Чувствительный элемент датчика мощности дозы гамма-излучения*М. Ю. Никифорова*

Приведены результаты экспериментального исследования влияния гамма-излучения на вольт-амперные характеристики кремниевых $p-i-n$ -диодов BPW34 фирмы Osram для их применения в качестве чувствительных элементов датчиков мощности поглощенной дозы в составе устройств управления автоматизированных систем. Получены статические характеристики $p-i-n$ -диодов при воздействии гамма-излучения. Определен диапазон обратных напряжений, соответствующих наибольшей чувствительности $p-i-n$ -диодных первичных преобразователей. Получено аналитическое выражение статической характеристики $p-i-n$ -диодов при максимальной чувствительности к гамма-излучению.

Ключевые слова: $p-i-n$ -диод, BPW34, чувствительный элемент, мощность поглощенной дозы, гамма-излучение.

Введение

В автоматизированных системах научных исследований, включая автоматизированные экспериментальные комплексы изучения воздействия ионизирующего излучения, в качестве датчиков применяются различные типы первичных преобразователей. Они позволяют оптимизировать процесс управления такими системами и комплексами, поскольку входят в состав устройств управления для стабилизации заданных рабочих режимов, требующих оценки параметров радиации.

Основными типами современных датчиков радиоактивных излучений, подразделяемыми в зависимости от способа взаимодействия ионизирующего излучения с материалом первичного преобразователя, являются полупроводниковые, ионизационные и сцинтилляционные [1, 2]. Среди них полупроводниковые первичные преобразователи характеризуются наилучшим энергетическим разрешением (наименьшей удельной энергией образования одной пары носителей заряда электрон-дырка), наименьшими массогабаритными параметрами, удобством сопряжения со вторичными преобразователями устройств управления, возможностью функционирования в реальном времени. Такие первичные преобразователи обычно ре-

ализуются на основе полупроводниковых диодов, функционирующих при обратном (запирающем) смещении, задаваемом внешним источником напряжения. При отсутствии облучения через диод протекает т. н. темновой ток, под действием радиации ток увеличивается пропорционально мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Первые исследования воздействия гамма-излучения на полупроводниковые диоды относятся к 60-м годам XX века. Обзор исследований и описание физического механизма воздействия гамма-излучения на полупроводниковые диоды приведены, например, в работе [3].

Оптимальными полупроводниковыми диодами с точки зрения большей квантовой эффективности и меньшей инерционности, а следовательно, и большего быстродействия, являются диоды с $p-i-n$ -структурой. На основе $p-i-n$ -диодных преобразователей разработаны и используются различные датчики ионизирующего излучения. Так, например, в эксперименте Super-LHC (ЦЕРН) для радиационного мониторинга высокоэнергетических протонов применялись полупроводниковые кремниевые $p-i-n$ -диоды [4]. Показано, что влияние высокоинтенсивного гамма-излучения с мощностью поглощенной дозы 100 Гр/ч на вольт-амперные характеристики четырех типов кремниевых $p-i-n$ -диодов приводит к изменению обратного тока [5].

После окончания радиационного воздействия обратный ток всех типов исследованных в работе [5] $p-i-n$ -диодов незначительно восстанавливался вследствие временного отжига, обусловленного образованием более стабильных дефектов кристаллической решетки, возникших вследствие воздействия гамма-излучения.

Никифорова Марина Юрьевна, доцент, к. т. н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.
Тел. 8 (499) 324-01-84. E-mail: mynikiforova@mephi.ru

Статья поступила в редакцию 4 мая 2017 г.

Изучено также воздействие низкоинтенсивного гамма-излучения с мощностью поглощенной дозы в диапазоне от 0,93 до 67 Гр/ч на изменение тока при нулевом внешнем напряжении четырех типов $p-i-n$ -диодов коммерческого назначения для их использования в качестве дозиметров при проведении измерений в реальном масштабе времени [6].

Целью данной работы явилось исследование воздействия гамма-излучения на параметры и характеристики кремниевых $p-i-n$ -диодов ВРW34 фирмы Osram для их использования в качестве чувствительных элементов датчиков мощности поглощенной дозы в составе устройств управления автоматизированных систем и комплексов. Фотодиоды ВРW34 коммерческого назначения являются распространенными и доступными $p-i-n$ -диодами, характеризующимися широким рабочим диапазоном температур и большой площадью, чувствительной к излучению [7].

В статье также описано компьютерное моделирование экспериментальных результатов зависимости тока от мощности поглощенной дозы при максимальной чувствительности $p-i-n$ -диодов к гамма-излучению.

Структура, параметры и характеристики чувствительного элемента на основе $p-i-n$ -диода

Структура $p-i-n$ -диода представляет собой области дырочной и электронной проводимости полупроводника, т. е. p - и n -области соответственно, разделенные слоем с собственной проводимостью (i -слоем) [8].

Ионизирующее излучение поглощается полупроводником с одновременным образованием свободных носителей заряда (электронов и дырок). Чувствительные к воздействию ионизирующего излучения $p-i-n$ -диодные первичные преобразователи функционируют при обратном смещении, при этом внешнее напряжение падает, в основном, на i -слой, удельное сопротивление которого значительно (на несколько порядков) превышает удельное сопротивление p - и n -областей. При таком смещении вектор напряженности внешнего электрического поля в i -слое сонаправлен с вектором напряженности внутреннего электрического поля, обусловленным пространственным разделением отрицательно заряженных ионов акцепторной примеси и положительно заряженных ионов донорной примеси, сосредоточенных в p - и n -областях на границе с i -слоем соответственно, и суммируется с ним. Генерированные под действием ионизирующего излучения в i -слое электроны дрейфуют в n -область, дырки –

в p -область, таким образом увеличивая абсолютную величину обратного тока, протекающего через $p-i-n$ -диод, пропорционально величине мощности излучения. Носители заряда, образованные при таком радиационном воздействии в p - и n -областях, не влияют на обратный ток $p-i-n$ -диода, поскольку его изменение может быть обусловлено только неосновными носителями заряда, генерированными в p - и n -областях на расстоянии, не большем диффузионной длины от границы с i -слоем, вероятность рекомбинации которых с основными носителями заряда этих областей очень высока.

Обратный ток $p-i-n$ -диода I при постоянном значении внешнего приложенного напряжения складывается из темнового тока I_T без воздействия излучения и тока ΔI , обусловленного генерацией избыточных носителей заряда под действием гамма-излучения: $I = I_T + \Delta I$.

Токовая чувствительность $p-i-n$ -диодов S к воздействию гамма-излучения при постоянном значении внешнего напряжения U выражается в виде $S = \left| \frac{\Delta I}{\Delta H} \right|$, где H – мощность поглощенной дозы.

Под действием ионизирующего излучения изменяются, в том числе, электрические параметры и характеристики $p-i-n$ -диодов, например, обратный ток, дифференциальное сопротивление r_∂ , определяемое в виде $r_\partial = \frac{dU}{dI}$, и напряжение пробоя $U_{\text{П}}$. Условно обратную ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) можно разделить на две области: рабочий участок полупроводниковых диодов при $|U| < U_{\text{П}}$ и область пробоя при $|U| > U_{\text{П}}$.

Методика и техника эксперимента

Измерительная установка для проведения исследований $p-i-n$ -диодов включала следующие составные части: источник гамма-излучения, персональный компьютер с установленным программным обеспечением для управления источником гамма-излучения и измерителем, отображения на экране монитора в реальном масштабе времени ВАХ и числовых значений измеренных параметров $p-i-n$ -диодов, а также хранения полученных данных. Источником гамма-излучения являлась рентгеновская трубка «БС6–Мо». Для подключения объектов исследования ($p-i-n$ -диодов) к измерителю параметров полупроводниковых приборов применялось специальное контактирующее устройство. Источник гамма-излучения, объект испытаний и контактирующее устройство были заключены в светонепроницаемый свинцовый

корпус, обеспечивающий радиационную безопасность эксплуатации и позволяющий при проведении измерений исключить влияние видимого излучения.

Фотодиоды BPW34 в ходе предварительных исследований показали степенную зависимость

тока *p-i-n*-диодов BPW34 от мощности дозы гамма-излучения с показателем степени, близким к единице, и высокое напряжение пробоя, составляющее не менее -80 В.

Основные технические параметры *p-i-n*-диодов BPW34 [9] приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические параметры *p-i-n*-диодов BPW34

Параметр	Значение параметра
Темновой ток при обратном напряжении -10 В	2 нА
Максимальный темновой ток при обратном напряжении -10 В	30 нА
Температурный коэффициент напряжения	-2,6 мВ/°С
Площадь чувствительной области	7,0 мм ²
Габаритные размеры	5,4×4,0×0,6 мм
Минимальная рабочая температура	-40 °С
Максимальная рабочая температура	100 °С

С использованием измерительной установки исследовано влияние гамма-излучения с мощностью поглощенной дозы в диапазоне от 1,5 до 34 мГр/с на вольт-амперные характеристики выборки кремниевых *p-i-n*-диодов BPW34 в количестве 8 штук при температуре окружающей среды 20,5±1,5 °С.

Результаты экспериментальных исследований

На основании экспериментальных данных при отсутствии воздействия гамма-излучения исследован разброс значений темнового тока *p-i-n*-диодов относительно среднего значения. Полученная зависимость коэффициента вариации *V* темнового тока от приложенного к *p-i-n*-диодам напряжения, определяемого выражением

$$V = \frac{\sigma_T}{\langle I_T \rangle} \times 100, \text{ где } \langle I_T \rangle - \text{среднее значение тем-}$$

нового тока, σ_T – среднеквадратичное отклонение темнового тока исследованной выборки, позволила сделать вывод об увеличении коэффициента вариации темнового тока при возрастании обратного напряжения *p-i-n*-диодов.

Поскольку разброс значений темнового тока *p-i-n*-диодов исследованной выборки относительно среднего значения достигает 100 %, статической характеристикой *p-i-n*-диодов является зависимость ΔI от мощности поглощенной дозы.

При выполнении исследований было изучено влияние гамма-излучения на обратный ток *p-i-n*-диодов. Зависимости изменения тока *p-i-n*-диодов под действием гамма-излучения ΔI от обратного напряжения *U* для различных значений мощностей поглощенной дозы приведены на рис. 1.

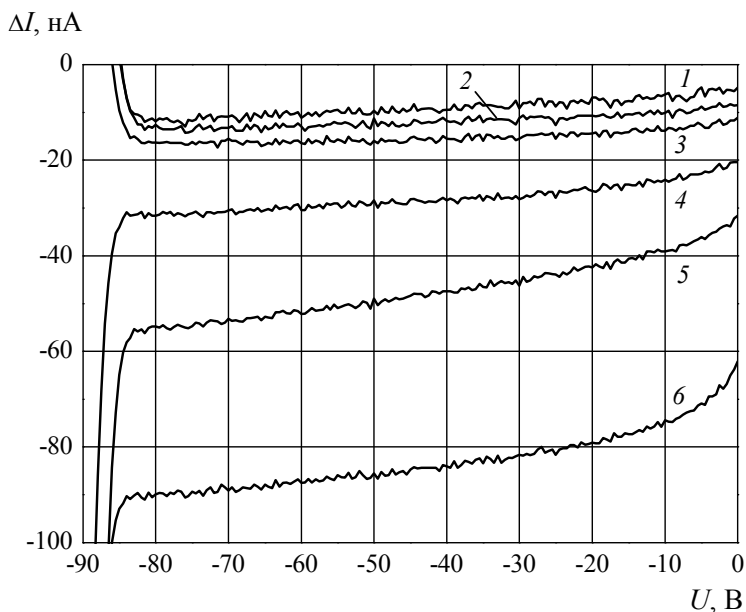


Рис. 1. Зависимости изменения тока *p-i-n*-диодов под действием гамма-излучения ΔI от обратного напряжения при различных мощностях поглощенной дозы (кривая 1 – 2,2 мГр/с, 2 – 3,2 мГр/с, 3 – 3,9 мГр/с, 4 – 7 мГр/с, 5 – 14 мГр/с, 6 – 34 мГр/с).

В ходе исследований было установлено, что под действием гамма-излучения возрастает абсолютная величина составляющей обратного тока $p-i-n$ -диодов ΔI (см. рис. 1), величина напряжения пробоя не зависит от мощности поглощенной дозы и для исследованной выборки составляет величину -81 ± 3 В, порог чувствительности к гамма-излучению составляет величину $6,6 \pm 1,2$ мГр/с. Сравнение обратных ветвей ВАХ $p-i-n$ -диодов

при воздействии гамма-излучения позволило установить, что с ростом мощности поглощенной дозы значение дифференциального сопротивления $p-i-n$ -диодов возрастает.

Влияние величины обратного напряжения на статическую характеристику $\Delta I(H)$ и токовую чувствительность от мощности поглощенной дозы $p-i-n$ диодов показано на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

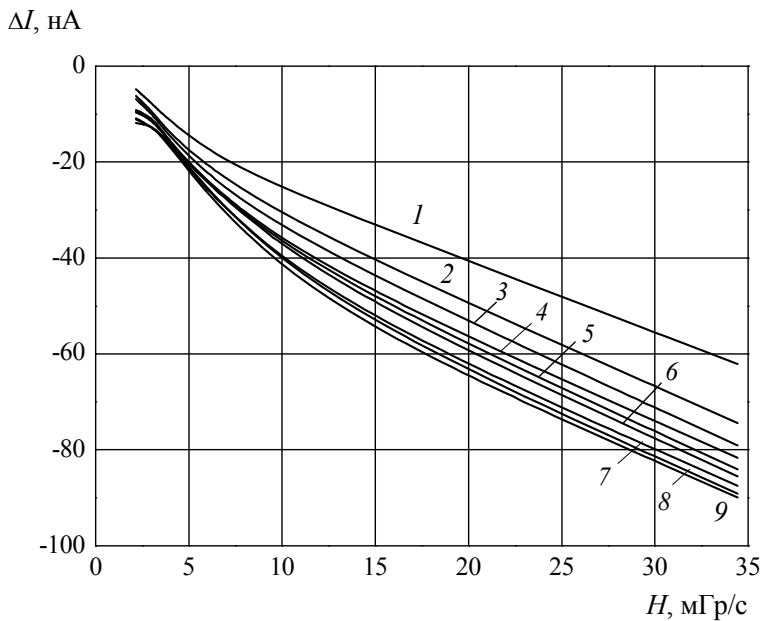


Рис. 2. Статические характеристики $p-i-n$ -диодов для различных значений обратного напряжения U : 0, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70 и -80 В соответствуют зависимостям 1-9.

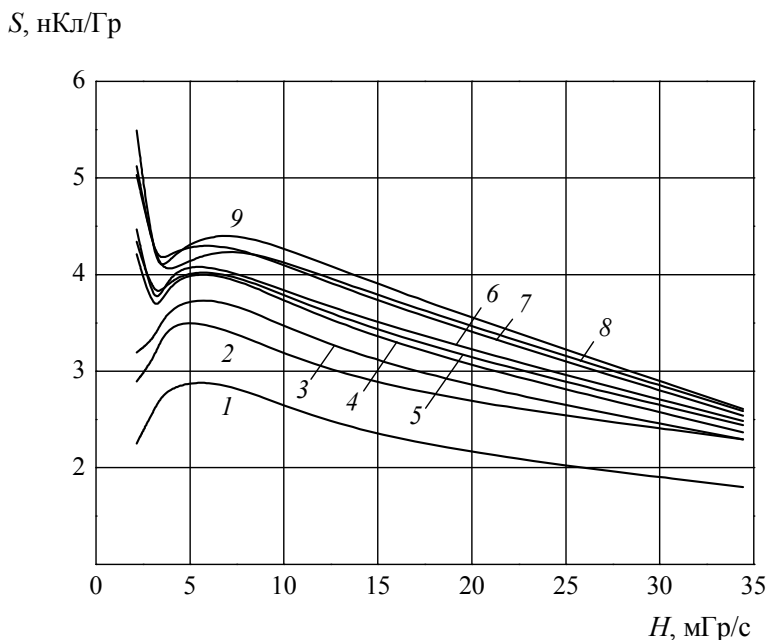


Рис. 3. Зависимости токовой чувствительности $p-i-n$ диодов от мощности поглощенной дозы для различных значений обратного напряжения U : 0, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70 и -80 В соответствуют зависимостям 1-9.

Из сравнения экспериментальных зависимостей, приведенных на рис. 2, следует, что абсолютная величина обратного тока $p-i-n$ -диодов увеличивается с ростом мощности поглощенной дозы и обратного напряжения. Токовая чувстви-

тельность $p-i-n$ -диодов (рис. 3) возрастает при увеличении обратного напряжения, достигает наибольшего значения в диапазоне мощности поглощенной дозы от 3,9 до 7 мГр/с и максимальна при обратном напряжении -70 ± 10 В.

При выполнении исследований было определено, что по завершении радиационного воздействия обратный ток всех *p-i-n*-диодов исследованной выборки восстанавливался до значений темнового тока перед началом облучения вследствие кратковременного воздействия гамма-излучения.

Средняя статическая характеристика *p-i-n*-диодов при максимальной токовой чувствительности

к гамма-излучению, соответствующей обратному напряжению $U = -70$ В, с указанием среднеквадратичной ошибки экспериментальных значений приведена на рис. 4. Видно, что представленный здесь график является степенной зависимостью среднего изменения тока *p-i-n*-диодов $\langle \Delta I \rangle$ от мощности поглощенной дозы с показателем степени, близким к единице.

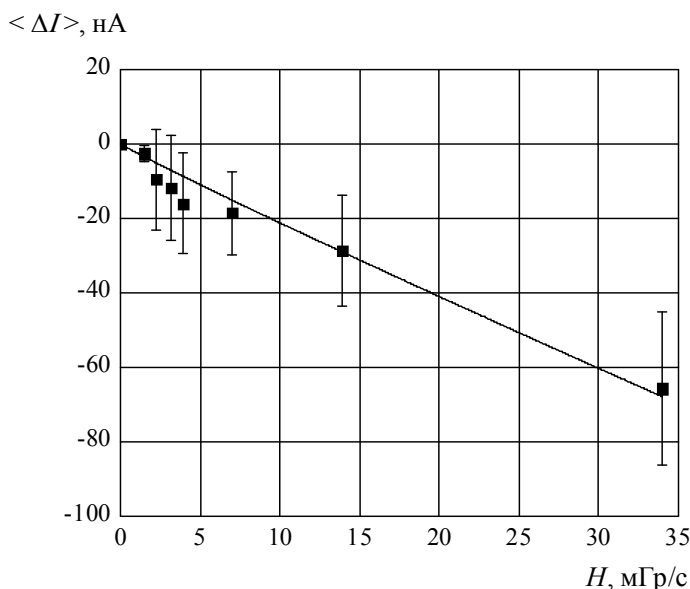


Рис. 4. Аппроксимация средней статической характеристики *p-i-n*-диодов при максимальной токовой чувствительности к гамма-излучению (на графике также показана среднеквадратичная ошибка).

Аппроксимация экспериментальных результатов

В среде Matlab выполнен численный анализ данных, представляющих статические характеристики *p-i-n*-диодов при значении обратного напряжения, равного -70 В, соответствующего максимальной токовой чувствительности к гамма-излучению. Аппроксимация средней статической характеристики, характерной переменной которой является мощность поглощенной дозы, с наилучшей точностью описывается степенной функцией, представимой в виде $\langle \Delta I \rangle = aH^b$.

Для оценки точности аппроксимации использованы следующие показатели:

- среднеквадратичная ошибка

$$\sigma = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N e^2(i)}, \text{ где } e(i) = \Delta I^*(i) - \Delta I(i), N -$$

число экспериментальных точек, ΔI^* – экспериментальное значение среднего тока, ΔI – значение аппроксимирующей модели;

- максимальная ошибка $e_m = \max_{1 \leq i \leq N} |e(i)|$.

Показатели аппроксимирующей модели равны $\sigma = 0,4307 \times 10^{-8}$ А, $e_m = 0,5327 \times 10^{-7}$ А.

В табл. 2 приведены полученные при численном анализе данных в среде Matlab значения параметров аппроксимации и их среднеквадратичная ошибка при значении скорректированного коэффициента детерминации 0,937, определенного с помощью критерия хи-квадрат со статистической значимостью, равной 0,1573.

Представленные в табл. 2 параметры аппроксимации a и b определены с точностью 23,2 и 8,4 % соответственно.

Таблица 2

Значения параметров аппроксимации и их среднеквадратичная ошибка

Параметр	Значение параметра	Среднеквадратичная ошибка
b	0,95	0,08
a (размерность А с ^b Гр ^{-b})	$-1,68 \times 10^{-6}$	$0,39 \times 10^{-6}$

Заклучение

В статье приведены результаты экспериментальных исследований воздействия гамма-излучения низкой и средней интенсивности до значительной мощности поглощенной дозы 34 Гр/с на электрические параметры и характеристики $p-i-n$ -диодов BPW34 фирмы Osram для применения в качестве датчиков устройств управления в автоматизированных системах научных исследований и автоматизированных экспериментальных комплексах, предназначенных для исследования воздействия ионизирующего излучения, с целью обеспечения безопасности и контроля радиационной обстановки.

Получены статические характеристики таких $p-i-n$ -диодных первичных преобразователей во всем рабочем диапазоне напряжений, определена область напряжений при их максимальной токовой чувствительности к гамма-излучению, для которой, с использованием компьютерного моделирования, предложено аналитическое выражение

статической характеристики $p-i-n$ -диодов, определяющей изменение их обратного тока от мощности поглощенной дозы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. – М: Техносфера, 2006.
2. Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement. – New York: Wiley, 2010.
3. Alexander D. R. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. Vol. 50. P. 3.
4. Mekki J., Moll M., Fahrner M., Glaser M., and Dusseau L. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2010. Vol. 57. P. 4.
5. Nikolić D., Stanković K., Timotijević L., Rajović Z., and Vujišić M., International Journal of Photoenergy. 2013. P. 843174.
6. Andjelković M. S., Ristić G. S. Nuclear Technology and Radiation Protection. 2013. Vol. 28. P. 1.
7. Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 59.
8. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices — A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007.
9. The BPW34 pin photodiode — http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/infrared-emitters%2c-detectors-and-sensors/silicon-photodetectors/photodiodes/pin-photodiodes-in-through-hole-package/bpw-34%2c-bpw-34-f%2c-bpw-34-fa/index.jsp.

PACS: 07.85.Fv, 85.60.Gz, 85.30.De

Gamma radiation sensor

M. U. Nikiforova

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: mynikiforova@mephi.ru

Received May 4, 2017

Influence of gamma radiation on the current-voltage characteristics of silicon pin diodes BPW34 (Osram) as gamma radiation sensors for automated control system has been investigated. The static performances have been obtained for all pin diodes operating voltage range upon exposure to gamma radiation dose rate up to 34 Gy/s. Corresponding to maximum sensitivity of pin diode detectors the reverse voltage range has been determined. An analytical expression of the static performance has been deduced for the maximum current sensitivity to gamma radiation.

Keywords: pin photodiode, BPW34, sensor, dose rate, gamma radiation.

REFERENCES

1. J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors* (Springer, New York-Berlin-Heidelberg-Hong Kong-London-Milan-Paris-Tokyo, 2004; Technosfera, Moscow, 2006).
2. G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (New York: Wiley, 2010).
3. D. R. Alexander, IEEE Trans. Nucl. Sci. **50**, 3 (2003).
4. J. Mekki, M. Moll, M. Fahrner, M. Glaser, and L. Dusseau, IEEE Trans. Nucl. Sci. **57**, 4 (2010).
5. D. Nikolić, K. Stanković, L. Timotijević, Z. Rajović, and M. Vujišić, International Journal of Photoenergy. P. 843174 (2013).
6. M. S. Andjelković and G. S. Ristić, Nuclear Technology and Radiation Protection **28**, 1 (2013).
7. N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 5, 59 (2015).
8. S. M. Sze and K.K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices* (A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007).
9. The BPW34 pin photodiode (http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/infrared-emitters%2c-detectors-and-sensors/silicon-photodetectors/photodiodes/pin-photodiodes-in-through-hole-package/bpw-34%2c-bpw-34-f%2c-bpw-34-fa/index.jsp).