

Н. Н. Морозов, В. С. Гнатюк

## Метод защиты электронной аппаратуры от импульсного рентгеновского излучения

Рентгеновские установки с высокой мгновенной интенсивностью применяются в ходе неразрушающего контроля массивных изделий, при радиационных испытаниях, а также для придания новых свойств различным полимерным материалам. В этих условиях входные каскады измерительных систем, призванных контролировать параметры процессов, подвержены воздействию мощного потока рентгеновского излучения, который порождает лавины вторичных электронов в чувствительной части первичных измерительных преобразователей, что приводит к выходу их из строя или временной неработоспособности из-за тиратронного эффекта в  $p$ - $n$ -переходах полупроводниковых электронных устройств. Представлен метод шунтирования цепей питания в реальном масштабе времени, применяемый для защиты входных каскадов электронных устройств, находящихся в зоне ионизации. Шунтирование обеспечивается посредством создания в защитном устройстве высокой проводимости тем же потоком излучения. Рассмотрена возможность разработки защитных устройств на основе полупроводниковых камер со стенками с высокой тормозной способностью. Излучение формирует в стенке камеры высокий уровень потока вторичных электронов, которые пронизывают пластину из полупроводника с высокой подвижностью электронов проводимости. Электроны проводимости образуются в полупроводнике на последних стадиях электронных лавин, вызванных высокоэнергетичными вторичными электронами. Такая возможность подтверждена расчетами защитных свойств конкретной камеры со стенкой из свинца, в которую помещена пластина из арсенида галлия (толщина стенки равна средней длине свободного пробега фотоэлектрона). В этом случае соблюдается условие электронного равновесия, т. е. число вторичных электронов, рожденных в стенке вследствие внутреннего фотоэффекта, будет равно числу электронов, поглощенных стенкой, но при этом поток рентгеновских фотонов заметно не меняется. Выполнение этого условия дает наибольший шунтирующий эффект.

**Ключевые слова:** электронное оборудование, защита, шунтирование, импульсное рентгеновское излучение.

### Введение

В настоящее время радиационные технологии получили широкое распространение; они применяются в ходе радиационных испытаний, при проведении исследований в области физической химии, медицины и т. д. Для контроля процессов, протекающих в зоне ионизации, необходимо иметь измерительные системы, способные регистрировать эффект сразу после действия импульса излучения [1]. Определение параметров этих процессов сопряжено с рядом трудностей, связанных с наведенной проводимостью в полупроводниковых приборах регистрирующей аппаратуры. Особенно подвержены данному воздействию полупроводниковые датчики и входные каскады измерительных систем. Внутренний фотоэффект приводит к наведенной излучением проводимости в полупроводниковых приборах, что при наличии напряжений питания создает в них значительные токи, и выделению высоких плотностей энергии, способствующих выходу из строя электронных систем.

### Материалы и методы

#### *Теоретические основы метода*

Отключение питания первичных преобразователей в реальном масштабе времени посредством шунтирования цепи питания – один из возможных способов защиты электронных систем, находящихся в зоне ионизации мощных импульсных рентгеновских установок. Для данной цели применяются устройства, в которых наводится значительная проводимость этим же излучением, что позволяет по меньшей мере на 2–3 порядка уменьшать напряжения, подаваемые на первичные преобразователи, тем самым сохраняя их работоспособность для регистрации процессов, протекающих сразу после прохождения мощного импульса излучения. В качестве шунтирующего элемента целесообразно выбирать полупроводник с высокой подвижностью основных носителей заряда, малым временем жизни носителей и относительно широкой запрещенной зоной. Указанным условиям наиболее всего отвечает арсенид галлия [2, с. 14].

В полупроводнике под действием рентгеновского излучения в результате внутреннего фотоэффекта возникают лавины вторичных электронов. Электроны, рожденные на последних стадиях лавин, определяют наведенную проводимость

$$\sigma = en\mu, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $\mu$  – подвижность электронов в полупроводнике;  $n$  – концентрация электронов проводимости.

В формуле (1) предполагается, что вклад положительной компоненты незначителен, поскольку вакансии существенно менее подвижны, чем электроны в твердом теле.

В полупроводниках за убыль электронов отвечает процесс рекомбинации электронов и вакансий, поэтому концентрацию электронов можно оценить, рассмотрев уравнение баланса:

$$dn/dt = q - \alpha n^2, \quad (2)$$

где  $q$  – скорость ионообразования в единице объема шунтирующей среды;  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации.

Положив  $n = 0$  при  $t = 0$  и проинтегрировав уравнение (2), получим

$$n = \left(\frac{q}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{e^{\sqrt{\alpha q} t} - 1}{e^{\sqrt{\alpha q} t} + 1}. \quad (3)$$

При больших интенсивностях излучения концентрация быстро достигает равновесных значений, и соотношение (3) будет иметь вид

$$n = \left(\frac{q}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Если полупроводниковую пластинку поместить в камеру со стенкой, обладающей высокой тормозной способностью к излучению, то максимальный шунтирующий эффект будет обеспечен при соблюдении условия электронного равновесия в стенке камеры [3]. Электронное равновесие достигается, когда количество вторичных электронов, порожденных рентгеновским излучением в стенке, и количество их, поглощенных стенкой, будут равны, но при этом интенсивность рентгеновского излучения существенно не меняется. В этом случае толщина стенки должна быть равна или немного больше максимальной длины свободного пробега вторичных электронов [4, с. 103].

Если при вышеизложенных условиях можно пренебречь потерями вторичных электронов в полупроводниковой пластинке, т. е. толщина пластинки много меньше максимального пробега электрона в ней, то число электрон-дырочных пар, образованных в единице массы полупроводника, определяется формулой Брега – Грея [3, с. 104]:

$$N = \frac{\Delta E \beta_c S_n}{\varepsilon \beta_n S_c}, \quad (5)$$

где  $\Delta E$  – энергия, затраченная на генерацию электронов проводимости в единице массы полупроводника;  $\varepsilon$  – энергия образования одной электрон-дырочной пары в полупроводнике, которая обычно составляет 3–4 эВ [4, с. 155];  $\beta_c$  и  $\beta_n$  – коэффициенты передачи энергии рентгеновским излучением вторичным электронам в стенке и в полупроводнике соответственно;  $S_c$  и  $S_n$  – тормозные способности стенки и полупроводника для вторичных электронов.

Тормозные способности обратны среднему пробегу электронов  $R$ , поэтому выражение (5) можно переписать в виде

$$N = \frac{\Delta E \beta_c R_c}{\varepsilon \beta_n R_n}. \quad (6)$$

Если поглощение фотонов происходит в области энергий менее 200 кэВ, то преобладать будет фотоэффект и отношение коэффициентов передачи будет определяться фотопоглощением, которое пропорционально кубу атомного номера  $Z$  вещества поглотителя и его плотности  $\rho$ , поэтому выражение (6) запишем следующим образом:

$$N = \frac{\Delta E}{\varepsilon} \left(\frac{Z_c}{Z_n}\right)^3 \frac{\rho_c R_c}{\rho_n R_n},$$

но  $\frac{R_c}{R_n} = \frac{\rho_n Z_n/A_n}{\rho_c Z_c/A_c}$ .

Так как отношение атомного номера  $Z$  к атомной массе  $A$  – величина практически постоянная для большинства элементов, то формулу (6) можно представить в виде

$$N = \frac{\Delta E}{\varepsilon} \left(\frac{Z_c}{Z_n}\right)^3.$$

Но если положить, что основная часть энергии, которая рассеивается вторичными электронами в полупроводнике, идет на образование электрон-дырочных пар, то  $\Delta E$  – это поглощенная доза в полупроводнике.

Если в качестве материала стенки камеры использовать свинец, а в качестве шунтирующего элемента взять пластинку полупроводника, например, из арсенида галлия площадью  $1 \text{ см}^2$  и толщиной  $0,1 \text{ мм}$ , то при поглощенной дозе в полупроводнике за импульс  $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг}$  получим число электрон-дырочных пар, индуцированных в  $1 \text{ кг}$  полупроводника, равное  $3,4 \cdot 10^{17}$  пар. Это соответствует концентрации электронов в полупроводнике  $3,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . В соответствии с соотношением (1), приняв подвижность электронов в арсениде галлия равной  $0,85 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  [1, с. 14], получим проводимость, равную  $46 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$ , что при выбранной геометрии полупроводниковой пластинки дает сопротивление в момент окончания действия импульса излучения, равное  $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$ , что обеспечивает высокую степень шунтирования цепей питания входных каскадов, которые обычно составляют величину не ниже  $10^2 \text{ Ом}$ . Схема включения шунтирующего устройства показана на рисунке.

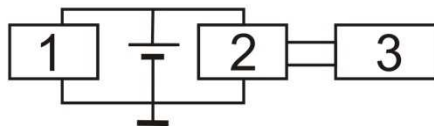


Рис. Схема защиты входного каскада: 1 – шунтирующее устройство;  
2 – выходной каскад информационно-измерительной (или управляющей) системы;  
3 – информационно-измерительная (или управляющая) система  
Fig. The security circuit of the input cascade: 1 – the shunting device;  
2 – the output stage of the information-measuring (or control) system;  
3 – the information-measuring (or control) system

Уровень поля рентгеновских установок чаще характеризуется экспозиционной дозой. Экспозиционная доза за импульс, равная  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$  ( $1,6 \cdot 10^{15}$  пар ионов на  $1 \text{ кг}$  воздуха), будет соответствовать  $1,5 \cdot 10^{18}$  электрон-дырочных пар на  $1 \text{ кг}$  в GaAs, что соответствует наведенной проводимости порядка нескольких сотен  $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$ . В этом случае необходимо учитывать соотношение атомных номеров Ga, As и воздуха, которое принималось равным  $(32/7)^3 = 95,5$ , и соотношение между средней энергией ионообразования в воздухе ( $33 \text{ эВ}$ ) и энергией образования электрон-дырочной пары в полупроводнике ( $3 \text{ эВ}$ ) [5, с. 155].

### Заключение

Шунтирующее устройство на основе тонких полупроводниковых пластин, помещенных в оболочку из материала с высокой тормозной способностью для рентгеновского излучения, может найти широкое применение в ряде технологических процессов, где для придания материалам новых свойств используется облучение их интенсивными потоками фотонного и корпускулярного излучений, а параметры этих материалов и динамика изменения их свойств исследуется в реальном времени с помощью информационно-измерительных систем. Подобные устройства могут использоваться в современной медицине и системах антисептической обработки продукции рентгеновскими и электронными пучками высокой интенсивности, а также для защиты космических аппаратов от воздействия проникающей радиации.

### Библиографический список

1. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Атомиздат, 1978. 392 с.
2. Гурнов В. А., Ивашенков О. Н. Сборник задач по микрооптоэлектронике. Петрозаводск : ПГУ, 2005. 36 с.
3. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. М. : Атомиздат, 1971. 400 с.
4. Морозов Н. Н., Гнатюк В. С. Защита электронного оборудования от импульсного излучения // Наука Юга России. 2016. Т. 12, № 3. С. 17–20.
5. Толбанов О. П. Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия // Вестник Томского государственного университета. 2005. № 285. С. 155–163.

### References

1. Golubev B. P. Dozimetriya i zaschita ot ioniziruyuschih izlucheniy [Dosimetry and protection from ionizing radiation]. 3-e izd., pererab. i dop. M. : Atomizdat, 1978. 392 p.
2. Gurnov V. A., Ivashenkov O. N. Sbornik zadach po mikrooptoelektronike [The collection of problems on micro-optoelectronics]. Petrozavodsk : PGU, 2005. 36 p.

3. Golubev B. P. Dozimetriya i zaschita ot ioniziruyuschih izlucheniya [Dosimetry and protection from ionizing radiation]. M. : Atomizdat, 1971. 400 p.
4. Morozov N. N., Gnatyuk V. S. Zashchita elektronnoy oborudovaniya ot impulsnogo izlucheniya [Protection of electronic equipment from pulse radiation] // Nauka Yuga Rossii. 2016. V. 12, N 3. P. 17–20.
5. Tolbanov O. P. Detektory ioniziruyuschih izlucheniya na osnove kompensirovannogo arsenida galliya [Detectors of ionizing radiation based on compensated gallium arsenide] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2005. N 285. P. 155–163.

#### Сведения об авторах

**Гнатюк Виктор Степанович** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, д-р филос. наук, доцент, профессор;  
e-mail: polfiz@mstu.edu.ru; viktognatyuk@yandex.ru

**Gnatyuk V. S.** – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Dr of Philos. Sci., Associate Professor, Professor; e-mail: polfiz@mstu.edu.ru; viktognatyuk@yandex.ru

**Морозов Николай Николаевич** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, д-р техн. наук, профессор;  
e-mail: polfiz@mstu.edu.ru; morozov-2006@yandex.ru

**Morozov N. N.** – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Dr of Tech. Sci., Professor; e-mail: polfiz@mstu.edu.ru; morozov-2006@yandex.ru

N. N. Morozov, V. S. Gnatyuk

## **Method of protection of the electronic equipment from pulse X-ray radiation**

X-ray units with high instantaneous intensity are used in the course of nondestructive testing of massive articles, in radiation tests, and also to impart new properties to various polymer materials. Under these conditions, the input cascades of measuring systems designed to monitor the parameters of processes are subject to a powerful X-ray flux. The flux generates avalanche of secondary electrons in the sensitive part of the primary measuring transducers, which leads to their failure or temporary inoperability due to the thyatron effect in *p-n* transitions of semiconductor electronic devices. The work has shown the possibility of protecting the input cascades of electronic devices in the ionization zone by shunting the power circuits in real time. Shunting is ensured by the creation in the protective device of high conductivity by the same radiation flux. The possibility of creating protective devices based on semiconductor chambers with walls with high braking power has been considered. The radiation forms in the wall of the chamber a high level of secondary electrons flowing through the plate from a semiconductor with high mobility of conduction electrons. Conduction electrons are formed in a semiconductor in the last stages of electron avalanches caused by high-energy secondary electrons. Such opportunity has been confirmed with calculations for the specific camera with a wall from lead in which the plate from gallium arsenide is placed. The calculations have been carried out for a wall by thickness equal to average length of the free run of a photoelectron. In this case, the electron equilibrium condition is present, that is, the number of secondary electrons produced in the wall as a consequence of the internal photoelectric effect will be equal to the number of electrons absorbed by the wall, but the flux of X-ray photons does not change appreciably. Compliance with this condition gives the greatest shunting effect.

**Key words:** electronic equipment, protection, shunting, pulse X-ray radiation.