

УДК 539.1.07:621.382.2/3

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОТ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2016 г. Н.Н. Морозов¹, В.С. Гнатюк¹

Аннотация. Широкое использование рентгеновских установок с высокой мгновенной интенсивностью приводит к необходимости создавать системы и методы защиты управляющей и информационно-измерительной аппаратуры от интенсивных вспышек рентгеновского излучения. Рассмотрена возможность защиты входных цепей электронных устройств, находящихся в зоне ионизации импульсных рентгеновских установок, методом шунтирования источников питания на время действия импульса излучения. В качестве шунтирующего элемента предлагается использовать полость, заполненную инертным газом. Показано, что максимальный шунтирующий эффект будет обеспечен при соблюдении условия электронного равновесия в стенке камеры, где расположена газовая полость, то есть 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. Это достигается, когда толщина стенки равна или несколько больше максимальной длины свободного пробега вторичных электронов. Сделаны оценки наведенной проводимости газового промежутка в момент действия излучения. Показано, что наведенная проводимость вполне обеспечивает необходимый уровень защиты.

Сделан вывод о том, что шунтирующие устройства на основе газонаполненной полости со стенкой из материала с высокой тормозной способностью могут найти широкое применение в ряде технологических процессов, где для придания материалам новых свойств используется их облучение интенсивными потоками фотонного и корпускулярного излучений, а параметры этих материалов и динамика изменения их свойств исследуются в реальном времени с помощью информационно-измерительных систем. Подобные устройства могут найти применение в современной медицине и системах антисептической обработки продукции рентгеновскими и электронными пучками высокой интенсивности, а также для защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов.

Ключевые слова: электронное оборудование, защита, импульсное излучение.

PROTECTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT AGAINST PULSE RADIATION

N.N. Morozov¹, V.S. Gnatyuk¹

Abstract. The widespread use of X-ray units with high instantaneous intensity leads to the need to develop systems and methods of protection and management of information and measuring equipment from the intense X-ray flashes. The paper considers the possibility of protection of input circuits of electronic devices, located in the zone of the ionization pulse X-ray machines, by shunting power supplies for the duration of the radiation pulse. As the shunt element, a cavity filled with an inert gas is proposed to be used. It is shown that the maximum shunting effect will be provided in compliance with electron equilibrium conditions in the chamber wall, where the gas chamber is, i.e. when the number of secondary electrons generated by X-rays in the wall, and the number of them absorbed by the wall, will be equal, but the X-ray intensity would not change significantly. This is achieved when the wall thickness is equal to or slightly

¹ Мурманский государственный технический университет (Murmansk State Technical University, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13, e-mail: viktognatyuk@yandex.ru

greater than the maximum mean free path of secondary electrons. Estimations of induced conductivity of the gas gap at the time of emissions are made. It is shown that the induced conductivity is quite capable to provide the necessary level of protection.

A conclusion is made that the bypass devices based on gas-filled cavity with a wall made of a material with a high stopping power can be widely used in a number of technological processes, when giving materials new properties requires the use of their irradiation by intensive flows of the photon and corpuscular radiation, and the parameters of these materials and dynamics of change in their properties are studied in real time using information-measuring systems. Such devices can be used in modern medicine and systems of antiseptic treatment of products with X-ray and electron beams of high intensity, as well as to protect the spacecraft on-board equipment.

Keywords: electronic equipment, protection, pulse radiation.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование импульсных рентгеновских установок в современной медицине и технике, в том числе с высокой мгновенной интенсивностью, приводит к необходимости создавать системы и методы защиты управляющей и информационно-измерительной аппаратуры от интенсивных вспышек рентгеновского излучения. Например, широко распространенные в настоящее время пленочные технологии [1; 2] используют ионизирующее излучение для придания пленкам определенных свойств.

Особенно подвержены воздействию полупроводниковые первичные преобразователи и входные каскады упомянутых систем, находящиеся в зоне ионизации. Внутренний фотоэффект приводит к высокой проводимости *p-n*-переходов и возникновению значительных токов, т.е. выделению в них высоких уровней энергии, что выводит эти устройства из строя.

К сбою в работе информационно-измерительных систем приводит и тиратронный эффект, когда по окончании действия импульса излучения аппаратура не может прийти в исходное состояние.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ШУНТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

В работе рассматривается возможность защиты электроники, находящейся в зоне облучения, методом шунтирования цепи питания газовым промежутком, заполненным инертным газом, подверженным тому же излучению, что и электронные устройства.

В газовом промежутке под действием рентгеновского излучения в результате фотоэффекта и комптон-эффекта возникают лавины вторичных электронов. Электроны, рожденные в газе на последних стадиях лавин, определяют проводимость газа [3]. Облучение инертных газов не приводит к плазмохимическим изменениям состава, что делает их весьма радиационно-стойкими.

Проводимость газа σ определяется как концентрацией свободных носителей заряда n_e и n_i , где n_e – концентрация электронов проводимости, n_i – концентрация ионов, так и их подвижностью μ_e и μ_i :

$$\sigma = e(\mu_e n_e + \mu_i n_i). \quad (1)$$

Подвижность ионов значительно (на несколько порядков) меньше подвижности электронов, поэтому при оценке проводимости ионной компонентой можно пренебречь.

Концентрацию электронов можно оценить при рассмотрении уравнения баланса:

$$\frac{dn_e}{dt} = q - \alpha n_e n_i, \quad (2)$$

где q – скорость ионообразования в единице объема, α – коэффициент электронно-ионной рекомбинации.

В чистых инертных газах число ионов и электронов равно, и уравнение баланса будет иметь вид

$$\frac{dn_e}{dt} = q - \alpha n_e^2. \quad (3)$$

Положив теперь $n = 0$ при $t = 0$ и проинтегрировав (3), получим:

$$n_e = \left(\frac{q}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{e^2 \sqrt{\alpha g t} - 1}{e^2 \sqrt{\alpha g t} + 1}. \quad (4)$$

Значения коэффициентов рекомбинации детально представлены в классической литературе [4] и приведены для всех инертных газов.

При высоких значениях скорости ионообразования, то есть при высоких интенсивностях излучения и больших давлениях ($P \geq P_0$, где P_0 – атмосферное давление), быстро достигаются равновесные значения концентрации электронов:

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

Максимальный шунтирующий эффект будет обеспечен при соблюдении условия электронного равновесия в стенке камеры, где расположена газовая полость, то есть 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. Это достигается, когда толщина стенки равна или несколько больше максимальной длины свободного пробега вторичных электронов [5].

Если при обозначенных выше условиях можно пренебречь потерями вторичных электронов в газовой полости, то есть размер газовой полости много меньше максимального пробега электрона в газе, то число N_2 пар ионов, образованных в единице массы газа, дается формулой Брегга – Грея [5]:

$$N_2 = \frac{\Delta E_2}{\varepsilon} \frac{\gamma_c}{\gamma_2} \frac{S_2}{S_c}, \quad (5)$$

где ΔE – энергия ионообразования в единице массы газа; ε – энергия, затраченная на образование одной пары ионов в газе; γ_c и γ_2 – коэффициенты передачи энергии рентгеновским излучением вторичным электронам в стенке и в газе соответственно; S_2 и S_c – тормозные способности газа и стенки для вторичных электронов.

Тормозные способности обратны среднему пробегу электронов, поэтому (5) можно переписать:

$$N_2 = \frac{\Delta E_2}{\varepsilon} \frac{\gamma_c}{\gamma_2} \frac{R_c}{R_2}. \quad (6)$$

Если поглощение фотонов происходит в области энергий менее $8 \cdot 10^{-14}$ Дж (500 кэВ), то преобладать будет фотоэффект и отношение коэффициентов передачи будет определяться фотопоглощением, которое пропорционально кубу атомного номера Z вещества-поглотителя и его плотности ρ , поэтому (6) запишем в виде

$$N_2 = \frac{\Delta E_2}{\varepsilon} \left(\frac{Z_c}{Z_2} \right)^3 \frac{R_c}{R_2} \frac{\rho_c}{\rho_2}, \quad (7)$$

но $\frac{R_c}{R_2} \approx \frac{\rho_2}{\rho_c} \frac{Z_2/A_2}{Z_c/A_c}$, так как отношение атомного номера к атомной массе – величина практически постоянная для большинства элементов, то (7) можно представить в виде

$$N_2 \approx \frac{\Delta E_2}{\varepsilon} \left(\frac{Z_c}{Z_2} \right)^3,$$

где ΔE – это поглощенная мощность дозы в газе, то есть энергия, поглощенная в единице массы газа.

Использование в качестве материала стенки свинца, а в качестве рабочего газа гелия при нормальном давлении приводит к тому, что при мощности дозы в $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл·кг⁻¹·с⁻¹ (1 Р·с⁻¹) имеем значение скорости ионообразования в полости

$$q = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Увеличение давления нецелесообразно, поскольку приводит к пропорциональному увеличению скорости ионообразования, но одновременно к уменьшению подвижности электронов проводимости.

Принимая во внимание, что при высоких давлениях в чистых инертных газах преобладает диссоциативная рекомбинация [4], для гелия коэффициент рекомбинации α можно принять равным $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Для рентгеновских импульсов длительностью 10^{-5} с при мощности дозы более $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл·кг⁻¹·с⁻¹ (1 Р·с⁻¹) формула (3) приводит к равновесным значениям концентрации $n_e \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$. При мощности дозы $258 \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ($10^6 \text{ Р} \cdot \text{с}^{-1}$) (типичная максимальная доза мощных рентгеновских установок микросекундной длительности) $n_e \approx 2,2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

Подвижность электронов в гелии можно получить по данным о скорости дрейфа электронов в электрических полях, широко представленных в экспериментальных работах первой половины XX в. [4]. Примем скорость дрейфа равной $2 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при отношении напряженности поля к давлению гелия $133,3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$ ($0,1 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{торр}^{-1}$). Тогда получим подвижность электронов

$$\mu_e = \frac{v_{др.}}{E} = 0,2 \text{ В} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Подставляя полученные значения в (1), имеем для мощности дозы $258 \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ($10^6 \text{ Р} \cdot \text{с}^{-1}$) проводимость, индуцированную в газе,

$$\sigma = 0,7 \cdot 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}.$$

При высоте зазора газовой полости 10^{-3} м и площади 10^{-2} м^2 получим сопротивление газового промежутка, облучаемого рентгеновским излучением, такой интенсивности (порядка 10^{-3} Ом), что решает задачу снятия напряжения питания на время действия импульса излучения, тем самым снижает опасность вывода из строя входных каскадов измерительных устройств, находящихся в зоне ионизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Шунтирующие устройства на основе газонаполненной полости со стенкой из материала с высокой тормозной способностью могут найти широкое применение в ряде технологических

процессов, где для придания материалам новых свойств используется их облучение интенсивными потоками фотонного и корпускулярного излучений, а параметры этих материалов и динамика изменения их свойств исследуются в реальном времени с помощью информационно-измеритель-

ных систем. Подобные устройства могут найти применение в современной медицине и системах антисептической обработки продукции рентгеновскими и электронными пучками высокой интенсивности, а также для защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономаренко В.О., Ковтун А.П. 2011. Модификация поверхностного слоя подложек на начальном этапе газоразрядного напыления пленок. *Вестник Южного научного центра*. 7(3): 18–22.
2. Чеботарев С.Н., Пашченко А.С., Лунина М.Л. 2011. Моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов, полученных методом ионно-лучевого осаждения, от толщины и уровня легирования фронтального слоя. *Вестник Южного научного центра*. 7(4): 25–30.
3. Гнатюк В.С., Морозов Н.Н. 2016. Физические основы электропроводности сильно ионизированного воздуха. *Вестник МГТУ (Труды Мурманского государственного технического университета)*. 19(1/2): 227–231.
4. Мак-Даниель И. 1967. *Процессы столкновений в ионизированных газах*. М., Мир: 832 с.
5. Голубев Б.П. 1978. *Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений*. М., Атомиздат: 392 с.

REFERENCES

1. Ponomarenko V.O., Kovtun A.P. 2011. [Substrate surface modification at initial stage of gas-discharge high-frequency sputtering films]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 7(3): 18–22. (In Russian).
2. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunina M.L. 2011. [Simulation of dependencies of functional characteristics of si-solar cells grown by ion-beam deposition on thickness and doping frontal layer]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 7(4): 25–30. (In Russian).
3. Gnatyuk V.S., Morozov N.N. 2016. [Physical bases of conductivity of strongly ionized air]. *Vestnik of MSTU (Transactions of Murmansk State Technical University)*. 19(1/2): 227–231. (In Russian).
4. Mac-Daniel I. 1967. *Protsessy stolknoveniy v ionizirovannykh gazakh*. [Processes of clashes in ionized gases]. Moscow, Mir Publishers: 832 p. (In Russian).
5. Golubev B.P. 1978. *Dozimetriya i zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniya*. [Dosimetry and protection from ionizing radiation]. Moscow, Atomizdat Publishers: 392 p. (In Russian).

Поступила 31.05.2016