

try. Cubic boron nitride is a heteroatomic analogue of diamond and has a number of similar properties: hardness (the second hardest material after diamond), wear resistance. It surpasses diamond in a number of properties: heat resistance is twice as high, higher chemical inertness. In addition, BNk belongs to the class of wide-bandgap semiconductors of the AIII BV type and therefore, having high thermal conductivity, radiation resistance and chemical inertness, can be used in microelectronics. An additional incentive for its use in this area of industry is the possibility of obtaining BNk with different types of conductivity: both hole and electron, depending on the type and level of alloying additives used.

Key words: cubic boron nitride; phase transformations; high pressures and temperatures.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Ю. В. Богатырев, Д. А. Огородников, Е. Д. Бурый

*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19,
220072 Минск, Беларусь, e-mail: bogat@physics.by*

Представлен аналитический обзор по проблеме воздействия импульсного ионизирующего излучения (ИИ) на электронные компоненты: полупроводниковые приборы (ПП) и интегральные схемы (ИС). Рассмотрены основные источники импульсного ИИ, радиационные эффекты в ПП и ИС при воздействии импульсных ИИ, методы моделирования и прогнозирования радиационной стойкости электронных компонентов при импульсном облучении.

Ключевые слова: импульсное ионизирующее излучение; гамма-излучение; электронные компоненты; полупроводниковые приборы; интегральные схемы.

EFFECTS OF PULSED IONIZING RADIATION ON ELECTRONIC COMPONENTS

Yu. V. Bogatyrev, D. A. Aharodnikau, E. D. Buri

*Scientific-practical center NAS of Belarus on materials technology, P. Brovki str., 220072 Minsk, Belarus
Corresponding author: Yu.V. Bogatyrev (bogat@physics.by)*

An analytical review is presented on the problem of the impact of pulsed ionizing radiation (IR) on electronic components: semiconductor devices (SD) and integrated circuits (IC). The main sources of pulsed radiation sources, radiation effects in SDs and ICs under the influence of pulsed IRs, methods for modeling and predicting the radiation resistance of electronic components under pulsed irradiation are considered.

Key words: pulsed ionizing radiation; gamma radiation; electronic components; semiconductor devices; integrated circuits.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросы обеспечения работоспособности радиоэлектронной аппаратуры в условиях воздействия различных специальных внешних факторов яв-

ляются актуальными. При этом необходимо досконально изучить проблему воздействия импульсного ИИ на электронные компоненты, рассмотреть основные источники импульсного облучения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАССМОТРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Ядерный взрыв (ЯВ) является источником ИИ [1, 2] в основном в виде мощного импульса гамма-излучения длительностью в единицы и десятки наносекунд, а также запаздывающего относительно гамма-квантов импульса быстрых нейтронов длительностью в сотни и тысячи микросекунд. ЯВ происходит в результате быстрого выделения энергии в ограниченном пространстве из-за протекания ядерной реакции деления или синтеза [3].

В ядерных энергетических установках (импульсных ядерных реакторах) процесс деления ядер сопровождается испусканием гамма-нейтронного излучения [4]. С целью проведения исследовательских работ широкое применение имеют моделирующие установки: ядерные реакторы импульсного действия, импульсные рентгеновские и гамма-установки, импульсные ускорители электронов и протонов [1, 2, 5].

В таблице приведена краткая характеристика основных видов излучений, образующихся при ЯВ, и вызываемых ими эффектов [6]. Рентгеновские кванты, возникающие при ЯВ, имеют энергию от единиц кэВ до примерно 4 МэВ, гамма-кванты – от 1 до 25 МэВ, нейтроны – от долей эВ до десятка МэВ [5].

Характеристики основных видов излучений ЯВ [6]

Виды излучений	Источник	Средняя энергия, кэВ	Доля энергии ЯВ, %
Нейтроны	Реакция деления	$1,3 \cdot 10^3$	1,0
Гамма-кванты	Реакция деления, реакция синтеза, захват нейтронов, неупругое рассеяние, радиоактивный распад	$1,1 \cdot 10^3$	2,6
Рентгеновские кванты	Излучение «черного тела»	–	68,9
Альфа-частицы	Реакция синтеза, радиоактивный распад	–	0,1
Бета-частицы	Радиоактивный распад	$1,1 \cdot 10^3$	2,5
Осколки заряда	Вещество заряда и корпуса	50	25
Видимый свет	Огненный шар	–	–

На рис. 1 в качестве примера показана радиационная обстановка, вызванная детонацией высотного ЯВ [7].

Объемные ионизационные эффекты в ПП и ИС проявляются в форме ионизационной реакции, которая определяется первичными и вторичными эффектами, возникающими при воздействии на них импульсных ИИ [8]. К основным первичным ионизационным эффектам относятся: временное увеличение тока потребления ИС во

время и после воздействия импульса ИИ; временное нарушение работоспособности в связи с выходом параметров изделия за нормы технических условий (ТУ); изменение состояния внутренних ячеек памяти запоминающих устройств (ЗУ); нарушение алгоритма функционирования программируемых ИС. К основным вторичным ионизационным эффектам относятся: тиристорный эффект (срабатывание паразитных 4-слойных структур); перегорание металлизации вследствие протекания больших ионизационных токов; радиационно-индуцированный разогрев прибора; радиационно-индуцированный вторичный пробой.

Основной причиной возникновения ионизационных эффектов являются ионизационные токи в изолирующих и коллекторных переходах интегральных транзисторов, изменения сопротивлений диффузионных резисторов в составе биполярных ИС [9]. Ионизационные токи линейно зависят от скорости генерации носителей заряда, определяемой спектрально-энергетическими характеристиками и плотностями потока воздействующих ИИ. Наиболее высокие значения плотности потока характерны для импульсных ИИ ЯВ.

Кратковременное увеличение тока потребления КМОП ИС связано с протеканием ионизационного тока через обратно-смещенные p - n -переходы карман-подложка комплементарных транзисторов со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП) [10]. Полный фототок через обратосмещенный переход «карман-подложка» каждой комплементарной пары МОП-транзисторов для импульсного гамма-излучения рассчитывается по формуле:

$$I_{p-n}(t) = I_{pp}(t) + I_{sp}(t), \quad (1)$$

где $I_{pp}(t), I_{sp}(t)$ – текущие значения мгновенной и запаздывающей составляющих фототока одной пары комплементарных транзисторов, мА.

Величина импульса фототока в цепи питания КМОП ИС определяется мощностью дозы гамма-излучения ($P_{\max}$), коэффициентом пропорциональности K_{cc} , сохраняющим свое значение независимо от формы импульса излучения, и функцией $f_{эфф}(t, \tau)$, значение которой зависит от формы импульса излучения и эффективного значения времени жизни неосновных носителей τ :

$$I_{cc}(t) = P_{\max} f_{эфф}(t, \tau) K_{cc}. \quad (2)$$

В работе [11] предлагаются уточненные SPICE модели импульсных фототоков для диодов и биполярных транзисторов. Модели имеют единую структуру, учитывают электрическое смещение на p - n -переходе, особенности формы отклика конкретного полупроводникового прибора. Параметры моделей определяются из результатов испытаний на моделирующих установках. Модель диода оформлена в виде макромоделей и приведена на рис. 2.

В работе [12] предложены математические модели переходных радиационных процессов в типовых элементах микросхем при воздействии импульсного ИИ. Рассчитывается мощность дозы ИИ, которая, в общем случае, может быть определена по формуле:

$$\begin{aligned} & \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \mu_{km}(E) \cdot E \cdot n(E) \cdot e^{-\mu(E)h} dE}{t_{имп}} \cdot f_h \cdot dt + \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} P_{\max \gamma} \cdot f(t) dt + \\ & + \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} 1,13 \cdot \int_{E_{нижн}}^{E_{верх}} W_E(E) \cdot f_{np}(E, t) \cdot f_n(E) dE dt. \end{aligned} \quad (3)$$

В данном выражении времена $t_{\min}$ и $t_{\max}$ относятся к рентгеновскому, гамма- и нейтронному излучению. Так, $t_{\min} h$ – время, когда начинается действие рентгеновского излучения, $t_{\max} h$ – время окончания действия рентгеновского излучения; $t_{\min} \gamma$ – время, когда начинается действие гамма-излучения, $t_{\max} \gamma$ – время окончания действия гамма-излучения; $t_{\min} n$ – время, когда начинается действие нейтронного излучения, $t_{\max} n$ – время окончания действия нейтронного излучения.

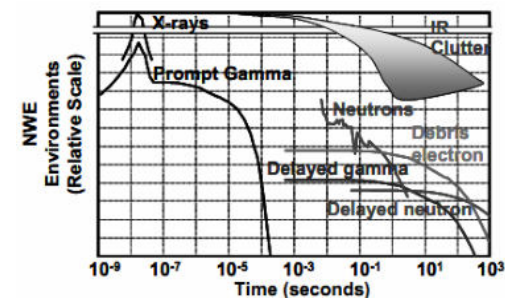


Рис. 1. Радиационная обстановка при высотном ЯВ в зависимости от времени

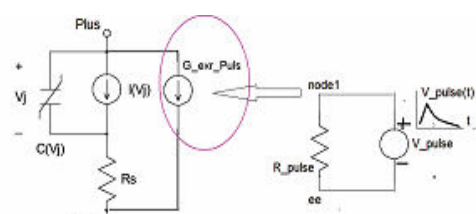


Рис. 2. Модель диода, учитывающая влияние импульсного ИИ

В работе [13] представлен способ учета влияния нейтронного облучения на электронные компоненты путем изменения параметров их моделей. С помощью приведенных формул параметры SPICE-моделей биполярного транзистора и полупроводникового диода пересчитываются в зависимости от флюенса нейтронов. Для учета ионизации в электрические схемы предлагается вводить генераторы электрического тока. Приведены результаты моделирования участков схем. Показанные в статье схемотехнические решения позволяют рассчитывать реакцию схемы при воздействии импульса гамма-излучения. Комбинирование данных подходов дает возможность моделировать эффекты совместного гамма-нейтронного облучения (рис. 3).

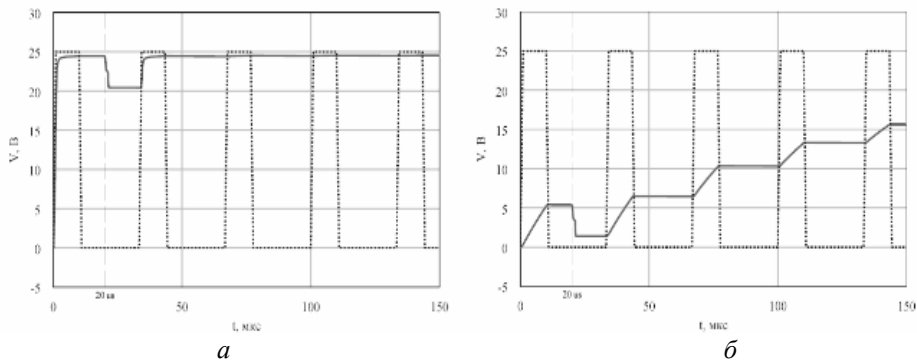


Рис. 3. Работа ИС: а – при воздействии импульса гамма-излучения; б – после нейтронного облучения при воздействии импульса гамма-излучения (пунктирная линия – входной сигнал, сплошная – выходной)

В работе [14] предложен метод параметрического прогнозирования уровня бесбойной работы биполярных ИС в условиях воздействия импульсного гамма-нейтронного излучения с учетом релаксации кратковременных эффектов смещения. В качестве прогнозирующих выбраны параметры, определяющие производственные запасы и радиационную чувствительность параметра U_{OL} – выходное напряжение низкого уровня, деградация которого определяет радиационную стойкость биполярных цифровых ИС в целом.

Представленные в работе [15] результаты обосновывают возможность и эффективность использования ионизирующего лазерного излучения для моделирования воздействия высокоэнергетичных ИИ на ПП и ИС. Получены соотношения для расчета эквивалентной мощности поглощенной дозы в активных областях кремниевых ПП и ИС для двух режимов облучения: «сверху» и «снизу». Результаты получены в рамках линейного приближения и справедливы до интенсивностей лазерных излучений около 10^6 Вт/см², что обеспечивает эквивалентную мощность поглощенной дозы в кремнии до 10^{12} рад(Si)/с.

Моделирование эффектов мощности дозы осуществляется при помощи специализированных лазерных имитаторов [16]. Для исследования кремниевых приборов рекомендуется использовать лазерные источники со следующими параметрами: длина волны излучения 1,06 мкм, энергия в импульсе около 60 мДж, длительность импульса 10 нс, что позволяет получить уровень эквивалентной мощности дозы до 10^{12} рад(Si)/с.

В работе [17] разработан метод локального облучения БИС оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) на основе импульсного расфокусированного лазерного излучения, позволяющий выявлять наиболее радиационно-чувствительные фрагменты и функциональные блоки БИС ОЗУ по эффектам объемной ионизации. На основе предложенного метода разработана и апробирована базовая методика, которая позволяет исключить эффект «просадки» питания и в десятки раз повысить эффективность сканирования кристалла при поиске областей, чувствительных к сбоям.

В работе [18] исследована возможность создания макромоделей аналоговой микроэлектроники и разработки методов прогнозирования функциональной реакции аналоговой микроэлектроники на импульсное радиационное воздействие с использованием автоматизированного макромоделирования. Предложена и обоснована новая методика прогнозирования реакции облучаемых образцов радиоэлектронной аппаратуры на воздействие импульсного ИИ и переходных процессов от импульсного электромагнитного излучения. Методика основана на облучении исследуемых объектов тестовыми лабораторными импульсами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подготовлен аналитический обзор по вопросам воздействия импульсного ИИ на электронные компоненты (ПП и ИС). Рассмотрены основные источники импульсного ИИ, включая ЯВ; радиационные эффекты в ПП и ИС при воздействии импульсных ИИ; методы моделирования и прогнозирования радиационной стойкости электронных компонентов при импульсном облучении; моделирование эффектов мощности дозы при помощи специализированных лазерных имитаторов.

Особое внимание уделяется прогнозированию изменения параметров кремниевых приборных структур при воздействии импульсного ИИ. Установлено, что прогнози-

рование уровня бессбойной работы биполярных цифровых ИС при воздействии импульсного гамма-нейтронного излучения осуществляется с использованием прогнозирующего параметра U_{OL} – выходного напряжения низкого уровня. Показано, что кратковременное увеличение тока потребления КМОП ИС при импульсном облучении связано с протеканием ионизационного тока через обратно-смещенные p - n -переходы карман-подложка комплементарных МОП-транзисторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В.М. Кулаков [и др.]. – М: Сов. радио, 1980. – 224 с.
2. Мырова, Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М: Радио и связь, 1988. – 296 с.
3. Действие ядерного оружия: Пер. с англ. – М: Воениздат, 1965. – 683 с.
4. Кузнецов, В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок / В.А. Кузнецов. М: Атомиздат, 1977. – 240 с.
5. Бать, Г.А. Исследовательские ядерные реакторы / Г.А. Бать, А.С. Коченов, Л.П. Кабанов. – М: Атомиздат, 1972. – 272 с.
6. Rickets, L.W. Fundamentals of nuclear hardening of electronic equipment / L.W. Rickets. - Wiley-Interscience, 1972. – 548 p.
7. Radiation effects on advanced microelectronics from the space and nuclear weapon generated radiation environments and their impact on software defined radio (SDR) design / J.J. Sheehy [et al.] // SDR Forum technical conference 2007. Proceeding of the SDR 07 Technical conference and product exposition.
8. Скоробогатов, П.К. Объемные ионизационные эффекты / П.К. Скоробогатов, А.И. Чумаков // Радиационная стойкость изделий ЭКБ. – М: НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 153–205.
9. Устюжанинов, В.Н. Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах / В.Н. Устюжанинов, А.З. Чепиженко. - М: Радио и связь, 1989. – 144 с.
10. Бутин, В.И. Система радиационных испытаний изделий электронной техники / В.И. Бутин, В.Ф. Зинченко, А.А. Романенко. - Владимир: Владим. гос. ун-т, 2003. – 185 с.
11. Учёт влияния импульсного ионизирующего воздействия в SPICE-моделях биполярных транзисторов и диодов / К.О. Петросянц [и др.] // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы XIV научно-технической конференции. Москва, 7-9 октября 2015 г. М.: ОАО НПП «ПУЛЬСАР», 2015. С. 296–299.
12. Ачкасов, В.Н. Моделирование радиационных эффектов в САПР микроэлектроники / В.Н. Ачкасов // Научный журнал КубГАУ. - 2012, №75(01). - С. 226–236.
13. Хананова, А.В. Моделирование работы электронных схем при радиационном воздействии / А.В. Хананова, А.С. Аверьякин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - 2013, № 2 (1). - С. 52–55.
14. Панюшкин, Н.Н. Метод прогнозирования релаксационных радиационных эффектов в биполярных интегральных схемах / Н.Н. Панюшкин, Н.Н. Матвеев // Изв. РАН, сер. физическая. – 2016. - Т. 80, № 9. - С. 1266–1268.
15. Никифоров, А.Ю., Скоробогатов П.К. Физические основы лазерного имитационного моделирования объемных ионизационных эффектов в полупроводниковых приборах и ИС: нелинейная модель / А.Ю. Никифоров, П.К. Скоробогатов // Микроэлектроника. - 2006. - Т. 35, № 3. – С. 164–177.
16. Система параметрического и функционального контроля показателей радиационной стойкости ИС на этапах их разработки и производства / А.И. Чумаков [и др.]. // Приборы и системы управления. – 1998, № 9. – С. 65–67.
17. Яненко А.В. Методы и средства исследования радиационных эффектов в интегральных оперативных запоминающих устройствах с использованием локального воздействия / Дисс. на соискание ученой степени кандидата технич. наук. - М.: МИФИ, 2009. - 146 с.
18. Лукичев А.Н. Прогнозирование функциональной реакции аналоговой микроэлектроники на радиационное воздействие с использованием автоматизированного макро моделирования / Дисс. на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. - Нижний Новгород: Нижегородский ГУ им. Н.И. Лобачевского, 2012. – 125 с.