

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРАФЕНА НА КВАРЦЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ С ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

Я.Ю. Подрез, В.А. Мечинский, П.П. Кужир
Белорусский государственный университет, Институт ядерных проблем,
ул. Бобруйская 11, 220030 Минск, Беларусь,
yaraslaupadrez@gmail.com, Vitaly.Mechinsky@cern.ch, polina.kuzhir@gmail.com

Графен за счет своих уникальных термоэлектрических и оптических свойств является перспективным материалом для разработки устройств для аэрокосмической промышленности. Воздействие космических лучей на устройства, находящиеся на геостационарной орбите, может приводить к возникновению дефектов как в приповерхностном слое, так и в объеме используемого материала, снижая производительность электронных устройств вплоть до полной деградации. В настоящей работе проведено моделирование взаимодействия ионизирующего излучения, а именно потока протонов, с мишенью – многослойным графеном на кварцевой подложке. В результате определены значения дислокаций атомов углерода в слое графена в зависимости от угла влета протонов, толщины кварцевой подложки, ориентации графена и кварца относительно потока протонов и энергии протонов. Результаты моделирования будут использованы для создания компонентной базы на основе графена для использования в условиях радиационного облучения.

Ключевые слова: графен; ионизирующее излучение; геостационарная орбита; дислокации; AP-8.

INTERACTION OF GRAPHENE ON THE QUARTZ SUBSTRATE WITH IONIZING RADIATION ON A GEOSTATIONARY EARTH ORBIT

Yaraslau Padrez, Vitaly Mechinsky, Polina Kuzhir
Research Institute for Nuclear Problems Belarusian State University,
11 Bobruyskaya Str., 220030 Minsk, Belarus,
yaraslaupadrez@gmail.com, Vitaly.Mechinsky@cern.ch, polina.kuzhir@gmail.com

Graphene, due to its unique thermoelectric and optical properties, is a promising material for the development of devices for the aerospace industry. The influence of cosmic rays on devices in geostationary orbit leads to the appearance of defects in both 2D structures and the substrate, reducing the performance and stability of electronic devices. In this work, we simulated the interaction of ionizing radiation, namely, the proton flux of different energies, with a target — graphene on a quartz substrate. As a result, the values of dislocations of carbon atoms in the graphene layer were determined depending on the values of input parameters (proton entry angle, quartz substrate thickness, graphene and quartz orientation relative to proton flux, proton energy). The simulation results will be used to create radiation devices based on graphene for the aerospace industry.

Keywords: graphen; ionizing radiation; geostationary orbit; dislocations; AP-8.

Введение

Графен представляет собой двумерный слой гексагонального углерода толщиной в один атом, обладает уникальными электронными, механическими, термоэлектрическими и оптическими свойствами [1, 2]. Это обуславливает огромный потенциал графена для разработки широкого спектра новых устройств, таких как транзисторы, солнечные элементы, батареи, биосенсоры, а также датчики ионизирующего излучения для аэрокосмической индустрии [3-10].

Стандартные полупроводниковые материалы, используемые в современной микроэлектронной промышленности, чувствительны к воздействию высокоэнергетического ионизирующего излучения, что отрицательно сказывается на их производительности и надежности работы. Воздействие ионизирующего излучения приводит к возникновению дефектов, влияющих на структуру и электронные характеристики материалов. Микроэлектронные устройства, находящиеся на геостационарной орбите, подвержены воздействию ионизирующего излучения, что может отрицательно сказаться на их функциональных свойствах. Определение влияния дефектов микроструктуры на макроскопические

физические свойства материалов важно для разработки устройств для работы в условиях повышенной радиационной нагрузки.

В свою очередь, интуитивно понятно, что вероятность взаимодействия свободной моноатомной графитовой пленки (т.е. графена) с ионизирующим излучением невысока. Взаимодействие ионов идет, главным образом, с объемной подложкой, поддерживающей графен, создавая в ней различные радиационные дефекты, в том числе вблизи интерфейса с 2D-материалом. Каждый из создаваемых дефектов (вакансии, междоузлия, пары Френкеля и др.) оказывает определенное влияние на производительность устройства.

Эти дефекты происходят из-за ионизации и смещения атомов, возбужденных падающим излучением. Например, ионизированный диоксид кремния может образовывать комплексные дефекты на интерфейсах посредством миграции и накопления вакансий. Одночастичные события могут вызывать постоянные отказы в работе устройств памяти и питания. Они также могут вызвать короткое замыкание в полевых транзисторах [11].

Космическая среда имеет сложную и динамичную структуру. Она включает в себя нейтральные

частицы, заряженные частицы, плазму, электрические и магнитные поля, солнечную и галактическую радиацию, каждый из которых может нанести серьезный ущерб аппаратуре использующийся на орбите [12]. Во время солнечных вспышек поток заряженных частиц (98-99% протонов, 1,5% α -частицы) может достигать $10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ с энергиями частиц в диапазоне 10^5 - 10^{11} эВ. В отсутствие спорадических событий на солнце, радиационное облучение на геостационарной орбите определяется галактическим космическим излучением, представленным приблизительно на 90% ядрами протонов, ~10% ядрами гелия, ~1% более тяжелых ядер, а также электронами, позитронами и антиадронами, доля которых составляет менее 1% от числа ядер [13].

Несмотря на то, что электронные устройства на основе графена обладают значительными преимуществами по сравнению с обычными микроэлектронными устройствами и демонстрируют очень многообещающие рабочие характеристики, число исследований, посвященных оценке работы этих устройств в условиях воздействия высокоэнергетического ионизирующего излучения, ограничено лишь несколькими работами. Так, в работе [14] авторами проведена оценка влияния гамма-излучения на насыщаемые поглотители на основе графена и лазеры с синхронизацией мод на основе данных материалов. В [15] исследовано влияние гамма-излучения на графеновые полевые транзисторы (GFET), показано, что такие устройства обладают минимальным снижением производительности, улучшенной стабильностью и значительно сниженным гистерезисом после длительного воздействия гамма-излучения по сравнению с классическими полупроводниковыми транзисторами.

В данной работе проведено моделирование взаимодействия протонов с различными энергиями с мишенью, представляющей собой структуру, состоящую из многослойного графена толщиной 3.14 нм (приблизительно 10 слоев) и кварцевой подложки переменной толщины, в результате чего определены количества дислокаций атомов углерода в слое графена и установлена их зависимость от входных параметров.

Материалы и методы

Все расчеты проводились для условий геостационарной орбиты, высота апогея и высота перигея составляли 35793.23 км, наклонение орбиты 0.00° . В качестве модели для расчета потока протонов выбрана модель AP-8 [16]. Зависимость потока протонов от энергии представлена на рисунке 1.

Для расчета числа дислокаций в графене, вызванных потоком протонов, использована медленная модель «Поверхностного распыления / Монослойного бомбардирования» в программном обеспечении SRIM (находится в свободном доступе).

В качестве мишени использовали систему графен-кварц со следующими характеристиками: толщина слоя графена 3.14 нм; число протонов 10^5 , толщины кварцевой подложки 10 нм, 100 нм, 10 мкм; углы между направлением потока протонов и исследуемой поверхностью 0° (для всех подложек), 80° (для подложек с толщиной 10 нм) и 45° (для подложек с толщиной 100 нм); энергия протонов составляла 100 кэВ (для подложек 10 нм, 100 нм) и

100кэВ/1МэВ (для подложки с толщиной 10 мкм). Моделирование проводилось для двух случаев, представленных на рисунке 2.

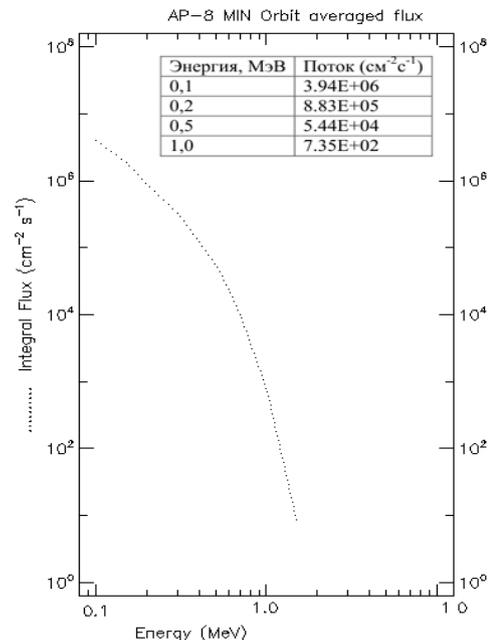


Рис. 1. Зависимость потока протонов от энергии в модели AP-8

Fig. 1. The dependence of the proton flux on energy in the model AP-8

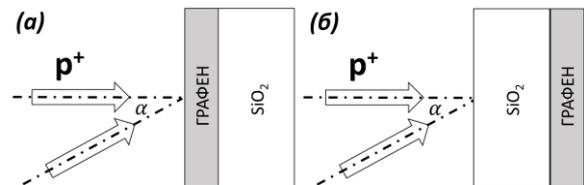


Рис. 2. Конфигурации моделируемой системы

Fig. 2. Configuration of the modelling system

В расчетах использованы следующие характерные значения энергий для графита: энергия замещения 28.0 эВ, энергия связи решетки 3.0 эВ, поверхностная энергия связи 7.41 эВ.

Результаты и их обсуждение

В результате моделирования процесса взаимодействия потока протонов с мишенью графен-кварц рассчитаны ожидаемые числа дислокаций атомов углерода в слое графена. Для конфигурации системы графит-кварц (рис.2 (а)) с толщиной подложки 10 нм, углом влета протонов 0° (вдоль нормали к поверхности), энергии протонов 100 кэВ для области графита получено среднее значение числа смещений $\sim 1.5 \times 10^{-4}/\text{А}$ в расчете на один первичный протон. Тогда для слоя графена (толщина графита 3,14 нм) число дислокаций на первичный протон на толщину слоя графена составляет 4.71×10^{-3} . Из данных, представленных на рис.1, следует, что для протонов с энергией 100 кэВ величина потока равна $3.94 \times 10^6 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Таким образом, для указанной конфигурации мишени ожидаемое число дислокаций составляет $18557/\text{см}^2\text{с}^{-1}$.

Результаты расчетов представлены на рис. 3.

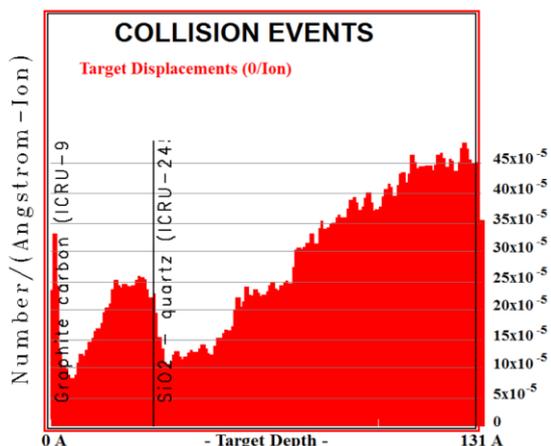


Рис. 3. Зависимость энергии смещения на один первичный протон от глубины проникновения излучения.

Fig. 3. The dependence energy loss to displacements production on one primary proton collisions by target atoms on the depth of radiation penetration

Для разных конфигураций мишени (см. рис. 2, (а) и (б)) и входных параметров (угол влета протонов, толщина SiO₂, энергия протонов) получены следующие значения чисел дислокации (таблицы 1, 2 и 3).

Таблица 1. Характерные параметры для мишени графен-кварц для конфигурации (а) (число протонов 10⁵, энергия 100 кэВ)

Table 1. Characteristic parameters for a graphene-quartz target for configuration (a) (the number of protons is 10⁵, the energy is 100 keV)

Конфигурация мишени	(а)			
	Толщина SiO ₂ , нм		Угол влета протонов, °	
	10	100	0	45
Число дислокаций, см ⁻² с	18557	148459	24743	61858

Таблица 2. Характерные параметры для мишени графен-кварц для конфигурации мишени (б) (число протонов 10⁵, энергия 100 кэВ)

Table 2. Characteristic parameters for the graphene-quartz target for the target configuration (b) (the number of protons is 10⁵, the energy is 100 keV)

Конфигурация мишени	(б)			
	Толщина SiO ₂ , нм		Угол влета протонов, град.	
	10	100	0	45
Число дислокаций, см ⁻² с	43340	222689	37115	55672

Таблица 3. Характерные параметры для мишени графен-кварц для разных значений энергии протонов (число протонов 10⁵, угол влета протонов 0°, толщина SiO₂ 10 мкм)

Table 3. Characteristic parameters for a graphene-quartz target for different proton energies (the number of protons is 10⁵, the angle of entry of protons is 0°, the thickness of SiO₂ is 10 μm)

Конфигурация мишени	(б)	
Энергия протонов, кэВ	100	1000
Число дислокаций, см ⁻² с ¹	24743	55672

Заключение

Проведена численная оценка дислокаций в графене на диэлектрической кварцевой подложке под действием ионизирующего излучения в геостационарной орбите Земли. Результаты моделирования подтверждают высокий потенциал такой системы для применений в космических условиях.

Результаты настоящего исследования будут в дальнейшем использованы для разработки электронных устройств на основе графена в интересах аэрокосмической отрасли.

Библиографические ссылки / References

- Geim A.K., Novoselov K.S. The rise of graphene. *Nat Mater* 2007; 6: 183-91.
- Falkovsky L.A. Optical properties of graphene. *J Phys Conf Ser* 2008; 129: 012004.
- Rehman M.A., Roy S.B., Akhtar I., Bhopal M.F., Choi W., Nazir G., et al. Thickness-dependent efficiency of directly grown graphene based solar cells. *Carbon* 2019; 148: 187-195.
- Hossain M.B., Rana M.M., Abdulrazak L.F., Mitra S., Rahman M. Graphene-MoS₂ with TiO₂/SiO₂ layers based surface plasmon resonance biosensor: Numerical development for formalin detection. *Biochem Biophys Res* 2019; 18: 100639.
- Dutta V., Singh P., Shandilya P., Sharma S., Raizada P., Saini A.K., et al. Review on advances in photocatalytic water disinfection utilizing graphene and graphene derivatives-based nanocomposites. *J. Environ Chem. Eng.* 2019; 7: 103132.
- Li X., Zhu B., Zhu J. Graphene oxide based materials for desalination. *Carbon* 2019; 146: 320-328.
- Abdelkader B.A., Antar M.A., Laoui T., Khan Z. Development of graphene oxide-based membrane as a pretreatment for thermal seawater desalination. *Desalination* 2019; 465: 13-24.
- Li S., Huang K., Fan Q., Yang S., Shen T., Mei T., et al. Highly sensitive solution-gated graphene transistors for label-free DNA detection. *Biosens Bioelectron* 2019; 136: 91-97.
- Wang J., Liu Y., Cheng M., Zhao H., Wang J., Zhao Z., et al. Hierarchical porous carbon-graphene-based Lithium-Sulfur batteries. *Electrochimica Acta* 2019; 318: 161-168.
- Batignani G., Bettarini S., Borghi G., Boscardin M., Ciarracchi A., Crivellari M., et al. Development of graphene-based ionizing radiation sensors. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect Accel Spectrometers Detect Assoc Equip* 2019; 936: 666-673.
- Walker R.C., Shi T., Silva E.C., Jovanovic I., Robinson J.A. Radiation effects on two-dimensional materials: Radiation effects on two-dimensional materials. *Phys Status Solidi A* 2016; 213 :3065-3077.
- Reitz G. Characteristic of the radiation field in low earth orbit and in deep space. *Z Für Med Phys* 2008; 18: 233-243.
- Tibolla O., Blandford R.D. Cosmic Ray Origin – Beyond the Standard Models. *Nucl. Part. Phys. Proc.* 2018; 297-299: 1-5.
- Kim D., Park N.H., Lee H., Lee J., Yeom D.-I., Kim J. Graphene-based saturable absorber and mode-locked laser behaviors under gamma-ray radiation. *Photonics Res* 2019; 7: 742.
- Alexandrou K., Masurkar A., Edrees H., Wishart J.F., Hao Y., Petrone N., et al. Improving the radiation hardness of graphene field effect transistors. *Appl Phys Lett* 2016; 109: 153108.
- Fung S.F. Recent Development in the NASA Trapped Radiation Models. In: Lemaire J.F., Heynderickx D., Baker D.N., editors. *Geophys. Monogr. Ser.*, Washington, D. C.: American Geophysical Union; 2013, 79-91.