

УДК 538.975

**Моделирование воздействия потока нейтронов высоких и тепловых энергий
на полупроводниковые пленочные гетероструктуры**

В.Р. Ямурзин

Научный руководитель: к.ф.-м. н., М.В. Булавин
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
Россия, Московская область, г.Дубна, ул.Жолио-Кюри, д.6, 141980

E-mail: yamurzin.v@nf.jinr.ru

**Modeling the impact of high and thermal energy neutron flux
on semiconductor film heterostructures**

V.R. Yamurzin

Scientific Supervisor: Ph.D., M.V. Bulavin
Joint Institute for Nuclear Research (JINR),
Russia, Moscow Region, Dubna, 6 Joliot Curie str., 141980

E-mail: yamurzin.v@nf.jinr.ru

Abstract. *This scientific study involves extensive numerical modeling using Geant4 software to examine the impact of neutrons with varying energies on semiconductor films. The research encompasses a wide range of reactions, including elastic collisions and inelastic processes. A key focus is the investigation of how neutron energy influences reactions within the semiconductor and the resulting secondary particle formation. This work is essential for comprehending the physical processes within semiconductors under neutron irradiation and has the potential to contribute to the development of new methods for controlling and manipulating semiconductor properties. The data obtained will enable more accurate prediction of semiconductor electro-physical characteristics under different conditions and may have applications in diverse fields such as nuclear energy, electronics, medical technology, and aerospace.*

Key words: *semiconduction, Geant4, SRIM, neutron.*

Введение

В настоящее время ведутся множественные работы по изучению радиационной стойкости плёнок на основе полупроводниковых гетеро-структур. Использование подобных электронных устройств открывает новые перспективы в различных областях современной науки: в электронных устройствах атомной промышленности и аэрокосмической аппаратуры.

В большинстве исследований радиационные испытания обычно фокусируются на самих электронных устройствах, а не на основных полупроводниковых материалах. Однако данные о радиационно-стимулированных изменениях параметров устройств (токи насыщения и утечки, коэффициенты усиления, напряжение пробоя) затруднительно использовать для получения информации о механизмах действия ионизирующих излучений на устройства. Поэтому актуальны исследования устойчивости фундаментальных оптических, электрических и структурных свойств полупроводниковых гетероструктур к ионизирующему нейтронному облучению [1].

В этой работе были исследованы эффекты одиночных событий, происходящих в исследуемом материале под действие ионизирующего нейтронного излучения. Численное моделирование проводилось путём прямого расчёта при помощи программного обеспечения Geant4 [2]. На основе данного моделирования в дальнейшем составляем анализ различных ядерных реакций, происходящих в материале после взаимодействия с нейтронами, образовавшихся вторичных частиц, линейной передачи энергии (ЛПЭ) и пробега.

Экспериментальная часть

Мы рассматривали мишень из объемного чистого материала с геометрией параллелепипеда (объем 1 см^3) и со следующими параметрами: Плотность 5.670 g/cm^3 , радиационная длина 1.741 см , ядерная длина взаимодействия 28.273 см , I_{mean} (средняя энергия ионизации) 424.674 eV . Элементный состав этой мишени представлен в таблице 1.

Таблица 1

Таблица изотопов и изобилия элементов в материале мишени

Element	N	ElmMassFraction, %	Abundance, %	ElmAbundance, %
In	113	60	5	49.46
	115		95	
As	75	40	100	50.54

Каждая мишень виртуально облучалась нейтронами, прилетевшими перпендикулярно к поверхности, с энергией равной $0,0253 \text{ эВ}$, 14 МэВ и спектру. Последний был выбран равным спектру нейтронов экспериментального энергетического спектра нейтронов реактора ИБР-2 канала №3 на расстоянии 30 мм от водяного замедлителя.

Результаты

В ходе моделирования было определено количество произошедших реакций и образовавшихся вторичных частиц для каждой энергии нейтрона. Важным аспектом исследования было выявление процентного соотношения реакций, произошедших в материале под воздействием нейтронов. Эта информация позволяет оценить распределение вторичных частиц в материале в зависимости от энергии нейтронов и остается стабильной даже при различных потоках нейтронов, таких как поток в 10^{10} нейтронов.

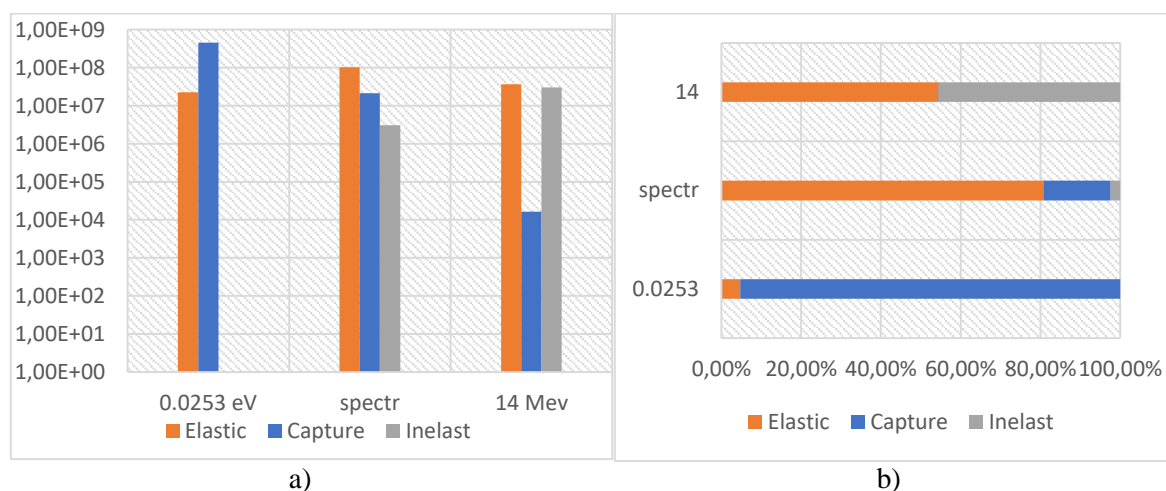


Рис. 1. Рассчитанная доля упругих, неупругих событий и реакций захвата для различных энергий нейтронного излучения а) в абсолютных единицах б) в процентном соотношении

Из анализа результатов становится ясно, что количество реакций каждого типа сильно зависит от энергии налетающего нейтрона. Эта зависимость объясняется значениями сечений реакций для элементов кристаллической решетки материала InAs, представленными выше. Для различных энергий налетающего нейтрона существует соответствующее сечение для каждого типа реакции. При энергиях тепловых нейтронов определенные реакции захвата (Capture) оказываются более вероятными в 95,24 % случаев, в то время как упругие реакции составляют всего 4,76 %. Большинство реакций захвата происходят именно на атомах индия (In), что подтверждается количеством образовавшихся ядер, равным зарядовому числу In (см. рис.).

При более высоких энергиях реакции упругих соударений становятся доминирующими (54,51 % - Elastic, 45,47 % - InElastic). Кроме того, быстрые нейтроны в основном вызывают радиационные дефекты, выбивая атомы из узлов кристаллической решетки.

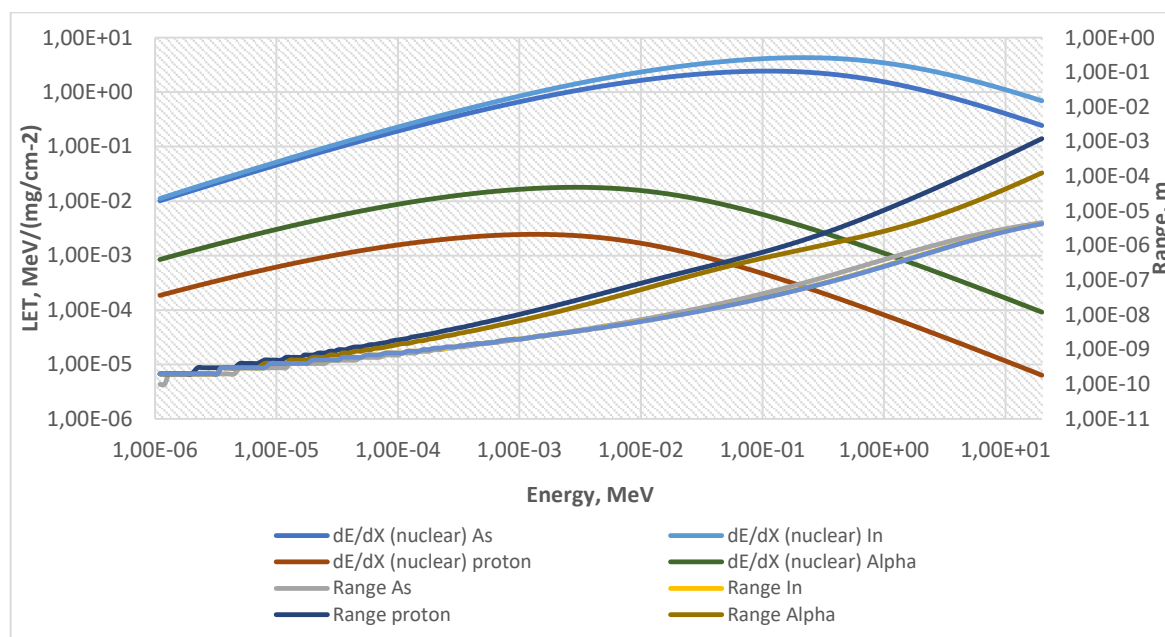


Рис. 2. Линейная передача энергии и длины пробега заряженных частиц внутри InAs в зависимости от энергии

Длина пробега заряженных частиц, отображаемая на рисунке 4, указывает на несколько важных особенностей. Лёгкие заряженные частицы, такие как протоны и альфа-частицы, способны пройти значительное расстояние в материале перед тем, как начать взаимодействие с другими частицами. С другой стороны, более тяжёлые частицы обладают меньшим пробегом и более высокими начальными значениями LET. Это приводит к образованию большого количества дефектов в точке взаимодействия этих заряженных частиц.

Тем не менее, важно отметить, что всесторонний и точный анализ должен также включать влияние электрического поля на собранный заряд, переходные процессы тока, а также рассматривать механизмы рекомбинации носителей для эффективного подтверждения этих наблюдений в реальных условиях.

Заключение

Анализ результатов свидетельствует о значительной зависимости количества реакций различных типов от энергии налетающего нейтрона в кристаллической решетке материала InAs.

В целом, результаты анализа позволяют лучше понять влияние нейтронного излучения на материал и его потенциальные последствия для устройств на его основе.

Работа выполнена в рамках гранта МОН «Методы синхротронной и нейтронной диагностики материалов ядерной, термоядерной энергетики и сверхпроводящих материалов».

Список литературы

1. Bolshakova I.A., Kost Ya.Ya., Radishevskiy M.I. Resistance of Hall Sensors Based on Graphene to Neutron Radiation // *Nanomaterials in Biomedical Application and Biosensors*. – 2020. – P. 199–209.
2. Geant4. Physics Reference Manual // geant4 URL: <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/index.html>.