

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

А. Ю. БАРНЯКОВ, А. А. КАТЦИН

# РАДИАЦИЯ: ВИДЫ РАДИАЦИИ, ИСТОЧНИКИ И ДОЗЫ

Учебно-методическое пособие

НОВОСИБИРСК  
2024

УДК 539.1(075.8)  
Б255

Рецензенты:

*С. В. Полосаткин*, канд. физ.-мат. наук, доцент  
*А. В. Соколов*, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. ИЯФ СО РАН

Работа подготовлена на кафедре электрофизических установок и ускорителей и утверждена Редакционно-издательским советом университета в качестве учебно-методического пособия для студентов I и II курса магистратуры, обучающихся по направлениям 03.04.02 «Физика» и 11.04.01 «Радиотехника»

**Барняков А. Ю.**

Б255      Радиация: виды радиации, источники и дозы: учебно-методическое пособие / А. Ю. Барняков, А. А. Катцин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2024. – 40 с.

ISBN 978-5-7782-5147-2

В учебно-методическом пособии описаны основные понятия, связанные с явлением радиации, такие как радиоактивность, дозы, источники радиации, радиационная стойкость материалов и полупроводниковых приборов, радиационное дефектообразование и скейлинг неионизирующих потерь. Приведены основные формулы как для расчета радиационных доз, так и для оценки эффективности создания повреждений в кристаллической решетке материалов под действием радиации. Сформулирован ряд задач для самостоятельного решения и более глубокого понимания темы «Радиация: виды радиации, источники и дозы».

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов I и II курса магистратуры ФТФ, изучающих курс «Экспериментальные методы ядерной физики».

УДК 539.1(075.8)

ISBN 978-5-7782-5147-2

© Барняков А. Ю., Катцин А. А., 2024  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Когда речь заходит о радиации, большинство людей, вероятнее всего, представляют себе ядерный взрыв или аварию на атомной электростанции. На самом же деле мы сталкиваемся с радиацией достаточно часто и в повседневной жизни. Например, некоторые бытовые датчики дыма оснащаются источником  $\alpha$ -излучения – изотопом  $^{241}\text{Am}$ , а более ранние их аналоги даже оснащались изотопом  $^{239}\text{Pu}$ . Мы все регулярно проходим медицинские обследования с применением рентгенографических технологий, получая при этом незначительную, но все же дополнительную дозу  $\gamma$ -излучения. Не предпринимая ничего особенного, а просто живя на поверхности Земли, мы все получаем дозу так называемого естественного радиационного фона, которая складывается из космического излучения и из излучения изотопов некоторых элементов и их соединений (таких как  $^{40}\text{K}$ ,  $^{30}\text{Cl}$  или  $^{14}\text{C}$ ), которые попадают в организм вместе с пищей, водой и воздухом.

В зависимости от среды обитания и образа жизни радиационная доза, получаемая человеком от естественных источников, может варьироваться в разы. Кроме того, с самого начала нужно отметить, что радиация не всегда является негативным явлением, с которым нужно бороться. В современной медицине ядерные излучения используются не только для диагностики заболеваний (рентгенография, позитрон-эмиссионная томография и др.), но и для лечения онкологических заболеваний: активно развиваются методы радиотерапии, протонной и борнейтронозахватной терапии, когда онкологические образования облучаются  $\gamma$ -квантами, протонами и нейтронами соответственно.

Первый раздел учебно-методического пособия посвящен описанию ключевых видов радиации, источников радиоактивного излучения и единиц измерения.

В этом пособии мы намерено не будем подробно рассматривать влияние радиации на живые организмы, потому что имеется много другой, более специализированной литературы, и для такого рода обзоров нужно иметь образование, специализированное в области медицины и биологии в большей степени, чем образование, получаемое на физико-техническом факультете НГТУ. Тем не менее для полноты картины во втором разделе кратко рассматриваются механизмы воздействия основных видов радиации на организм человека, общепринятые на данный момент в мире единицы измерения радиации и нормативы для разных категорий населения.

Современным физикам и инженерам должно быть хорошо известно, что воздействию радиации подвержены не только живые организмы, но также и некоторые элементы техники, в частности полупроводниковая электроника и приборы на основе полупроводниковых материалов. Поэтому в третьем разделе рассматриваются особенности и подходы к измерению доз радиации, которые способны выдержать некоторые приборы, применяемые в экспериментальной ядерной физике.

Четвертый раздел содержит задачи для самостоятельной работы. Решение этих задач поможет получить дополнительную информацию по теме, а также закрепить знания, полученные из данного учебно-методического пособия. Для решения задач рекомендуется также воспользоваться дополнительными материалами [1, 2].

Настоящее учебно-методическое пособие ориентировано на студентов физико-технического факультета старших курсов, а также студентов других курсов, проходящих подготовку по дисциплине «Экспериментальные методы ядерной физики», и может быть использовано как дополнительный учебный материал.

## 1. ВИДЫ РАДИАЦИИ

Радиация (от лат. radiatio, «излучение») – обобщенное понятие. Оно обозначает различные виды излучений, встречающихся в природе либо получаемых искусственным путем. Традиционно радиацией считают только те электромагнитные и субмолекулярные корпускулярные излучения, которые способны передать энергию структурным элементам вещества (атомам, электронам, ядрам, молекулам), достаточную для их перехода в новое энергетическое состояние или даже для выбивания их из узла кристаллической решетки.

Понятие «радиация» тесно связано с явлением радиоактивности, открытым Анри Беккерелем в 1896 г. В результате опытов Эрнеста Резерфорда с ядерным излучением и магнитным полем в 1899 г. было обнаружено, что радиоактивное излучение не однородное, а состоит из положительно заряженных, отрицательно заряженных лучей и нейтральных частиц (рис. 1), получивших названия  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи соответственно, которыми мы в основном и пользуемся при описании радиации. Кроме того, открытие явления радиоактивности стало одним из фундаментальных шагов человечества к пониманию структуры атома – к томсоновской модели, а впоследствии к модели Резерфорда и вообще к развитию ядерной физики и физики элементарных частиц.

Прежде всего следует различать корпускулярное излучение, состоящее из частиц с массой, отличной от нуля, и электромагнитное излучение. Корпускулярное излучение может состоять как из заряженных, так и из нейтральных частиц.

### **Корпускулярное излучение**

- *Альфа-излучение* представляет собой тяжелые положительно заряженные  $\alpha$ -частицы (ядра гелия  ${}^4\text{He}$ ), которые испускаются при радиоактивном распаде элементов тяжелее свинца или образуются в ядерных реакциях.

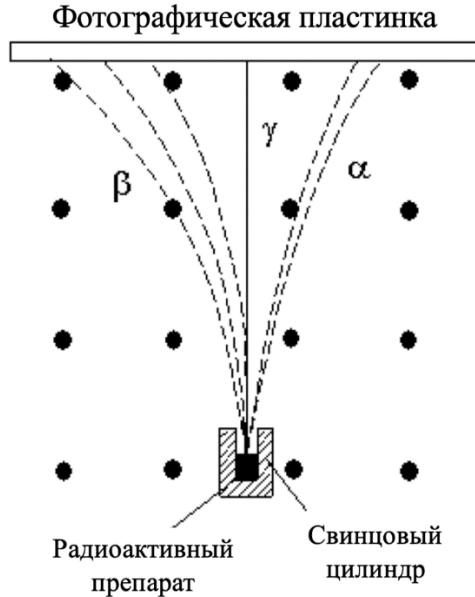


Рис. 1. Схема опыта Резерфорда: влияние магнитного поля (направлено перпендикулярно плоскости рисунка к наблюдателю) на радиоактивные излучения

- *Бета-излучение* – это электроны или позитроны, которые образуются при  $\beta$ -распаде различных элементов, от самых легких (нейтронов) до самых тяжелых.
- *Космическое излучение* приходит на Землю из космоса. В его состав входят преимущественно протоны и атомные ядра (в основном гелия). Более тяжелые элементы составляют менее 1%. Проникая вглубь атмосферы, космическое излучение взаимодействует с ядрами, входящими в состав атмосферы, и образует потоки вторичных частиц (мезоны,  $\gamma$ -кванты, нейтроны, мюоны и др.).
- *Нейтроны* образуются в ядерных реакциях (в ядерных реакторах и в других промышленных и исследовательских установках, а также при ядерных взрывах).
- *Протоны, ионы.* В современных экспериментах по ядерной физике и ядерной медицине можно встретиться с потоками протонов и ионов.

## Электромагнитное излучение

Электромагнитное излучение имеет широкий спектр энергий и различные источники. Это может быть  $\gamma$ -излучение атомных ядер, тормозное излучение ускоренных электронов и радиоволны. К радиации не относят низкоэнергетическое излучение (с энергией меньше 1 эВ). К ионизирующему излучению относят коротковолновое электромагнитное излучение:  $\gamma$ -излучение атомных ядер и рентгеновское излучение. Некоторые характеристики электромагнитного излучения приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

### Характеристики электромагнитного излучения

Энергия, эВ	Длина волны, м	Частота, Гц	Источник излучения
Более $10^5$	Менее $5 \cdot 10^{-12}$	Более $3 \cdot 10^{19}$	Гамма-излучение ядер
$124 \dots 124 \cdot 10^3$	$10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{19}$	Рентгеновское излучение
3,1...124	$(380 \dots 10) \cdot 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$	Ультрафиолетовое излучение
1,68...3,26	$(780 \dots 380) \cdot 10^{-9}$	$(429 \dots 750) \cdot 10^{12}$	Видимый свет
$1,24 \cdot 10^{-3} \dots 1,7$	$1 \cdot 10^{-3} \dots 780 \cdot 10^{-9}$	$(0,3 \dots 429) \cdot 10^{12}$	Инфракрасное излучение
$1,24 \cdot 10^{-6} \dots 1,24 \cdot 10^{-3}$	$1 \dots 1 \cdot 10^{-3}$	$(0,3 \dots 300) \cdot 10^9$	Микроволновое излучение
$12,4 \cdot 10^{-15} \dots 1,24 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^5 \dots 1$	$3 \cdot 10^3 \dots 300 \cdot 10^6$	Радиоволны

### Естественная радиоактивность

Естественная радиация была всегда – и до появления человека, и даже до образования нашей планеты. Радиоактивно всё, что нас окружает: почва, вода, растения и животные. В зависимости от региона планеты уровень естественной радиоактивности может колебаться от 5 до 20 микрорентген в час.

Источниками естественной радиации являются:

- космическое излучение;
- естественная радиоактивность;
- радон;
- внутренняя радиация;
- уголь.

Космическое излучение складывается из частиц, захваченных магнитным полем Земли, галактического космического излучения и корпускулярного излучения Солнца:

- галактическое космическое излучение (плотность потока  $10^{-4} \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ );
- солнечная радиация (плотность потока  $10^{-5} \dots 10^1 \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ );
- внешний радиационный пояс Земли (расстояние до поверхности 16 000 км, плотность потока  $10^7 \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ );
- внутренний радиационный пояс (расстояние до поверхности 3500 км, плотность потока  $10^4 \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ ).

В состав космического излучения входят в основном электроны, протоны и  $\alpha$ -частицы. Это так называемое первичное космическое излучение (ПИК), взаимодействуя с атмосферой Земли, порождает вторичное излучение. Первичное излучение сильно ослабляется атмосферой, интенсивность ПИК на уровне моря составляет одну частицу через квадратный метр за 2000 лет. На рис. 2 приведены вертикальные потоки главных компонент вторичных космических лучей – пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов с энергией больше 1 ГэВ в атмосфере Земли. Таким образом, вместо одной первичной частицы возникает большое количество вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты (рис. 3). На уровне моря интенсивность компонент следующая:

- адронная компонента (ЯА) составляет  $10^{-5}$  частиц/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ );
- электрон-фотонная (ЭФ) –  $0,7 \cdot 10^{-2}$  частиц/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ );
- мюонная (М) –  $1,7 \cdot 10^{-2}$  частиц/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ).

Адронная компонента до поверхности Земли практически не доходит, превращаясь в мюоны, нейтрино и  $\gamma$ -кванты в результате распадов.

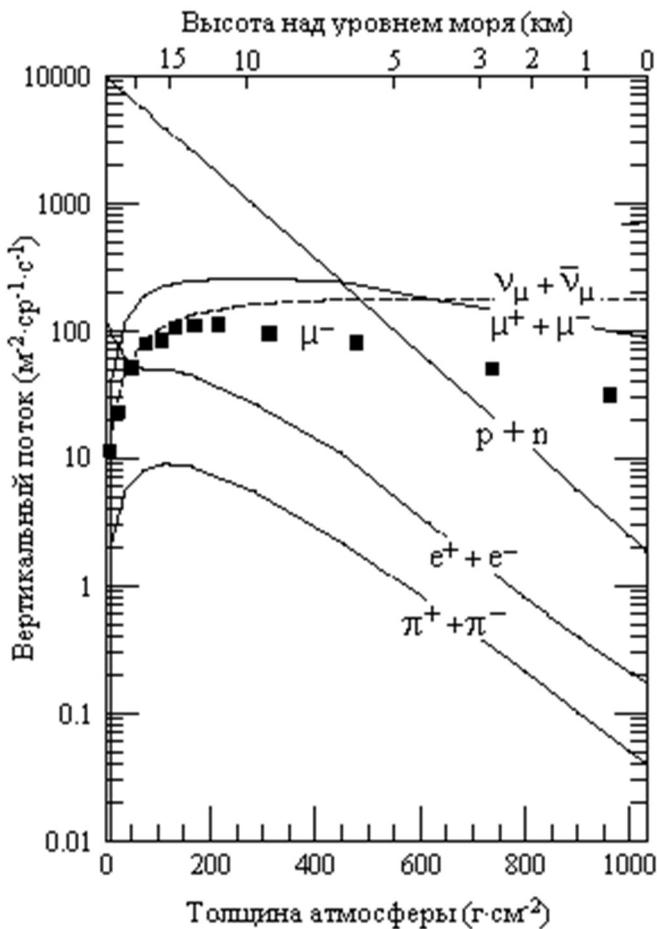


Рис. 2. Вертикальные потоки космических лучей в атмосфере. За исключением протонов и электронов на больших высотах, все остальные частицы образуются в результате взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой. Точками показаны результаты измерений отрицательных мюонов с энергией больше 1 ГэВ

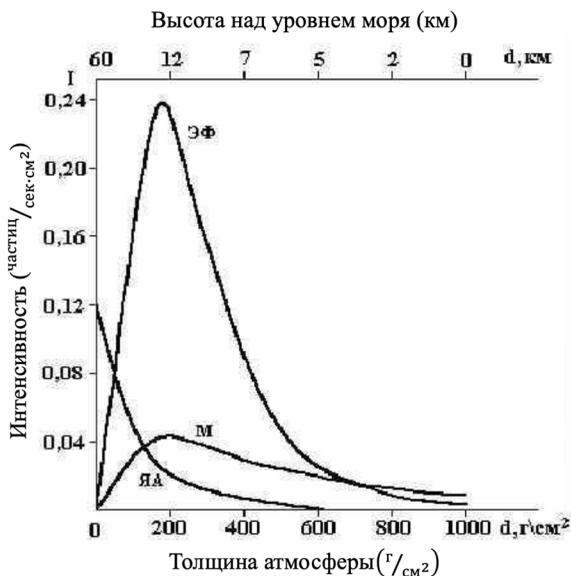


Рис. 3. Вторичные космические лучи: интенсивность компонент на разных высотах

Таким образом, на уровне моря излучение состоит почти полностью из мюонов (подавляющая часть) и нейтронов. Известно также, что интенсивность космических лучей на высоте 12 км превосходит в 25 раз интенсивность на уровне моря (рис. 4).

Поглощенная мощность дозы космического излучения в воздухе на уровне моря равна 32 нГр/час и формируется в основном мюонами. Для нейтронов на уровне моря мощность поглощенной дозы составляет 0,8 нГр/час, а мощность эквивалентной дозы составляет 2,4 нЗв/час. За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную примерно 0,3 мЗв в год. Более подробно единицы измерения радиоактивности будут рассмотрены в разделе 2.

В настоящее время на Земле сохранилось 23 долгоживущих радиоактивных элемента с периодами полураспада от  $10^7$  лет и более. В трех радиоактивных семействах – урана ( $^{238}\text{U}$ ), тория ( $^{232}\text{Th}$ )

и актиния ( $^{235}\text{Ac}$ ) – в процессах радиоактивного распада постоянно образуется 40 радиоактивных изотопов. Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников, составляет около 0,5 мЗв, т. е. чуть больше средней индивидуальной дозы, обусловленной облучением из-за космического фона на уровне моря.

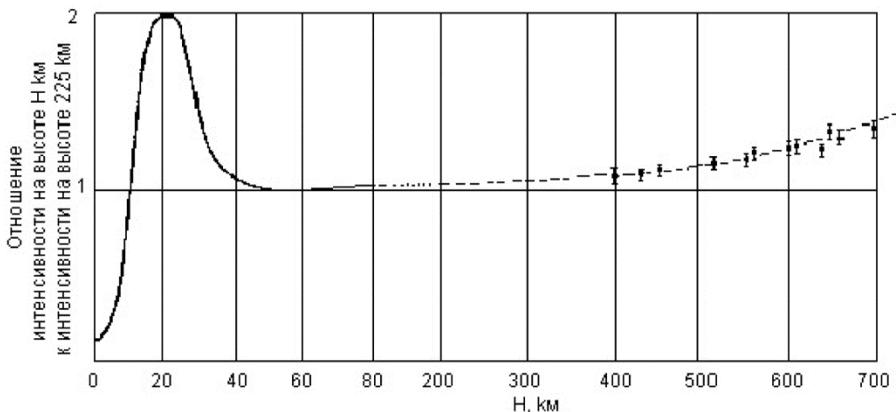


Рис. 4. Зависимость интенсивности космических лучей от высоты

Если человек находится в помещении, то доза внешнего облучения изменяется за счет двух противоположно действующих факторов:

- 1) экранирования внешнего излучения зданием;
- 2) облучения за счет естественных радионуклидов, находящихся в материалах, из которых построено здание.

В зависимости от концентрации изотопов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  в различных строительных материалах мощность дозы в домах изменяется от  $4 \cdot 10^{-8}$  до  $12 \cdot 10^{-8}$  Гр/ч. В среднем в кирпичных, каменных и бетонных зданиях мощность дозы в два-три раза выше, чем в деревянных.

Радиоактивность ТЭС – это явление, связанное с наличием в топливе (угле) для тепловых электростанций (ТЭС) радиоактивных элементов. В процессе работы ТЭС радиоактивные элементы могут накапливаться в топливе и вызывать радиоактивный фон вокруг станции. Зола и шлак,

образующиеся при сжигании углей, обогащены естественными радионуклидами. Золошлаковые отвалы ТЭС занимают огромные территории, образуя с годами, по сути, техногенные месторождения естественных радионуклидов. Выбрасываемая в атмосферу из труб ТЭС летучая зола оседает на растениях и почве. Среднее содержание урана в углях составляет 3,6 грамм на тонну (г/т), а тория для бурых углей – 6,3 г/т, для каменных – 3,5 г/т [3]. В целом по миру средняя удельная активность  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в углях оценивается в 20 Бк/кг, а  $^{40}\text{K}$  – в 50 Бк/кг. Следует отметить, что содержание урана в углях большей части угольных месторождений России не превышает среднего.

В итоге средняя годовая доза радиации, получаемая человеком на Земле, составляет примерно 3 мЗв/год.

## 2. МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ НА ЧЕЛОВЕКА И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

### 2.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Действие ионизирующих излучений представляет собой сложный процесс. Эффект облучения зависит от величины поглощенной дозы, ее мощности, вида излучения, а также объема облучения тканей и органов. Для описания влияния ионизирующих излучений на вещество используются следующие понятия и единицы измерения.

- *Активность радионуклида в источнике (скорость распада)  $A$*  – отношение числа самопроизвольных ядерных превращений  $dN$  в этом источнике за малый интервал времени  $dt$  к величине этого интервала:

$$A = \frac{dN}{dt}.$$

Единица активности в системе СИ – беккерель (Бк), раньше она измерялась в кюри (Ки),  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ .

Активность характеризует только сам источник и поэтому дает слабое представление о возможных биологических эффектах.

- *Поглощенная доза  $D$*  – основная дозиметрическая величина. Она равна отношению средней энергии  $\Delta E$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе  $\Delta m$  вещества в этом объеме (количество энергии, поглощенное на единицу массы облученного тела):

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}.$$

Поглощенная доза измеряется в греях (Гр):

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 6,24 \cdot 10^{12} \frac{\text{МэВ}}{\text{кг}}.$$

Когда речь идет о поглощенной дозе, не принимаются во внимание эффекты воздействия поглощенного излучения на организм.

- Доза в органе или ткани  $D_T$  – средняя доза, поглощенная в определенном органе или ткани:

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D \, dm,$$

где  $m_T$  – масса органа или ткани;  $D$  – поглощенная доза в элементе массы  $dm$ .

- *Эквивалентная доза  $H$* . Для оценки возможного ущерба здоровью человека в условиях хронического облучения в области радиационной безопасности введено понятие эквивалентной дозы, равной произведению поглощенной дозы  $D_r$ , созданной облучением  $r$  и усредненной по анализируемому органу или по всему организму, на взвешивающий коэффициент типа излучения  $w_r$ , называемый также коэффициентом качества излучения (табл. 2):

$$H_r = w_r D_r.$$

В случае комплексного воздействия ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения или других видов) эквивалентная доза составляет

$$H_{tot} = \sum_r H_r.$$

Единица эквивалентной дозы – зиверт (Зв),  $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$ .

Влияние облучения носит неравномерный характер. Для оценки ущерба здоровью человека за счет различного характера влияния облучения на разные органы (в условиях равномерного облучения всего тела) введено понятие эффективной эквивалентной дозы.

Т а б л и ц а 2

**Весовые коэффициенты для разных типов излучений**

Вид излучения и диапазон энергий	Весовой множитель $w_r$
Фотоны всех энергий	1
Электроны и мюоны всех энергий	1
Нейтроны с энергией $T$ меньше 10 кэВ	5
Нейтроны с энергией $T$ от 10 до 100 кэВ	10
Нейтроны с энергией $T$ от 100 кэВ до 2 МэВ	20
Нейтроны с энергией $T$ от 2 МэВ до 20 МэВ	10
Нейтроны с энергией $T$ больше 20 МэВ	5
Протоны с энергий $T$ больше 2 МэВ (кроме протонов отдачи)	5
$\alpha$ -частицы, осколки деления и другие тяжелые ядра	20

• *Эффективная доза  $E$*  – это мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиационной чувствительности:

$$E = \sum_T w_T H_T, \left( \sum_T w_T = 1 \right),$$

где  $w_T$  – тканевый весовой множитель (табл. 3),  $H_T$  – эквивалентная доза, поглощенная в конкретной ткани. Единица измерения эффективной эквивалентной дозы – зиверт.

Т а б л и ц а 3

**Значения тканевых весовых множителей  $w_T$  для различных органов и тканей**

Ткань или орган	Весовой множитель $w_T$
Гонады (половые железы)	0,20
Костный мозг (красный)	0,12
Толстый кишечник	0,12

Ткань или орган	Весовой множитель $w_T$
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Молочные железы	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Поверхность костей	0,01
Остальные органы и ткани	0,05

В России документами, устанавливающими стандарты безопасности и охраны здоровья при работе с источниками ионизирующего излучения, такими как радиоактивные материалы, рентгеновские аппараты и ускорители частиц, являются «Нормы радиационной безопасности» (НРБ) и «Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами». Эти документы определяют допустимые уровни радиации, требования к оборудованию, методы контроля и другие меры для обеспечения радиационной безопасности на рабочих местах, в медицинских учреждениях и других местах, где используются радиоактивные источники.

## 2.2. НОРМАТИВЫ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ДОЗЫ

В российском законодательстве все потенциально облучаемые лица разделены на две категории.

### 1. Персонал, работающий с источниками излучения:

- группа А: персонал – лица, которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений;
- группа Б: персонал или ограниченная часть населения – лица, которые не работают непосредственно с источниками ионизирующего излучения, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений.

2. Все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Эффективные дозы техногенного происхождения для каждой группы показаны в табл. 4. Эти эффективные дозы не учитывают дозы от природного или медицинского облучения и аварий.

Таблица 3

**Эффективные дозы техногенного происхождения**

Доза	Группа А	Группа Б	Население
Раз в год	20 мЗв	5 мЗв	1 мЗв
В среднем (за любые последовательные 5 лет)	50 $\frac{\text{мЗв}}{\text{год}}$	12,5 $\frac{\text{мЗв}}{\text{год}}$	5 $\frac{\text{мЗв}}{\text{год}}$
Интегральная доза	1000 мЗв (50 лет)		70 мЗв (70 лет)

Летальные дозы на все тело: 100 Гр приводят к смерти через несколько часов из-за поражения ЦНС; 10...50 Гр – смерть через 1–2 недели из-за кровоизлияний в ЖКТ; 3...5 Гр – половина облученных умирает за 1–2 месяца из-за поражения костного мозга.

Отметим, что все ткани переносят облучение по-разному: глазной хрусталик мутнеет при дозе 2 Гр, а печень выдерживает 40 Гр за месяц. При постепенном наборе дозы ткани частично успевают восстанавливаться, и суммарная доза может быть выше без тяжелых последствий. Например, однократная доза больше 3 Гр приводит к стерилизации яичников, но при дробном облучении даже большие дозы не сказываются на способности к деторождению.

Механизм действия радиации на человека можно описать следующим образом.

1. Физическое взаимодействие. В течение очень короткого промежутка времени (порядка  $10^{-13}$  с) происходит поглощение энергии ионизирующих излучений тканями организма. В результате возникают возбужденные и ионизированные атомы и молекулы.

2. Физико-химические изменения. Вследствие возбуждения и ионизации молекул в них происходят внутренние перестройки за счет миграции энергии и заряда внутри молекулы или между молекулами

(в пределах  $10^{-10}$  с). Возникают первично поврежденные молекулы и продукты их деградации – ионы и химические радикалы. Примерно 50 % всех возникающих свободных радикалов образуются из молекул воды, составляющих около 70 % массы живых организмов.

3. Химические изменения. Ионы и свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами, повреждая их. Это происходит также в течение короткого промежутка времени ( $10^{-6}$  с). В результате возникают вторично (химически) поврежденные молекулы.

4. Биологические эффекты. Сроки их формирования находятся в широких пределах – от  $10^{-6}$  с до многих лет. В основе развивающихся в этот период процессов лежат изменения внутриклеточного обмена веществ. В зависимости от полученной дозы ионизирующих излучений внутриклеточный обмен веществ нарушается в различной степени – от небольших сдвигов с последующим восстановлением до полного и стойкого срыва, приводящего к гибели клеток или таким изменениям в них, которые могут привести к раку или повреждению ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота – макромолекула, обеспечивающая хранение, передачу и реализацию генетической программы развития и функционирования живых организмов), последствия которого могут сказываться в последующих поколениях.

Радиация по-разному действует на людей в зависимости от пола и возраста, состояния организма, его иммунной системы и др.

### 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ НА МАТЕРИАЛЫ

Радиационные воздействия способны вызвать как немедленную (мгновенную), так и накапливающуюся реакцию в материале. Среди существующих различных видов излучения наибольшую опасность для приборов представляют мощные электромагнитные излучения и частицы высоких энергий. Полный спектр электромагнитных излучений охватывает очень широкий диапазон длин волн: от десятков тысяч метров до тысячных долей нанометра. Низкоэнергетическое излучение (энергия меньше 1 эВ) не оказывает радиационного воздействия, тогда как рентгеновское излучение и  $\gamma$ -лучи оказывают очень сильное воздействие на приборы. Электромагнитное излучение в диапазоне длин волн  $10^{-12} \dots 10^{-9}$  м называют рентгеновским;  $\gamma$ -лучи возникают при ядерных реакциях и при переходе ядер из возбужденного состояния в невозбужденное ( $\lambda < 10^{-12}$  м).

Для количественного описания рентгеновского и  $\gamma$ -излучения используются такие физические величины, как доза и мощность излучения. Источники и уровни радиации описываются экспозиционной дозой излучения, представляющей собой количество излучения, создающее посредством ионизации в одном килограмме сухого атмосферного воздуха заряд, равный одному кулону каждого знака. В качестве единицы измерения экспозиционной дозы принята физическая величина, называемая кулон на килограмм (Кл/кг). Для описания интенсивности излучения применяется физическая величина, называемая мощностью экспозиционной дозы, представляющая собой приращение экспозиционной дозы в единицу времени. Единица ее измерения, ампер на килограмм (А/кг), равняется мощности излучения, передающего сухому

атмосферному воздуху дозу излучения (Кл/кг) за одну секунду. В ряде случаев для описания экспозиционной дозы применяется внесистемная единица, называемая рентген, равная  $2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг, а для описания интенсивности излучения – рентген в секунду (Р/с).

Потоком ионизирующих частиц называется физическая величина, равная числу частиц, падающих на данную поверхность в единицу времени. Единицей измерения потока частиц является секунда в минус первой степени ( $\text{с}^{-1}$ ), поток ионизирующих частиц, при котором через данную поверхность в течение одной секунды проходит одна частица. Плотностью потока ионизирующих частиц называется физическая величина, равная отношению потока ионизирующих частиц, проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы. Единицей измерения плотности потока является величина с размерностью  $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ , равная плотности равномерного потока ионизирующих частиц, при которой через поверхность  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярной к потоку, за одну секунду проходит одна частица.

В современной практике широкое распространение получила единица измерения, называемая *флюенсом* (также встречается название «интегральный поток частиц»), представляющая собой произведение плотности потока на время экспозиции и имеющая размерность метр в минус второй степени ( $\text{м}^{-2}$ ).

### 3.1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКАМИ

Движение заряженных частиц в веществе сопровождается потерей энергии, затрачиваемой почти полностью на ионизацию и возбуждение связанных электронов, а также неионизирующие потери энергии (non-ionizing energy losses, NIEL). Энергия свободного электрона может быть любой, если он оказывается вне атома. Если электрон не отрывается от атома, а лишь переходит в возбужденное состояние, то энергия приобретает дискретные значения. В твердых телах (например, в полупроводниках и диэлектриках) по аналогии с газами имеет место

внутренняя ионизация, которая соответствует переходу валентных электронов в зону проводимости. Средняя энергия ионизации при облучении электронами составляет в кремнии 3,6 эВ, в арсениде галлия 7,2 эВ, в германии 2,86 эВ.

При взаимодействии  $\gamma$ -излучения с веществом имеют место в основном три механизма его поглощения и рассеяния: фотоэффект, комптон-эффект и образование электрон-позитронных пар.

При фотоэффекте квант  $\gamma$ -излучения взаимодействует с одним из электронов оболочки атома, полностью передает ему энергию и выбивает его за пределы атома. Вылетающий электрон обладает энергией, равной разности энергии поглощенного кванта  $\gamma$ -излучения и энергии связи электрона в атоме. В результате происходит образование вакантного состояния на соответствующем энергетическом уровне электронной оболочки. На вакантный уровень может перейти электрон с более высокого энергетического уровня, который при этом испускает характеристическое излучение. Таким образом, при фотоэффекте  $\gamma$ -квант исчезает, а его энергия расходуется на выбивание из атомов фотоэлектронов и образование излучения.

Комптоновское рассеяние  $\gamma$ -квантов имеет место в том случае, если энергия квантов  $\gamma$ -излучения, взаимодействующего с веществом, намного превышает энергию связи электрона в атоме. При комптоновском рассеянии происходит упругое взаимодействие  $\gamma$ -кванта и электрона. При этом  $\gamma$ -квант теряет часть энергии и изменяет направление движения, а энергия, переданная электрону, расходуется на отрыв его от атома и придание ему скорости (кинетической энергии).

При взаимодействии  $\gamma$ -кванта с кулоновским полем ядра проявляется эффект образования электрон-позитронных пар. В результате такого взаимодействия  $\gamma$ -квант полностью отдает свою энергию на образование пары частиц позитрон-электрон. Указанный эффект может наблюдаться при энергии  $\gamma$ -квантов, превышающей суммарную энергию покоя электрона и позитрона, равную 1,02 МэВ.

В результате ионизации под воздействием излучения концентрация неосновных носителей в полупроводниковом материале может возрасти на несколько порядков (в  $10^6$  и более раз). В реальных биполярных полупроводниковых приборах ионизирующее излучение с мощностью дозы около  $10^{10}$  Р/с может вызвать ионизационные токи в несколько

ампер. Появление этих токов в приборах приводит к перераспределению потенциалов, перегреву и тепловому пробоем обратных смещенных р-n-переходов.

Помимо эффектов ионизации в твердых телах под воздействием высокоэнергетических частиц возникают радиационные дефекты – более или менее устойчивые нарушения структуры в кристаллах. Теория образования дефектов в твердом теле при воздействии частиц высокой энергии основывается на предположении о наличии двух процессов. Первый процесс заключается в том, что воздействующая частица, передавая атому твердого тела энергию, выбивает его из узла кристаллической решетки. При этом образуется относительно устойчивый точечный дефект «вакансия – междоузельный атом» (пара Френкеля). Вторичный процесс представляет собой взаимодействие выбитого из узла кристаллической решетки атома с соседними атомами. При наличии у выбитого атома достаточной энергии для выбивания из узла решетки вторичного атома этот процесс может развиваться и даже перейти в каскад соударений, сопровождающийся образованием в кристаллической решетке разупорядоченных областей – кластеров. Области повреждений могут достигать размеров порядка 5...50 нм.

Теоретические оценки показывают, что смещение атомов в процессе упругого рассеяния  $\gamma$ -квантов на ядре маловероятно. При прохождении  $\gamma$ -лучей через кристалл смещения происходят в основном при упругих столкновениях вторичных электронов с узловыми атомами. Сложность вычисления числа смещенных атомов при упругом рассеянии электронов на ядрах объясняется тем, что пробег электрона в веществе определяется в основном ионизационными потерями. В связи с этим необходим учет зависимости сечения смещения от энергии смещения  $E_d$ , необходимой для смещения атома в междоузелье (табл. 5). В нерелятивистском приближении поперечное сечение смещения атома с массой  $M_2$  и зарядом  $z_2$  при бомбардировке частицами с массой  $M_1$  и зарядом  $z_1$  равно

$$\sigma_d = \frac{4\pi a_0 M_1 z_1^2 z_2^2 R_\infty^2}{M_2 E E_d}, \quad (1)$$

где  $E$  – энергия падающей частицы;  $a_0$  – радиус Бора ( $0,529177249 \times 10^{-10}$  м);  $R_\infty$  – постоянная Ридберга ( $10973731,534 \text{ м}^{-1}$ ).

На основании известного из формулы (1) поперечного сечения смещения можно определить число первичных атомов, смещенных в единице объема:

$$n_d = I\sigma_d N_0 t, \quad (2)$$

где  $I$  – плотность потока падающего излучения;  $t$  – время;  $N_0$  – число атомов в единице объема. В тех случаях, когда первичному атому передается энергия, большая  $2E_d$ , он сам, как говорилось выше, может участвовать в последующих смещениях атомов. В результате на каждый первично смещенный атом приходится в среднем некоторое число атомов, смещенных в течение каскадного процесса, инициированного первичным атомом.

Первичные точечные дефекты, комплексы и локальные разупорядочения приводят к расширению кристаллической решетки и возникновению механических напряжений.

### **3.2. ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Рассмотренные дефекты оказывают существенное влияние на электрофизические характеристики исходного полупроводникового материала, такие как время жизни неосновных носителей заряда  $\tau$ , удельное сопротивление  $\rho$ , концентрацию неосновных носителей заряда  $n$ , подвижность  $\mu$ . Кратко рассмотрим зависимость указанных параметров от облучения.

Время жизни неосновных носителей заряда является важнейшей характеристикой полупроводниковых материалов, применяемых для изготовления полупроводниковых приборов. В связи с тем, что время жизни неосновных носителей заряда определяется скоростью объемной рекомбинации на ловушках и локальных центрах, эффективность рекомбинации и соответственно время жизни зависят как от концентрации ловушек, так и от вероятности захвата неосновных носителей

рекомбинационными центрами. Радиационные дефекты, образующие в запрещенной зоне полупроводника локальные энергетические уровни, представляют собой эффективные центры рекомбинации. Вследствие этого время жизни неосновных носителей весьма чувствительно к воздействию облучения. Эмпирическое соотношение, подтвержденное экспериментально в довольно широком диапазоне доз облучения, дает следующую количественную характеристику изменения времени жизни неосновных носителей заряда в зависимости от интегрального потока облучения:

$$\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \frac{1}{\tau_0} + \Phi K_{\tau}, \quad (3)$$

где  $\tau_{\Phi}$  – время жизни неосновных носителей после облучения;  $\tau_0$  – время жизни неосновных носителей до облучения;  $K_{\tau}$  – радиационная константа, зависящая от удельного сопротивления исходного материала, природы излучения и скорости введения радиационных дефектов;  $\Phi$  – интегральный поток излучения. Из выражения (3) следует, что с ростом интегрального потока излучения время жизни неосновных носителей заряда монотонно убывает.

Радиационные дефекты в исходных полупроводниковых материалах обуславливают уменьшение концентрации свободных носителей заряда. Экспериментально показано, что концентрация основных носителей заряда изменяется в зависимости от интегрального потока облучения в широком диапазоне доз по экспоненциальному закону:

$$n_{\Phi} = n_0 e^{-a_n \Phi}, \quad (4)$$

где  $n_{\Phi}$  – концентрация электронов после облучения;  $n_0$  – концентрация электронов до облучения;  $a_n$  – постоянный коэффициент, связанный с начальными характеристиками материала.

Подвижность основных носителей заряда в полупроводнике определяется рассеянием на тепловых колебаниях решетки (фононах), ионах примесей, дислокациях и других несовершенствах кристаллов. Радиационные дефекты, как правило, вызывают уменьшение подвижности.

Удельное сопротивление (удельная проводимость) полупроводника связано с исходными характеристиками материала выражением

$$\sigma = 1 / \rho = q(n\mu_n + p\mu_p), \quad (5)$$

где  $\sigma$ ,  $\rho$  – соответственно удельная проводимость и сопротивление;  $n$ ,  $p$  – концентрация электронов и дырок;  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок;  $q$  – заряд электрона.

Образование радиационных дефектов типа центров захвата при облучении способствует уменьшению концентрации основных носителей заряда. Эти же дефекты снижают подвижность основных носителей, поэтому в соответствии с выражением (5) можно говорить, что удельное сопротивление полупроводникового материала должно увеличиться. Экспериментально установлена экспоненциальная зависимость изменения удельного сопротивления полупроводниковых материалов  $n$ - и  $p$ -типов от интегрального потока излучения:

$$\rho_{\Phi} = \rho_0 e^{K_p \Phi}, \quad (6)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho_{\Phi}$  – соответственно удельное сопротивление полупроводника до и после облучения;  $K_p$  – коэффициент пропорциональности, определяемый при калибровке для измеряемого спектра нейтронов [4].

Увеличение концентрации структурных дефектов в металлах под воздействием радиации приводит к увеличению их удельного сопротивления, как и в случае полупроводниковых материалов.

### 3.3. РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

При эксплуатации полупроводниковых приборов (детекторов) в условиях повышенного радиационного фона в них создаются радиационные повреждения. Основные макроскопические проявления радиационных нарушений в работе полупроводникового детектора заключаются в возрастании так называемого темного тока, или тока утечки, что приводит к необходимости существенного изменения напряжения

обеднения (подаваемого на детектор, чтобы обеспечить чувствительность к ионизации первоначальной толщины детектора) и уменьшению эффективности собирания неравновесных носителей заряда, создаваемых ионизацией.

Полупроводниковый детектор – это твердотельная ионизационная камера с контактами, на которые подается постоянное напряжение. Существует две основные конструкции такой камеры: барьерная для сравнительно низкоомных (Ge, Si) полупроводников и омическая для полупроводников (CaAs, CdTe, CdZnTe,  $\text{HeI}_2$ , алмаз). В первом случае р-і-n-структура служит для создания обедненной носителями области, которая является активной зоной детектора. Во втором случае благодаря высокому сопротивлению материала детектора весь его объем служит активной зоной, а электрическое поле, прикладываемое к омическим контактам, предназначено только для сбора неравновесных зарядов, создаваемых облучением в полупроводниковом материале. Основные электрофизические свойства полупроводникового материала, как известно, непосредственно связаны с шириной запрещенной зоны. В табл. 5 приведена ширина запрещенной зоны ( $E_g$ ), а также ряд других параметров полупроводников: статическая ( $\epsilon_0$ ) и высокочастотная ( $\epsilon_\infty$ ) диэлектрические проницаемости; показатель преломления ( $n$ ); температура Дебая ( $T_D$ ); температура плавления ( $T_m$ ); электронная ( $\mu_n$ ) и дырочная ( $\mu_p$ ) подвижности ряда полупроводников.

Процесс создания радиационных повреждений в объеме полупроводникового кристалла (как и конструкционного металла) адронами (нейтроны, протоны, пионы и др.) или высокоэнергетическими лептонами (электроны, позитроны, мюоны) начинается прежде всего с возникновения атома отдачи, т. е. первичного выбитого атома (ПВА) из его узла решетки. При достаточной энергии ПВА создает вторичные (и т. д.) выбитые атомы; в результате в кристаллической решетке образуются междоузельные атомы (например, кремния в кремнии) и вакансии, т. е. дефекты, или пары Френкеля.

Оба типа дефектов могут мигрировать по кристаллической решетке кристалла и создавать комплексные точечные дефекты вместе с атомами примесей, присутствующими в решетке. ПВА может быть выбит,

## Параметры полупроводников

Полупроводник	$E_g$ , эВ (0 К)	$\epsilon_0$	$\epsilon_\infty$	$n$	$T_D$ , К	$T_m$ , К	$\frac{H_{ns}}{cm^2/V \cdot c}$	$\frac{H_{ps}}{cm^2/V \cdot c}$
InSb	0,236	16,8	15,6	—	262	—	78000	750
HgTe	0,302	21	14	—	143	943	33000	—
Ge	0,74	16	16,5	4	374	1210	3800	1820
Si	1,17	11,7	12,7	3,5	645	1690	3000	500
GaAs	1,52	12,9	10,9	3,3	344	1510	8500	420
CdTe	1,6	10,3	7,2	—	200	1371	1200	80
AlSb	1,69	11,6	10,2	—	292	—	200	420
HgI <sub>2</sub>	2,39	8,5–25,9	5,1–6,8	—	—	532	100	—
CdS	2,52	9	5,2	—	250–300	2023	350	15
TlBr	2,64	30,6	5,34	—	290	733	30	4
SiC	2,86	10,2	6,9	—	1200	3073	230	70
C (алмаз)	5,4	5,7	5,7	2,42	2240	4300	1800	1400

если переданная ему энергия выше, чем энергия связи (порядка 20 эВ для Si (табл. 6). Энергия ПВА или другого атома отдачи, возникшего как результат ядерной реакции, может, конечно, быть намного выше. ПВА теряют энергию в двух конкурирующих процессах: ионизации и создания дальнейших вторичных смещений. В конце пути каждого тяжелого иона отдачи неионизирующие взаимодействия преобладают, формируются достаточно плотные скопления дефектов (области разупорядочения или пики смещений). Индивидуальные точечные дефекты, возникающие вдоль пути движения частицы, и скопления дефектов в конце этого пути неодинаково модифицируют электронную структуру полупроводникового детектора. Поэтому деградация свойств полупроводниковых детекторов при облучении  $\gamma$ -квантами и электронами, когда создание каскадов смещений и скоплений дефектов менее вероятно, как правило, происходит по другому сценарию, чем при облучении, например, нейтронами.

Как правило, в первую очередь исследователя интересует деградация электронных свойств материала, которые могут измениться уже при концентрации индуцированных облучением точечных дефектов порядка  $10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , если эти дефекты создают электронные уровни, вызывающие, например, декомпенсацию полупроводника. Механические свойства конструкционных металлов нарушаются при много больших

концентрациях создаваемых точечных дефектов (несколько смещений на атом), поскольку они зависят прежде всего от протяженных дефектов, эволюционирующих и (или) возникающих в процессе облучения (с участием точечных дефектов). В этом смысле у полупроводниковых детекторов много общего с электронными полупроводниковыми приборами. Однако если электронный уровень, создаваемый возникшим точечным дефектом, слабо влияет на электронные свойства полупроводникового материала, то и детектор оказывается нечувствительным к соответствующим повреждениям решетки.

Т а б л и ц а 6

**Энергия смещения  $E_d$  и минимальная энергия  $E_0^{\min}$  электронов и нейтронов (протонов), необходимая для создания дефекта смещения [5]**

Материал	Смещаемый атом	$E_d$ , эВ	$E_0^{\min}$ , кэВ	
			е	n(p)
Ge	Ge	12—20	320—530	0,17—0,29
Si	Si	11—22	115—330	0,18
GaAs	Ga	9,0	230	0,13
	As	9,4	260	0,14
CdTe	Cd	5,6	235	0,13
	Te	7,8	340	0,18
Cd <sub>0,8</sub> Zn <sub>0,2</sub> Te	Cd	5,6	235	0,13
	Te	7,8	340	0,18
С (алмаз)	С	80	530	0,29

Процессы торможения смещенных атомов связаны, как уже говорилось, с ионизацией в материале детектора. Именно ионизация, а точнее создание электрон-дырочных пар, является рабочим процессом в полупроводниковом детекторе. Считается, что в металлах и в таких полупроводниках, как кремний, германий и алмаз, потери на ионизацию не приводят к изменениям в кристаллической решетке. Следовательно, радиационные повреждения в объеме этих материалов зависят исключительно от неионизирующих потерь энергии (NIEL) [6].

Полупроводниковые приборы очень часто подвергаются рентгеновскому и  $\gamma$ -излучению. Радиационные повреждения в этих случаях создаются быстрыми электронами, рождающимися в трех конкурирующих

процессах: при фотопоглощении, комптоновском рассеянии и рождении электрон-позитронных пар. Относительный вклад этих механизмов в полный коэффициент поглощения фотонов для CdTe показан на рис. 5. Полный коэффициент поглощения фотонов для Si приведен на рис. 6. Для некоторых других веществ полный коэффициент поглощения фотонов можно найти в [2].

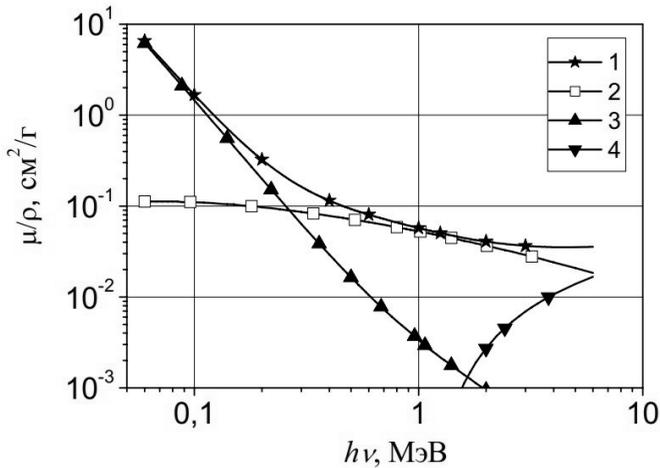


Рис. 5. Вклад разных механизмов в полный коэффициент поглощения фотонов для CdTe в диапазоне 0,06...6 МэВ:

1 – полное поглощение; 2 – комптоновское рассеяние;  
3 – фотоэффект; 4 – образование пар [7]

Если говорить о деградации электрофизических свойств полупроводника под облучением, то прежде всего исследователя интересует, как влияют радиационные дефекты на создание электрон-дырочных пар.

Достаточно часто у исследователей-экспериментаторов и инженеров-разработчиков возникает необходимость сопоставлять (сравнивать) радиационные повреждения, создаваемые излучениями разного рода. На сегодняшний день наиболее изучено радиационное дефектообразование в кремнии. Именно для кремниевых приборов в попытке сопоставления радиационных повреждений, создаваемых различными видами излучения, было введено понятие скейлинга неионизирующих

потерь NIEL и сведение его к повреждениям, создаваемым нейтронами с энергией 1 МэВ.

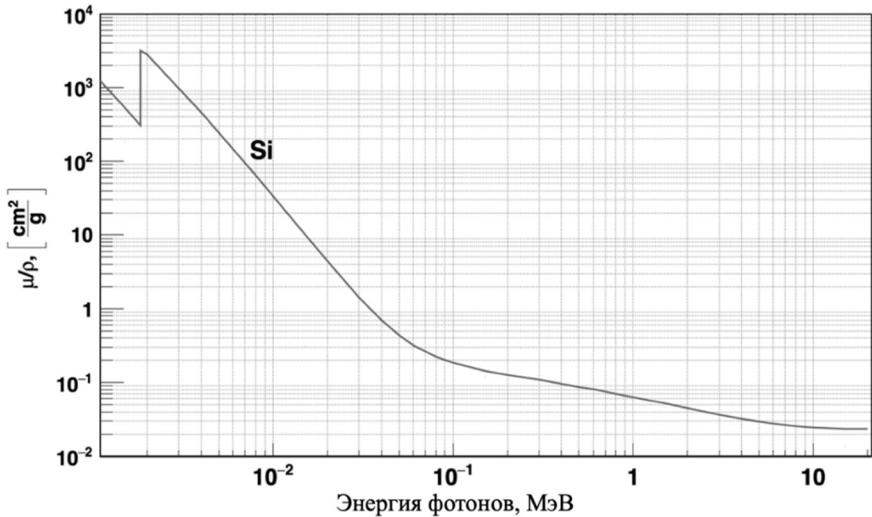


Рис. 6. Полный коэффициент поглощения фотонов в кремнии (Si)

Скейлинг неионизирующих потерь NIEL заключается в определении такого эквивалентного флюенса (интегрального потока) нейтронов с энергией 1 МэВ, который производит те же повреждения, что и данное излучение с его спектральным распределением потока  $\phi(E)$  и интегральным потоком  $\Phi$ :

$$\Phi_{\text{эк}}^{1\text{МэВ}} = k\Phi, \quad (7)$$

где  $k$  – параметр радиационной жесткости – определяется, как

$$k = \frac{EDK}{EDK(1\text{ МэВ})}, \quad (8)$$

где  $EDK = \frac{\int D(E)\phi(E)dE}{\int \phi(E)dE}$ .

Здесь  $EDK$  (или Energy spectrum averaged displacement KERMA) – это усредненное по энергетическому спектру излучения тормозное сечение смещения атомов, или, как его еще называют, функция дефектообразования  $D(E)$ :

$$D(E) = \sum_i \sigma_i(E) \int dE_R f_i(E, E_R) P(E_R), \quad (9)$$

где  $\sigma_i$  – сечение  $i$ -й реакции;  $f(E, E_R)$  – вероятность для падающей частицы с энергией  $E$  выбить атом с энергией  $E_R$  в реакции  $i$ ;  $P(E_R)$  – распределение вероятности (часть энергии выбитого атома, потраченная на смещение).

Если энергия атома больше (или равна) минимальной энергии, необходимой для смещения  $E_d$ , то вероятность распределения  $P(E_R)$  определена как

$$P(E_R) = \frac{E_R}{1 + F_L (3,4008\varepsilon^{1/6} + 0,40244\varepsilon^{3/4})}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon = \frac{E_R}{E_L}$ ,  $E_L = 30,724 Z_R Z_L \sqrt{\left(\sqrt[3]{Z_R^2} + \sqrt[3]{Z_L^2}\right)} \frac{A_R + A_L}{A_L}$ ;

$$F_L = 0,0793 \frac{\sqrt[3]{Z_R^2} \sqrt{Z_L}}{\sqrt[4]{\left(\sqrt[3]{Z_R^2} + \sqrt[3]{Z_L^2}\right)^3}} \frac{\sqrt[3]{(A_R + A_L)^2}}{\sqrt[3]{A_R^2} \sqrt{A_L}} \quad (\text{индекс } R \text{ относится}$$

к выбитому атому, а  $L$  – к атомам решетки;  $Z$  – атомный номер;  $A$  – атомная масса) и  $P(E_R) = 0$ , когда  $E_R < E_d$ .

Функция дефектообразования  $D(E)$  есть, по сути, кинетическая энергия (the Kinetic Energy Released in MATter, KERMA), пошедшая на создание смещений атомов (например, кремния в кремнии) и нормированная на длину пробега частицы и концентрацию рассеивающих атомов. Тормозное сечение смещения в кремнии для нейтронов с энергией 1 МэВ составляет  $EDK(1 \text{ МэВ}) = 95 \text{ МэВ} \cdot \text{мбарн}$  [8]. Функцию распределения и дефектообразования можно найти в [9]. Повреждения, создаваемые нейтронами в твердых телах, возникают в результате их прямых

столкновений с ядрами решетки. В результате могут происходить ядерные реакции и создаваться смещения атомов узлов с возникновением высокоэнергетических атомов отдачи. Эти атомы в последующих упругих и неупругих столкновениях производят как ионизацию и возбуждение атомов в облученном материале, так и дополнительные смещения атомов решетки из их узлов. Для кремния часто принимают  $E_d = 25$  эВ. Если выбиваются атомы кремния в кремнии, то  $Z_R = Z_L = 14$ ,  $A_R = A_L = 28$ , и мы получаем эффективность создания повреждений  $P(E_R)/E_R$ , представленную на рис. 7 [9].

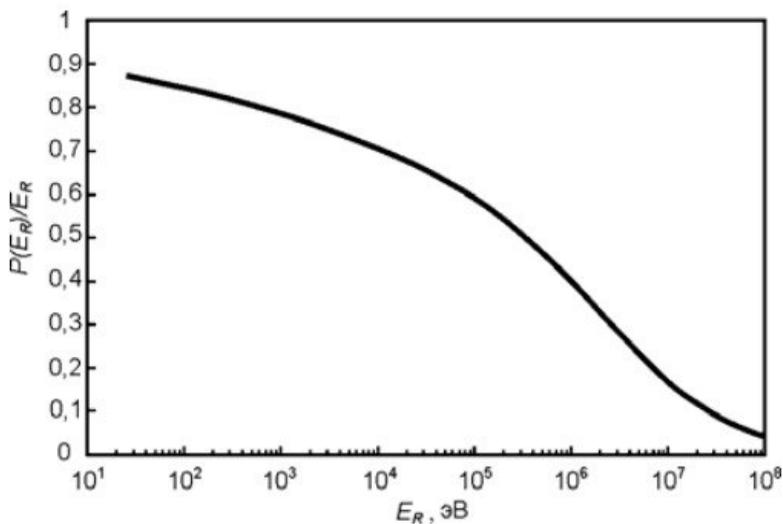


Рис. 7. Эффективность повреждений в кремнии

Таблица значений функции дефектообразования и рецепт для получения эквивалентного флюенса нейтронов с энергией 1 МэВ были стандартизированы (ASTM E722-50) [8]. На рис. 8 представлена функция дефектообразования [6, 10, 11].

Приведем несколько замечаний относительно рис. 8. Минимальная энергия нейтронов, необходимая для создания смещения в кремнии в результате упругого рассеяния, составляет 190 эВ. Однако, как можно

видеть из рис. 8, сечение создания повреждений отлично от нуля при меньших энергиях и растет с уменьшением энергии. Это явление полностью связано с захватом нейтронов ядрами, при котором испускаемые  $\gamma$ -кванты приводят к отдаче ядра с энергией приблизительно 1 кэВ – намного большей, чем энергия смещения, примерно равная 25 эВ.

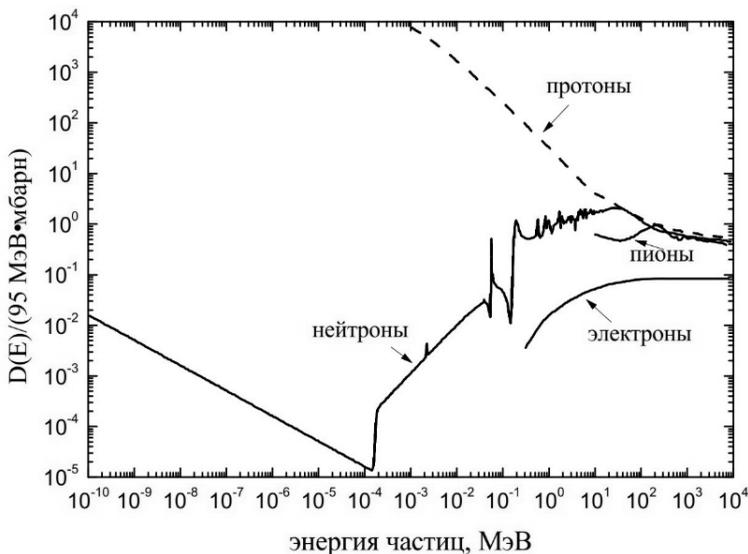


Рис. 8. Оценка функций дефектообразования в кремнии для нейтронов, протонов, пионов и электронов [6, 10, 11]

Для нейтронов с энергиями в диапазоне нескольких мегаэлектрон-вольт число каналов ядерных реакций увеличивается с ростом энергии, что вносит дополнительные вклады в функцию повреждений. До энергий величиной приблизительно 20 МэВ имеются точные и почти полные данные, которые используются как надежный источник для расчета радиационных повреждений [12]. При более высоких энергиях приходится применять теоретические подходы [13].

Функция повреждения для протона обусловлена доминированием кулоновского взаимодействия при низких энергиях, поэтому она намного больше, чем для нейтронов [14]. При очень высоких энергиях в диапазоне гигаэлектронвольт обе функции повреждения стремятся

к одинаковому значению. Здесь роль кулоновского взаимодействия становится незначительной, а ядерные реакции практически одинаковы для нейтронов и протонов.

Взаимодействие пионов с веществом в значительной степени обусловлено  $\delta$ -резонансом в окрестности нескольких *сотен* мегаэлектрон-вольт, но в высокоэнергетическом пределе функция повреждения стремится приблизительно к 2/3 (весовой фактор кварков) от функции повреждений протонов [15].

Таким образом, эффективность создания повреждений  $D_{\text{эфф}}$  любым данным источником частиц со своим энергетическим распределением плотности потока  $\phi(E)$  может быть получена с использованием соответствующей функции дефектообразования  $D(E)$  и пересчитана на эквивалентную плотность потока нейтронов с энергией 1 МэВ с помощью характерного для данного источника коэффициента повреждаемости  $k$  (hardness factor):

$$D_{\text{эфф}} = \int D(E)\phi(E) dE = D_{\text{нейтрон}}(1 \text{ МэВ})\Phi_{\text{эк}}^{\text{1МэВ}}; \quad (11)$$

$$\Phi_{\text{эк}}^{\text{1МэВ}} = k\Phi_{\text{общ}} = k\int \phi(E) dE; \quad (12)$$

$$k = \frac{\int D(E)\phi(E) dE}{D_{\text{нейтрон}}(1 \text{ МэВ})\int \phi(E) dE}. \quad (13)$$

Для любого надежного сравнения экспериментов по облучению, проведенных с различными источниками, важно точно знать их распределения по энергиям. Иногда эти данные могут быть получены только вычислениями по методу Монте-Карло, что привносит дополнительные погрешности.

На самом деле радиационные повреждения зависят не только от интегральной величины NIEL, в которой просуммированы все каналы реакций с соответствующими энергетическими распределениями ядер отдачи с учетом функции дефектообразования. Они могут также зависеть от особенностей передачи энергии, которые не учтены в расчетах по NIEL.

Было обнаружено [16], что расчет по NIEL завышает уровень радиационных повреждений от высокоэнергетических протонов и пионов в кремнии, легированном кислородом для повышения его радиационной стойкости. Кроме того, оказалось, что электроны с энергией 1,8 МэВ производят в 40 раз меньше повреждений, чем следовало бы по гипотезе NIEL. Причина последнего расхождения кроется, видимо, в неучете в NIEL мгновенного отжига создаваемых дефектов смещения, который по-разному протекает при облучении тяжелыми адронами и легкими электронами. Кроме того, при облучении адронами возникают скопления дефектов, влияющих на электронные свойства полупроводника во все не так, как отдельно расположенные точечные дефекты смещения.

Необходимо также помнить, что в окончательном распределении дефектов, кроме непосредственного создания повреждений в полупроводнике радиацией, огромную роль играет длительный отжиг.

Несмотря на большой накопленный экспериментальный и теоретический опыт, для точных прогнозов работоспособности полупроводниковых приборов предпочтительнее проводить испытания в условиях, максимально приближенных к ожидаемым режимам эксплуатации.

## 4. ЗАДАЧИ

1. Определить эквивалентную дозу, получаемую агрономом за 12 часов работы в поле, если основным источником радиации считать космические лучи.

2. Сравнить дозу радиации, полученную пассажиром трансатлантического перелета туда и обратно, если в одну сторону он летел на обычном самолете, а в другую – на сверхзвуковом.

3. Оценить эквивалентную дозу радиации, которая может быть получена человеком при сбросе протонного пучка в протонном синхротроне PS (CERN) с энергией 5 ГэВ, если количество частиц в банче  $10^9$ .

4. Оценить эквивалентную дозу радиации, которая может быть получена человеком при сбросе электронного пучка в синхротроне ВЭПП-4М (ИЯФ), работающем на энергии ипсилон-мезона, если количество частиц в банче  $10^9$ .

5. Известно, что интенсивность космических лучей на высоте 12 км превосходит в 25 раз их интенсивность на уровне моря. Оценить, как будет отличаться эквивалентная доза за год у жителя 5-го и 25-го этажей.

6. Толщина обедненной зоны кремневого полупроводникового детектора составляет  $0,3 \text{ мг/см}^2$ . Какова минимальная энергия  $\alpha$ -частиц, которые могут быть зарегистрированы таким детектором? Считать, что частица регистрируется, если ее пробег больше толщины обедненной зоны.

7. Рассчитать, какой должна быть минимальная энергия  $\alpha$ -частиц, чтобы их можно было зарегистрировать счетчиком, имеющим окно из стали толщиной  $6 \text{ мг/см}^2$ .

8. Оценить эквивалентную плотность потока нейтронов с энергией 1 МэВ в кремнии (Si) для монохроматического источника нейтронов с энергией 100 кэВ и плотностью потока  $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ .

9. Оценить, во сколько раз нужно больше  $\gamma$ -квантов с  $E_\gamma = 1 \text{ МэВ}$  чем нейтронов с энергией 1 МэВ для эквивалентного дефектообразования в кремнии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Онучин А. П.* Экспериментальные методы ядерной физики / А. П. Онучин. – Изд-во НГТУ, 2010. – URL: <http://kedr.inp.nsk.su/~alexbar/onuchin-last.pdf> (дата обращения: 15.12.2023).
2. *Барняков А. Ю.* Прохождение частиц через вещество. Задачи : учеб. пособие / А. Ю. Барняков, А. А. Катцин, А. П. Онучин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2023. – 67 с.
3. *Юдович Я. Э.* Элементы-примеси в ископаемых углях / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис, А. В. Мерц. – Ленинград : Наука, 1985. – 239 с.
4. Авторское свидетельство СССР № 934402. Способ измерения флюенса быстрых нейтронов : опубликовано 07.06.1982 / В. И. Кульгавчук. – БИ № 21.
5. *Corbett J. W.* Defect creation in semiconductors / J. W. Corbett, J. C. Bourgoin // Point defects in solids. V. 2: Semiconductors and molecular crystals / ed. J. H. Crawford, L. M. Slifkin. – New York ; London: Plenum Press, 1975. – P. 1–161.
6. *Lindstm G.* Radiation hardness of silicon detectors – a challenge from high-energy physics / G. Lindstm, M. Moll, E. Fretwurst // Nucl. Instr. and Meth. A. – 1999, vol. 426. – P. 1–15.
7. XCOM: Photon cross sections on a personal computer / M. J. Berger, J. H. Hubbell et al. / NBSIR 87-3597. – 1987. – URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html> (accessed: 15.12.2023).
8. ASTM E722-93. Standard practice for characterizing neutron fluence spectra in terms of equivalent monoenergetic neutron fluence for radiation hardness testing of electronics // American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards 1993.
9. *Vasilescu A.* The NIEL scaling hypothesis applied to neutron spectra of irradiation facilities and in the ATLAS and CMS SCT and the irradiation facilities used for damage tests / A. Vasilescu // ROSE/TN/97-2. – 1997. – 21 p.
10. *Vasilescu A.* Overview on the radiation environment in ATLAS and CMS SCT and irradiation facilities used for damage tests / A. Vasilescu // ROSE/TN/97-3. – 1997. – 16 p.

11. *Vasilescu A.* Fluence normalization based on the NIEL scaling hypothesis / A. Vasilescu // 3rd ROSE Workshop on Radiation Hardening of Silicon Detectors, 12–14 February 1998: DESY-PROCEEDINGS-1998-02. – DESY Hamburg, 1998.
12. SNLRML recommended dosimetry cross section compendium / P. J. Griffin, J. G. Kelly, T. F. Luera, J. VanDenburg / SAND92-0094. – SANDIA Natl. Lab, 1993.
13. *Konobeyev A. Yu.* Neutron displacement cross-sections for structural materials below 800 MeV / A. Yu. Konobeyev, Yu. A. Korovin, V. N. Sosnin // Journ. Nucl. Mater. – 1992, vol. 186. – P. 117–130.
14. Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and photon radiation / G. P. Summers, E. A. Burke, P. Shapiro, S. R. Messenger, R. J. Walters // IEEE. Nucl. Sci. – 1993, vol. 40. – P. 1372–1379.
15. *Huhtinen M.* Pion induced displacement damage in silicon devices / M. Huhtinen, P. A. Aarnio // Nucl. Instr. and Meth. A. – 1993, vol. 335. – P. 580–582.
16. *Lemeilleur F.* Thrid RD48 Status Report, CERN-LHCC-2000-009 / F. Lemeilleur, G. Lindstrom, S. Watts // RD48 Collaboration. – 1999. – 42 p.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Виды радиации.....	5
2. Механизм воздействия радиации на человека и предельно допустимые дозы облучения.....	13
2.1. Основные характеристики ионизирующих излучений.....	13
2.2. Нормативы и предельно допустимые дозы .....	16
3. Воздействие радиации на материалы.....	19
3.1. Взаимодействие радиационного излучения с полупроводниками.....	20
3.2. Влияние радиации на электрофизические параметры полупроводников .....	23
3.3. Радиационная стойкость полупроводниковых приборов.....	25
4. Задачи.....	36
Библиографический список .....	34

**Барняков Александр Юрьевич  
Катцин Александр Андреевич**

**РАДИАЦИЯ: ВИДЫ РАДИАЦИИ, ИСТОЧНИКИ И ДОЗЫ**

**Учебно-методическое пособие**

Редактор *Е.Е. Татарникова*  
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*  
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*  
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*  
Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

---

Подписано в печать 23.01.2024. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.  
Уч.-изд. л. 2,32. Печ. л. 2,5. Изд. № 255/23. Заказ № 58. Цена договорная

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20