

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛУПРОВОДНИКИ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПЛЁНКИ

В данной статье приведены сведения о влиянии ионизирующего излучения на полупроводники и полупроводниковые плёнки, где перечислены важнейшие экспериментально установленные положения, лежащие в основе радиационной физики твердого тела, рассмотрены общие вопросы влияния проникающей радиации на полупроводники, непосредственная передача энергии атомам вещества и проанализированы виды излучений.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, плёнки, физика, твердое тело, радиация, кремний, германий, гамма-излучения, нейтроны.

Влияние проникающей радиации на свойства полупроводниковых материалов и приборов интенсивно изучается на протяжении последних трех десятилетий с целью выяснения причин отказов полупроводниковых приборов, работающих в зоне радиации [1; 2].

Перечислим важнейшие экспериментально установленные положения, лежащие в основе радиационной физики твердого тела [1].

1. Все виды ионизирующих излучений с энергией частиц, превышающей пороговую для данного материала, приводят к появлению в кристаллической решетке радиационных дефектов. Первичные радиационные дефекты при облучении частицами с умеренной энергией (до нескольких мегаэлектрон вольт) представляют собой пары Френкеля.

При больших энергиях частиц, кроме пар Френкеля, образуются каскады смещений, разупорядоченные области, тепловые вспышки, дислокационные петли и другие дефекты.

2. Взаимодействие первичных радиационных дефектов друг с другом и иными дефектами структуры приводит к появлению более сложных вторичных дефектов. Процесс образования комплексов проходит особенно интенсивно на начальных стадиях облучения, пока стоки для вакансий и междоузельных атомов не насыщены.

3. Большая часть точечных радиационных дефектов может быть устранена посредством отжига. Необходимая температура отжига зависит от типа дефектов, энергии связи атомов в решетке и энергии миграции собственных точечных дефектов.

4. Характер вторичных радиационных дефектов зависит от свойств облучаемого вещества, вида радиации и частиц, а также условий облучения, определяющих процессы взаимодействия первичных дефектов.

При взаимодействии с полупроводниками часть энергии высокоэнергичных излучений и частиц идет на возбуждение связанных электронов [3]. Вычисление величины ионизационных потерь и пробега частиц является важной задачей для изучения многих процессов при прохождении излучений через вещество [4]. Влияние ионизационных потерь непосредственно на те электроны вещества, которым передается эта энергия, учитывается введением в формулы для вычисления удельных потерь энергии $(-\frac{dE}{dx})$ так называемой «средней энергии возбуждения электронов».

В ряде случаев важно знать пространственное распределение ионизации и характер пробега частиц. При прохождении тяжелых частиц можно считать, что направление движения частицы сохраняется почти неизменным до тех пор, пока преобладают ионизационные потери. В этом случае учитывают передачу энергии вторичным электронам, которые в свою очередь могут вызывать ионизацию сравнительно далеко от области траектории. В случае прохождения моноэнергетических электронов на распределение ионизации главным образом влияет рассеяние электронов атомами материала и среднее значение потерь ионизации вдоль первоначального направления и кремния, имеется методика и вычислено распределение ионизации для различных энергий. Экспериментальные данные для германия достаточно хорошо согласуются с теоретическими расчетами [5]. Ионизационные эффекты могут обуславливать дефекты решетки. Кроме потерь на ионизацию часть энергии переходит в тормозное электромагнитное излучение, которое начинает играть существенную роль, начиная с некоторого порогового значения.

Непосредственная передача энергии атомам вещества приводит к структурным нарушениям решетки – радиационным дефектам (РД). При рассмотрении теории радиационных нарушений предполагают, что простейшим видом дефекта являются вакансии и атомы в междузелье кристаллической решетки (точечные дефекты Френкеля). Вторым предположением является представление о существовании пороговой энергии образования дефекта E_d . Вычисление величины E_d является важной задачей многих экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия излучений с веществом. В качестве вероятного значения E_d для кристаллов с энергией связи атомов около 10эВ принимают значение 25 эВ [6].

В случае бомбардировки электронами вероятность смещения атомов мала. При бомбардировке тяжелыми частицами упругие столкновения начинают играть существенную роль, начиная с некоторого значения кинетической энергии частиц [7], определяемой формулой:

$$E_i = \frac{Eg}{8} * \frac{M_A}{m}, \quad (1)$$

где M_A – масса атома вещества;
 m – масса частицы;
 E_g – ширина запрещенной зоны.

Виды излучений

1. *Электроны.* При рассеянии электронов кинетическую энергию атома после столкновения можно определить из выражения

$$E_A = E_{Amax} \cos^2 \Theta_A, \quad (2)$$

где Θ_A – угол между направлением движения электрона и направлением после столкновения;
 E_{Amax} – максимальная энергия, передаваемая атомам вещества. Угловое распределение атомов после рассеяния определяется следующим образом:

$$\delta \Theta_A = 4\delta_0 \frac{\beta(\cos \Theta_A)}{\cos^3 \Theta_A}, \quad (3)$$

где $\delta(\Theta_A)$ – поперечное сечение, характеризующее вероятность направления движения электрона.

$$\delta_0 = \left(\frac{Zg}{2mc^2}\right)^2 * \frac{1-\beta}{\beta} \quad (4)$$

Z – заряд ядра;

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Из анализа рассеяния электронов можно заключить, что имеется тенденция к передаче импульса под большим углом к направлению падения электрона. С ростом энергии электронов большая часть столкновений группируется к углу $\Theta_A = \frac{\pi}{2}$. Учет распределения по энергиям показывает, что подавляющее число дефектов возникает при столкновениях с энергией не больше, чем 50-70 эВ.

Для расчета концентрации дефектов N_d подсчитывают поперечное сечение $\sum d$, характеризующее вероятность возникновения дефектов. При этом исходят из допущений, что пороговая энергия смещения атома E в междузелье не зависит от направления импульса атома, и что на каждый акт рассеяния возникает один дефект Френкеля:

$$N_d = \sum d(E) \Phi N,$$

где Φ – интегральный поток электронов на 1 см^2 ;

N – число атомов в 1 см^2 .

Теоретически можно показать, что функция $\sum d(E)$ в случае кристалла, состоящего из одинаковых атомов, определяется параметром E_d .

При расчете полного числа смещенных атомов N^+ необходимо учитывать, что в случае, когда энергия первично смещенного атома $E > 2E_d$, возникают вторичные и другие дефекты. Тогда полное число дефектов согласно каскадной теории $V = \frac{EA}{2E_d}$.

Теория рассеяния электронов хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Точность совпадения превышает 1%. Поэтому механизм первичной передачи энергии быстрыми электронами атомам решетки можно считать вполне исследованным.

2. *Гамма-излучения.* Электромагнитные излучения высоких энергий, взаимодействуя с полупроводниками, также вызывают появление дефектов структуры «точечного типа». Но вероятность возникновения дефекта при непосредственном действии гамма-кванта ничтожно мала. Дефекты в основном возникают в результате действия на кристалл быстрых электронов, возникающих в результате фотоэффекта и эффекта Комптона, а также образования при больших энергиях гамма-квантов, пар электронов и позитронов. В результате воздействия гамма-излучений можно описать методами, указанными выше для быстрых электронов и легких частиц.

3. *Быстрые нейтроны.* Основным механизмом взаимодействия быстрых нейтронов и тяжелых частиц с твердыми телами является упругое рассеяние. С учетом характера рассеяния для нейтронов среднюю энергию рассеяния можно определить из выражения:

$$E_A = \frac{4}{A} \left(1 + \frac{1}{A}\right)^{-2},$$

где A – атомный вес.

Предполагается, что нейтроны рассеиваются изотропно. В действительности с ростом энергии предпочтительным становится рассеяние вперед. В связи с этим вводится поправочный коэффициент f [8]. В реальных процессах в результате каскадов упругих столкновений образуются вторичные дефекты структуры, вследствие чего полное число смещений атомов значительно превышает число актов рассеяния. Помимо выбивания атомов в междузелье возможно перемещение дефекта в объеме кристалла. Кроме того, акт первичной передачи энергии атомом можно представить как быстрый нагрев ограниченного объема до высокой температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрлик Ю.А., Хазан Л.С. Пластическая деформация и дислокации не соответствия в гетерозепитаксальных системах. – Киев: Науко ва думка, 1993.
2. Coates R., Mitchell E.W. // Adv. Phys. – 1975. – V. 90. – P. 593.
3. Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. – М.: Физматгиз, 1963.
4. Экспериментальная ядерная физика / под. ред. Э. Сегре. – Т. 1. – М., 1966. – С. 143–291.
5. Бул Б.М., Вавилов В.С. [и др.]. Атомная энергия. – 1977. – Т. 2. – С. 533.
6. Действие излучений на полупроводники и изоляторы: сб. / под ред. С. М. Рывкина. – М.: ил, 1954. – С. 9.
7. Характеристические потери энергии электронами: сб. / под ред. А. Р. Шульмана. – М.: ил., 1959.
8. Динс Дж., Виньярд Дж. Радиационные эффекты в твёрдых телах. – М.: ил., 1960.

Nishonova M.M.

Kipchakova G.M.

Ferghana Polytechnic Institute
Uzbekistan, Ferghana

EFFECT OF IONIZING RADIATION ON SEMICONDUCTORS AND SEMICONDUCTOR FILMS

This article provides information about the effect of ionizing radiation on semiconductors and semiconductor films, which lists the most important experimentally established positions that underlie solid state radiation physics, discusses general issues related to the effect of penetrating radiation on semiconductors, direct energy transfer to matter atoms, and analyzes the types of radiation.

Key words: *ionizing radiation, films, physics, solid body, radiation, silicon, germanium, gamma radiation, neutrons.*