

ПОРОГОВАЯ ЭНЕРГИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

П.В.Кучинский

НИИ прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко,
220106, Республика Беларусь, Минск, ул.Курчатова 7

В соответствии с современными теоретическими представлениями экспериментально определяемая величина пороговой энергии образования первичных смещений E_d определяется произведением вероятности смещения выбитого атома на сечение образования смещений, и не является "чистой" энергией необходимой для разрыва связей в решетке. В этом случае экспериментально определяемая величина E_d зависит от примесного состава и уровня легирования кремния. Уменьшение эффективности аннигиляции первичных радиационных дефектов с ростом уровня легирования кремния приводит к уменьшению величины E_d . Отсутствие аннигиляции в сильно легированном кремнии дает возможность оценить величину пороговой энергии, необходимую только для разрыва связей атомов. Оценки, проведенные в работе, дают величину $E_d = 11 \div 13$ эВ.

1. Введение

Процесс генерации первичных радиационных дефектов (РД) в кристалле определяется видом и энергией бомбардирующих частиц, а также свойствами самого кристалла (структурой, ориентацией, температурой, уровнем ионизации и др.). Если первая часть проблемы достаточно хорошо изучена и по ней имеется обширная литература [1-7], то учет реальных свойств кристалла в процессах генерации дефектов представляет значительную трудность. Об этом свидетельствует тот факт, что в таком достаточно изученном кристалле как кремний диапазон экспериментальных значений пороговой энергии образования дефектов E_d лежит от 11 до 60 эВ [2,8].

2. Основная часть

Пороговая энергия образования первичных дефектов является одной из фундаментальных величин при описании процессов радиационного дефектообразования. Величина E_d определяет минимальную энергию, которую надо передать атому решетки, чтобы он оказался в ближайшей междоузельной позиции. Значение этой энергии складывается из энергии необходимой для разрыва связей атома и энергии необходимой для перевода его в ближайшее междоузелье.

Описывая связи атома в решетке, обычно предполагают потенциал атома в узле в виде изотропной прямоугольной ямы [1,5]. Такое приближение приводит к виду вероятности образования дефекта $W(T)$ в виде прямоугольной ступеньки: вероятность изменяется от 0 до 1 при величине энергии атома равной пороговой E_d , т.е.

$$\begin{aligned} W=0, T < E_d \\ W=1, T > E_d \end{aligned} \quad (1)$$

где T - энергия передаваемая атому при упругом столкновении.

Величина E_d , определяемая экспериментально, рассчитывается по значению энергии бомбардирующих частиц, при которой наблюдается введение дефектов. Так, при облучении электронами с энергией E сечение образования дефекта дается выражением [5]

$$\sigma_d(E) = \int_0^{T_m} W(T) \cdot d\sigma_T(E, T), \quad (2)$$

где $\sigma_T(E, T)$ - сечение упругого рассеяния электрона с энергией E на атоме,

T - максимальная энергия, передаваемая атому.

В резерфордском приближении с учетом (1) для сечения образования дефекта получено [1]:

$$\sigma_d(E) = \sigma_0(E) \cdot \left[\frac{T_m(E)}{E_d} - 1 \right] \quad (3)$$

По энергетической зависимости $\sigma_d(E)$ определяют величину E_d $\sigma_d(E)=0$ при $E_d = T_m(E)$. Однако, если полученное таким образом значение E_d использовать при вычислении сечения в высокоэнергетической области бомбардирующих электронов, то оно оказывается почти на порядок выше экспериментального [8,9]. Авторы работы [8] указанное расхождение видят в том, что для основной массы атомов величина E_d существенно выше 15-20 эВ, обычно определяемой из экспериментов по низкоэнергетическому облучению электронами. По их мнению, величина пороговой энергии для кремния составляет 60 эВ. Авторы указанной работы предполагают, что необходимость использования тонких образцов в экспериментах по определению E_d приводит к заметному влиянию на величину пороговой энергии слабо связанных атомов на поверхности.

В ряде работ, для того чтобы добиться лучшего согласия с экспериментом, использовалась более сложная функция вероятности образования первичных дефектов [1].

С другой стороны, вероятность образования дефекта отлична от нуля при любой передаваемой энергии. В работе [9], сделан отход от использовавшихся феноменологических условных функций вероятности смещения и проведен расчет процесса смещения атомных столкновений. Таким образом, чтобы получить следующее выражение для сечения дефектообразования

$$\sigma_d(E) = \sigma_0(E) \cdot \left[\frac{T_m(E)}{E_d} - q \right] \quad (4)$$

Для случая облучения электронами для параметра q получено значение 0.5. В этом случае полученное в низкоэнергетических экспериментах значение пороговой энергии равно qE_d . Причем, при облучении высокоэнергетическими электронами $q \rightarrow 1$ и, соответственно, выражение (4) совпадает с выражением (3) для сечения дефектообразования в случае прямоугольной потенциальной ямы.

На сегодняшний день установлено, что накопление стабильных дефектов в кремнии с малым уровнем легирования определяется процессами захвата вакансий и междоузельных атомов примесью, т.е. вторичными процессами [2,3]. При этом, более 96 % первичных дефектов уходят на стоки или аннигилируют. Как правило, экспериментальное определение пороговой энергии проводят с использованием образцов с уровнем легирования $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В этом случае, как видно из (2) пороговая энергия E_d отражает энергетическую зависимость произведения вероятности смещения выбитого атома на сечение образования смещений. В этом случае, экспериментально измеряемое значение E_d существенным образом зависит от примесного состава материала и превышает энергию необходимую для разрыва связей атома с решеткой.

С ростом уровня легирования кремния, доля аннигилировавших первичных дефектов уменьшается и, соответственно, уменьшается роль вторичных процессов. Следствие этого, можно ожидать уменьшения экспериментально определяемой величины E_d . В случае отсутствия аннигиляции первичных радиационных дефектов, величина пороговой энергии должна стремиться к величине энергии необходимой для разрыва связей атома кремния в решетке.

Практически отсутствие аннигиляции в сильно легированном кремнии позволяет записать

$$\frac{dn}{d\Phi} \left(\frac{dp}{d\Phi} \right) = \frac{dN_d}{d\Phi} \quad (5)$$

С другой стороны эффективность введения смещений

$$\frac{dN_d}{d\Phi} = N_0 \cdot \sigma_d(E, E_d) \cdot \bar{\gamma}(E, E_d), \quad (6)$$

где N_0 - концентрация атомов в единице объема, $\bar{\gamma}(E, E_d)$ - коэффициент учитывающий каскадный характер смещений.

В рамках ударного механизма дефектообразования при ступенчатой функции вероятности смещений для $\bar{\gamma}(E, E_d)$ получено [7]:

$$\bar{\gamma}(E, E_d) = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_m}{T - E} \cdot \left(1 + \ln \frac{T_m}{2E_d} \right), \quad (7)$$

Зависимости (5), (6) с учетом данных величины предельной скорости удаления носителя в сильно легированном p - и r -кремнии [10,11] позволяют рассчитать величину пороговой энергии, значения которой представлены в таблице. Как видно из таблицы, эти величины существенно меньше значений пороговой энергии полученных из экспериментов по низкоэнергетическому электронному облучению. Наряду с тем, что в сильно легированном кремнии величина пороговой энергии определяется только энергией необходимой для разрыва связей, уменьшение ее может быть обусловлено и рядом других причин.

Пороговая энергия образования первичных РД.

Энергия электронов МэВ	Тип проводимости кремния	Пороговая энергия, E_d , эВ
2.0 /10/	p -Si (B)	13
4.5 /11/	p -Si (B)	11
4.5 /11/	n -Si (P)	12

Как видно из таблицы, эти величины существенно меньше значений пороговой энергии полученных из экспериментов по низкоэнергетическому электронному облучению. Наряду с тем, что в сильно легированном кремнии величина пороговой энергии определяется только энергией необходимой для разрыва связей, уменьшение ее может быть обусловлено и рядом других причин.

Так, наряду с ударным механизмом образования смещений, примесно-ионизационный не имеет порога. Поэтому, если в сильно легированном кремнии этот механизм образования первичных РД эффективен, расчетное значение E_d в соответствии с выше приведенными зависимостями будет занижено. Однако, практически, одинаковые концентрационные зависимости скорости удаления носителей в p - и r -сильно легированном кремнии и экспериментально наблюдаемое насыщение эффективности дефектообразования при уровнях легирования $10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$ позволяют исключить примесно-ионизационный механизм образования первичных РД в кремнии.

В работе [8] обсуждается вопрос влияния поверхностных слабо связанных атомов на величину пороговой энергии. Однако, предположение влияния этого механизма приводит к тому, что в сильнолегированных образцах кремния такие атомы составляют ~90 %. В этом случае, полученная величина пороговой энергии отражает свойство самого материала.

3. Заключение

Проведен анализ зависимости пороговой энергии образования первичных дефектов в кремнии от уровня легирования. Показано, что в соответствии с современными представлениями экспериментально определяемая пороговая энергия образования первичных РД в кремнии является "чистой" энергией необходимой для разрыва связей в решетке кремния. Состав и уровень легирования кремния.

легирования кремния должно приводить к уменьшению величины E_d . Отсутствие аннигиляции в сильно легированном кремнии дает возможность оценить величину пороговой энергии, необходимую только для разрыва связей атомов. Оценки, проведенные в работе, дают величину $E_d = 11 \div 13$ эВ.

Таким образом, изучение дефектообразования в сильно легированном кремнии позволяет предложить метод определения пороговой энергии. При этом величина определяемой пороговой энергии задается лишь энергией необходимой для разрыва связей атома в решетке.

Список литературы

- 1 Корбетт Дж., Бургузн Ж. Дефектообразование в полупроводниках. // Точечные дефекты в твердых телах. М., Мир, 1979, С.379.
- 2 Смирнов Л.С. Физические процессы в облученных полупроводниках. // Н., Наука, 1977, С.260.

3. Емцев В.В., Машовец Т.В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. // М., Радио и связь, 1977, С.247.
4. Бургузн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. // М., Мир, 1985, С.301.
5. Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. Радиационная физика полупроводников. // К., Наук. Думка, 1979, С.332.
6. Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.А., Вавилов В.А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. // Мн., Наука и техника, 1986, С.254.
7. Вавилов В.А., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. // М., Атомиздат, 1069, С.311.
8. Витовский Н.А., Мустафулов Д., Чекмарева А.П. // ФТП, 1977, Т.11, В.9, С.1747-1753.
9. Винецкий В.Л., Ентинзон И.Р., Холодарь Г.А. // ФТП, 1979, Т.13, В.5, С.912-918.
10. Bean A.R., Morrison S.R., Newman R.C., Smith R.S. // J. Phys. C: Solid State Phys., 1972, V.5, N.4, P.379-400.
11. Hill D.E. // Phys. Rev., 1959, V.114, N.6, P. 1414-1420.

THRESHOLD ENERGY OF FORMATION OF PRIMERY DEFECTS IN SILICON

P.V.Kuchinski

*A.N.Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Kurchatov str. 7, 220064 Minsk, Belarus.
Tel. 277 59 45*

In according with modern theoretical conceptions experimentally detected threshold energy of formation of primary displacement E_d is multiple of the displacement probability of knocked-on atom and cross section of displacement formation and it is not "clear" energy which necessary for break of bindings in a lattice. In this case experimentally detected E_d depends from impurity composition and doping level of silicon. Decrease of effectiveness of annihilation of prime radiation defects at increase of doping level of silicon leads to decrease of E_d . An absence of annihilation in high doped silicon gives possibility to estimate quantity of threshold energy which necessary for break of bindings of atoms only. This quantity is $E_d = 11 - 13$ eV.

