

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ И КОМПЕНСИРУЮЩИЕ ДЕФЕКТЫ В *n*-Si ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ОДИНОЧНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ЭЛЕКТРОНОВ БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Крайчинский А. Н., Мизрухин Л. В., Осташко Н. И.,
Шаховцов В. И.

Исследована зависимость эффективности введения дефектов (ЭВД) в *n*-Si от интенсивности электронного потока. Установлено, что ЭВД как рекомбинационного, так и компенсирующего типа растет с ростом интенсивности облучения. С использованием ранее предложенной модели кулоновского взаимодействия противоположно заряженных вакансий и междоузельного атома, а также экспериментальной зависимости ЭВД от интенсивности облучения получен аналитический вид функции распределения генетических пар Френкеля, созданных облучением, по расстояниям между вакансией и междоузельным атомом. При используемой энергии электронов (3 МэВ) функция распределения экспоненциально спадает с ростом расстояний между вакансией и междоузельным атомом в диапазоне 30–55 Å.

Эффективность введения дефектов (ЭВД)¹ в ковалентных полупроводниках может изменяться в достаточно широких пределах и зависит от таких факторов, как степень легирования кристалла, наличие сопутствующих примесей, от температуры, при которой проводится облучение, интенсивности облучения и др. Авторы ряда работ (см., например, [1, 2]), считают, что ЭВД определяется этапом взаимодействия созданных облучением вакансий (*V*) и междоузельных атомов (*I*) с имеющимися в кристалле примесными атомами и другими технологическими дефектами, именуемыми стоками. При изменении условий облучения число генерируемых *V* и *I* остается постоянным и изменяется лишь вероятность образования конкретных типов радиационных дефектов из-за изменения зарядовых состояний реагентов, а также за счет изменения доли *V* и *I*, ушедших на стоки. В то же время выполнен ряд экспериментов по зависимости ЭВД от интенсивности облучения I_e [3–6], которые позволяют предположить, что ЭВД определяется эффективностью аннигиляции генетических пар Френкеля, т. е. *V* и *I*, созданных из одного узла кристаллической решетки. При этом в образовании стабильных радиационных дефектов, регистрируемых в эксперименте, участвуют только компоненты (*V* и *I*) распавшихся пар Френкеля. Для выяснения причин изменения ЭВД с ростом I_e целесообразно дальнейшее изучение обсуждаемых вопросов.

В работе исследовался кремний *n*-типа, выращенный методом Чохральского, с концентрацией фосфора $(8.9 \pm 0.2) \cdot 10^{13}$ см⁻³, концентрацией кислорода, определенной по ИК поглощению, $\sim 7 \cdot 10^{17}$ см⁻³, степенью компенсации ≤ 0.13 . Облучение проводилось одиночными импульсами электронов со средней энергией 3 МэВ. Интенсивность потока электронов в импульсе варьировалась от $2 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{18}$ эл./см²·с. Облучение проводилось при комнатной температуре. Максимальный нагрев образца за время действия импульса облучения ($\tau_n = 3$ мкс), оцененный по формуле

$$\Delta T = \frac{\tau_n I_e}{kN} \frac{dE}{dx} \quad (1)$$

¹ ЭВД — число стабильных при температуре облучения радиационных дефектов, приходящихся на одну высокоэнергетическую частицу.

(где dE/dx — ионизационные потери электронов, N — концентрация атомов в кристалле, k — постоянная Больцмана), не превышал нескольких градусов. Толщина кристаллов была значительно меньше длины полного свободного пробега быстрых электронов, что позволяло проводить однородную по толщине ионизацию кристаллов. Измерялись температурные зависимости эффекта Холла в интервале $20 \div 300$ К и времени жизни неравновесных носителей заряда в интервале $200 \div 430$ К. ЭВД определялась на начальных участках их дозовых зависимостей. Время жизни определялось по спаду фотопроводимости.

На рис. 1 приведены температурные зависимости постоянной линейной рекомбинации $\tau T^{-3/2} = f(1/T)$ для образцов, облученных одиночными импульсами электронов с интенсивностью $3 \cdot 10^{15}$ (кривая 1) и $3.7 \cdot 10^{17}$ эл/см²·с (кривая 2). Доза облучения выбиралась такой, чтобы абсолютные изменения τ при комнатной температуре были одинаковыми. Видно, что ход температурных зависимостей идентичен, хотя интенсивности облучения различались более чем на 2 порядка. Это свидетельствует о том, что при облучении кремния различными

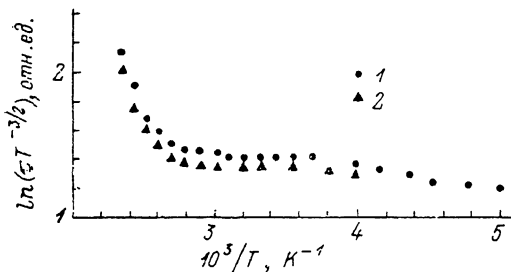


Рис. 1. Зависимость постоянной линейной рекомбинации $\tau T^{-3/2}$ от температуры после облучения одиночными импульсами электронов.

Интенсивность импульсов, эл/см²·с: 1 — $3 \cdot 10^{15}$, 2 — $3.7 \cdot 10^{17}$.

интенсивностями вводятся одни и те же рекомбинационные дефекты. При этом ЭВД растет с ростом интенсивности.

Из измерений температурной зависимости эффекта Холла следует, что ЭВД компенсирующего типа также растет с ростом интенсивности облучения. Концентрация введенных облучением А-центров пропорциональна общему изменению концентрации равновесных носителей заряда.

На рис. 2 приведена зависимость ЭВД от интенсивности облучения по данным холловских измерений (1) и времени жизни (2). В используемом диапазоне интенсивностей облучения ЭВД линейно зависит от интенсивности.

Увеличение ЭВД с ростом I_c можно было бы объяснить (согласно [1, 2]) уменьшением числа компонентов пар Френкеля, ушедших на неконтролируемые стоки. При этом необходимо предположить, что способность стоков поглощать V и I зависит от интенсивности облучения. Однако маловероятно, чтобы изменение I_c приводило только к изменению мощности стоков. Например, изменение зарядового состояния вакансий неизбежно приведет к изменению соотношения сечений реакций типа вакансия+атом кислорода и вакансия+сток донора и соответственно эффективностей их введения.

Непротиворечивым объяснением полученных результатов является изменение ЭВД с ростом I_c за счет изменения вероятности аннигиляции генетических пар Френкеля при изменении уровня возбуждения электронной подсистемы кристалла. Как показано в [3], взаимодействие противоположно заряженных компонентов генетической пары Френкеля экранируется свободными носителями заряда. Это приводит к зависимости радиуса захвата (максимального расстояния, на котором противоположно заряженные V и I чувствуют поле друг друга) от концентрации неравновесных носителей заряда, т. е. от I_c .

Ранее в [7] было показано, что из зависимости ЭВД ($\Delta N/\Delta \Phi$) от интенсивности облучения, используя модель кулоновского взаимодействия противоположно заряженных V и I , можно определить функцию распределения $f(r)$ генетических пар по расстояниям между V и I :

$$\frac{\partial}{\partial r_s} \left(\frac{\Delta N}{\Delta \Phi} \right) = -4\pi w_A r_s^2 f(r_s), \quad (2)$$

где w_A — параметр, характеризующий рекомбинационные свойства V и I , который может зависеть от интенсивности, r_3 — расстояние между V и I , определяемое из равенства

$$\frac{Z_I Z_V e^2}{4\pi\epsilon_0 r_3} \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right) = kT, \quad (3)$$

где Z_V, Z_I — зарядовые состояния V и I соответственно, r_D — дебаевский радиус экранирования.

На рис. 3 приведена расчетная зависимость r_3 от концентрации носителей заряда n при комнатной температуре T . В интересующем нас диапазоне концентраций неравновесных носителей заряда (рис. 3, заштрихованный участок; концентрация носителей заряда в эксперименте оценивалась из измерений

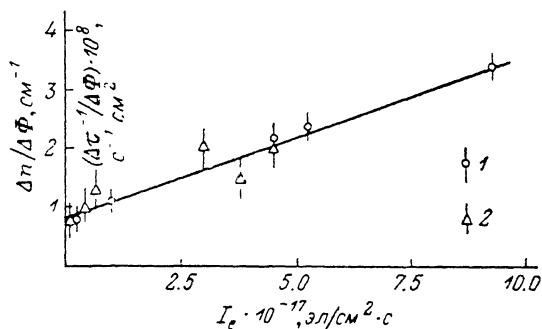


Рис. 2. Зависимость ЭВД от интенсивности облучения по данным измерений эффекта Холла (1) и времени жизни ННЗ (2).

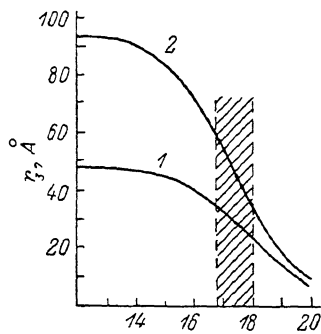


Рис. 3. Зависимость радиуса захвата r_3 от концентрации носителей заряда n в кремнии при комнатной температуре.

Штрихованный участок соответствует концентрациям ННЗ в момент окончания электронного импульса при используемых значениях интенсивностей облучения, приведенных на рис. 2.

максимального значения фототока при облучении) зависимость $r_3(n)$ можно приближенно описать логарифмической функцией

$$r_3 \sim \ln n, \quad (4)$$

а концентрацию неравновесных носителей заряда в момент окончания импульса облучения

$$n \sim I_e. \quad (5)$$

Тогда с учетом (2), (4), (5) и линейной зависимости ЭВД от I_e (рис. 2) функция распределения генетических пар Френкеля по расстояниям между V и I

$$f(r) \sim r^{-2} \exp(r/r_0), \quad (6)$$

где константа $r_0 \approx 9 \text{ \AA}$ (для $Z_V Z_I^* = 2$).

Функциональная зависимость (6) для $f(r)$ аналогична используемой в качестве модельной в [8] при расчете скорости реакций между точечными дефектами в полупроводниках.

Таким образом, из полученных результатов следует, что основным фактором, определяющим рост ЭВД в n -Si с ростом I_e в диапазоне больших интенсивностей облучения, является уменьшение вероятности процесса аннигиляции генетических пар Френкеля, который контролируется кулоновским взаимодействием противоположно заряженных вакансий и междоузельных атомов. При используемой энергии электронов (3 МэВ) в области расстояний между компонентами $30 \leq r \leq 55 \text{ \AA}$ функция распределения пар Френкеля $f(r)$ экспоненциально спадает с ростом r .

Л и т е р а т у р а

- [1] Панов В. И., Смирнов Л. С. Влияние интенсивности облучения на процессы накопления радиационных дефектов в кремнии. — ФТП, 1971, т. 5, в. 2, с. 346—348.
- [2] Кожевников В. И., Михнович В. В. Интерпретация зависимости скорости введения А-центров в *n*-кремний от интенсивности облучения электронами. — ФТП, 1981, т. 15, в. 8, с. 1598—1600.
- [3] Войцеховский А. И., Крайчинский А. Н., Мизрухин Л. В., Шаховцов В. И. Образование дефектов в *n*-Ge при облучении мощными импульсами электронов. — Письма ЖТФ, 1981, т. 7, в. 17, с. 1029—1032.
- [4] Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В. Влияние интенсивности облучения на скорость аннигиляции вакансий и междоузлий в кремнии. — ФТП, 1984, т. 18, в. 2, с. 345—347.
- [5] Крайчинский А. Н., Мизрухин Л. В., Осташко Н. И., Шаховцов В. И. Эффективность образования дефектов в *n*-Si при облучении электронами с энергией 1 МэВ. — ФТП, 1985, т. 19, в. 12, с. 2202—2204.
- [6] Абдусаттаров А. Г., Емцев В. В., Ломасов В. Н., Машовец Т. В. Скорость образования А-центров в кремнии при электронном импульсном облучении. — ФТП, 1986, т. 20, в. 1, с. 164—167.
- [7] Крайчинский А. Н., Мизрухин Л. В., Шаховцов В. И. Распределение пар Френкеля по расстояниям в облученных кремнии и германии. — ФТП, 1983, т. 17, в. 3, с. 437—440.
- [8] Винецкий В. Л., Ясковец И. И. Скорости реакций между точечными дефектами в твердых телах. — В кн.: Физические процессы в кристаллах с дефектами. Киев, 1972, с. 76—110.

Институт физики АН УССР
Киев

Получена 11.11.1986
Принята к печати 12.06.1987