

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко при БГУ им. В. И. Ленина
Минск

Получено 15.01.1987
Принято к печати 21.07.1987

ФТП, том 22, вып. 3, 1988

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В *p*-КРЕМНИИ

Абдусаттаров А. Г., Емцев В. В., Машовец Т. В.

При изменении интенсивности облучения может изменяться квазистационарная концентрация участвующих во вторичном дефектообразовании вакансий V и межузельных атомов I , поскольку вероятность разделения пар Френкеля определяется, в частности, уровнем ионизации и параметрами импульса.

Одно из возможных объяснений существования зависимости скорости образования вторичных дефектов от интенсивности облучения было предложено в [1], однако в этой работе использовалось облучение электронами с энергией 10 МэВ, и характер процесса дефектообразования не может быть в этом случае полностью описан в терминах создания изолированных пар Френкеля. В работе [2] было показано, что скорость образования A -центров в n -кремнии уменьшается с ростом интенсивности облучения при малых длительностях импульса.

В настоящей работе использовались образцы кремния p -типа, выращенного по методу Чохральского, с концентрацией бора $\sim 6 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$; концентрации кислорода и углерода, определенные по ИК поглощению, составляли соответственно $\sim 6 \cdot 10^{16}$ и $\sim 1 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. Проводилось импульсное облучение быстрыми электронами с энергией ~ 1 МэВ. Частота следования импульсов $f_1 = 400$ Гц при длительности импульса $t_{\text{имп}} = 3$ мкс, а также $f_2 = 368$ Гц при $t_{\text{имп}} = 200$ мкс [2]. Доза облучения варьировалась от $\sim 5 \cdot 10^{13}$ до $\sim 5 \cdot 10^{15}$ эл/см 2 . Кинетика накопления дефектов была линейной в указанном диапазоне доз. При всех интенсивностях облучения температура образцов не превышала 40 °С. Проводилось измерение температурных зависимостей концентрации и подвижности дырок в исходных и облученных образцах в интервале температур 20–300 К. Анализ этих зависимостей позволяет, с одной стороны, отдельно определить N_a и N_d , а с другой — независимым образом определить концентрацию компенсирующих центров [3].

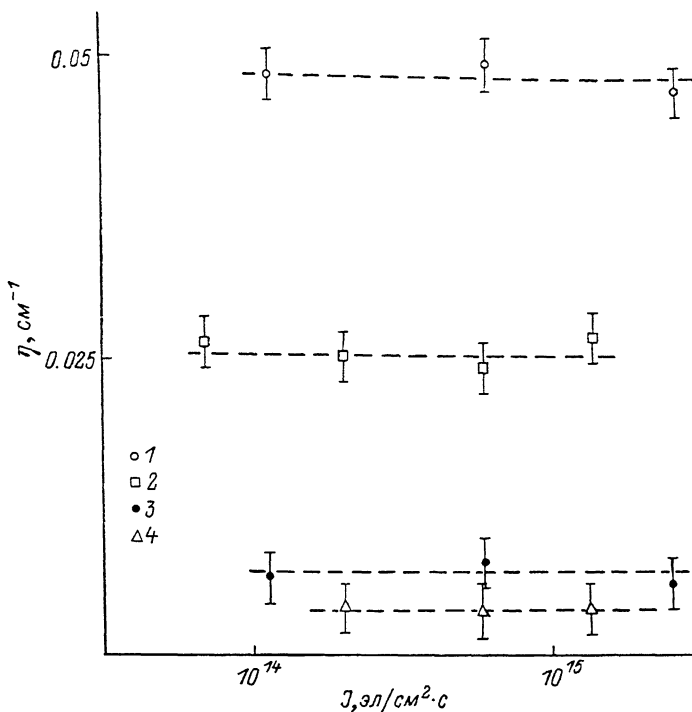
Основными центрами, возникающими в p -кремнии, облученном при $T = 300$ К электронами с энергией ~ 1 МэВ, являются A -центры, K -центры и дефекты, включающие в себя примесные атомы III группы (см., например, [4, 5]). A -центры в кремнии p -типа электрически нейтральны, поэтому мы проводили наблюдения за поведением K -центров и дефектов, включающих в себя примесные атомы бора.

На рисунке приведены зависимости скорости введения K -центров (1, 2) и скорости уменьшения концентрации мелких акцепторных состояний атомов бора $E_a + 0.045$ эВ (3, 4) от интенсивности в импульсе для двух длительностей импульса. Видно, что во всем исследованном интервале интенсивностей и длительностей импульса скорость введения K -центров не изменяется, но ее величина существенно различается при $t_{\text{имп}} = 200$ и 3 мкс. Как видно из рисунка, скорость уменьшения концентрации мелких акцепторных состояний атомов бора очень мала при обеих длительностях импульса, таким образом, доминирующим процессом является образование K -центров. Процессы взаимодействия вакансий и

межузельных атомов можно представить следующей схемой: $V+O_i \rightarrow [VO]$ (A -центр); $I+C_s \rightarrow C_i$; $[VO]+C_i \rightarrow [VOC]$ (K -центр).

Малая величина скорости уменьшения концентрации мелких акцепторных состояний бора объясняется, по-видимому, более эффективным взаимодействием собственных междузельных атомов с C_s вследствие большого различия концентраций углерода и бора. Необходимо отметить, что наблюдавшаяся в [6] при облучении электронами с энергией ~ 1 МэВ при постоянном токе пучка скорость введения K -центров составляет 0.025 см^{-1} , что хорошо согласуется с нашими данными при $t_{\text{имп}}=200$ мкс.

Различие скоростей введения K -центров при разных длительностях импульса может быть обусловлено различием скоростей аннигиляции междузельных ато-



Зависимость скорости введения K -центров (1, 2) и скорости уменьшения концентрации мелких акцепторных состояний атомов бора (3, 4) от интенсивности электронного облучения при $t_{\text{имп}}=3$ (1, 3) и 200 мкс (2, 4).

мов с гомогенными вакансиями, поскольку при достаточно малой длительности импульса не все пары с исходным расстоянием между компонентами $d < d_{\text{max}}^1$ успевают проаннигилировать за время импульса. При облучении импульсами достаточно большой длительности скорость образования разделяющихся пар приближается к минимальной, характерной для непрерывного облучения. Таким образом, при заданной интенсивности облучения скорость введения K -центров (так же как и A -центров [1]) тем больше, чем короче импульс.

Авторы глубоко признательны В. И. Шаховцову и В. Н. Ломасову за предоставление возможности облучения электронами.

Л и т е р а т у р а

[1] Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В. Особенности радиационного повреждения кремния p -типа при различных интенсивностях электронного облучения. — Электрон. техн., сер. Материалы, 1982, № 2 (163), с. 38—40.

¹ Обозначение d_{max} введено в [7] для определения такого расстояния между гомогенными компонентами пары Френкеля, при котором они аннигилируют в условиях облучения с вероятностью, близкой к единице.

- [2] 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.
- [3] Блекмор Дж. Статистика электронов в полупроводниках. М., 1964. 450 с.
- [4] Watkins G. D. — In: Rad. Dam. Semicond. Paris—Rayamont, 1965, p. 97—113.
- [5] Stein H. I. — In: Rad. Eff. Semicond. London—N. Y.—Paris, 1971, p. 125—139.
- [6] Almelch N. — Phys. Rev., 1966, v. 149, N 2, p. 687—692.
- [7] Витовский Н. А., Емцев В. В., Машовец Т. В. О распределении пар Френкеля, возникающих в германии при облучении, по расстояниям между их компонентами. — ФТП, 1983, т. 17, в. 11, с. 1985—1990.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 12.02.1987
Принято к печати 21.07.1987

ФТП, том 22, вып. 3, 1988

О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЗОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЫРОК В ТЕЛЛУРЕ

Горлей П. Н.

Наинизшая среди элементарных полупроводников симметрия кристаллической решетки и отсутствие в ней центра инверсии приводят к целому ряду уникальных особенностей физических свойств теллура. Например, достоверно установлено [1, 2], что энергетический спектр дырок в этом материале имеет необычный для полупроводников вид и при малых уровнях заполнения описывается соотношением

$$\varepsilon(\mathbf{k}) = -Ak_x^2 - Bk_y^2 \pm \sqrt{E_1^2 + S^2k_z^2} - \Delta', \quad (1)$$

где $\Delta' = E_1 - \varepsilon_{op}$, $\varepsilon_{op} = (E_2 - 2E_1)^2 / (4E_2)$, $E_2 = S^2/A$. Нижний знак в (1) соответствует валентной зоне H_5 , верхний — зоне H_4 , от максимумов которой ведется отсчет энергии. Структура энергетических зон теллура схематично представлена на вставке к рисунку. Из опытных данных [3-8] следует также аномальное изменение с температурой (см. рисунок) ширины запрещенной зоны E_g и величины расщепления $2E_1$ зон H_4 и H_5 теллура. Столь необычное изменение с ростом температуры E_g и E_1 должно привести и к нелинейной температурной зависимости зонных параметров дырок в теллуре. Знание последней весьма актуально, поскольку позволит более точно найти константы вещества, определяемые на основе сопоставления теоретических и экспериментальных данных.

Прежде всего отметим, что параметры A и B в (1) определяются следующим образом [9, 10]:

$$A = \hbar^2 / [2m_{\parallel} (1 - 4E_1^2/E_2^2)], \quad (2)$$

$$B = \hbar^2 / 2m_{\perp} = L^2/E_g - \hbar^2/2m_0, \quad (3)$$

где m_{\parallel} и m_{\perp} — соответственно продольная и поперечная компоненты тензора эффективной массы дырок вблизи экстремума зоны, L — матричный элемент оператора импульса, \hbar — постоянная Планка, m_0 — масса свободного электрона.

Из (2), (3) следует, что $A = f[m_{\parallel}(T), E_1(T), E_2(T)]$, $B = \varphi[m_{\perp}(T)] = \varphi[L(T), E_g(T)]$. Однако, согласно опытным данным [8, 11], величина E_2 с точностью до ошибок эксперимента не зависит от температуры и давления. Компонента тензора эффективной массы дырок m_{\perp} пропорциональна энергии