

для плоского дефлектора при прочих одинаковых параметрах больше, а следовательно, выше и его чувствительность отклонения. При этом нелинейность отклонения, определяемая главным образом неоднородностью поля, у плоских дефлектронов не хуже, чем у дефлектронов с цилиндрической или прямоугольной апертурой при одинаковом количестве электродов.

Литература

- [1] Хаттер Р. В кн.: Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений. М.: Мир, 1978, с. 183—245.
 [2] Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я. ЖТФ, 1986, т. 56, № 7, с. 1348—1353.
 [3] Афанасьев В. П., Фишкова Т. Я. А. с. № 983819. Оpubл. в Б. И., 1982, № 47, с. 230.

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

Поступило в Редакцию
28 января 1987 г.

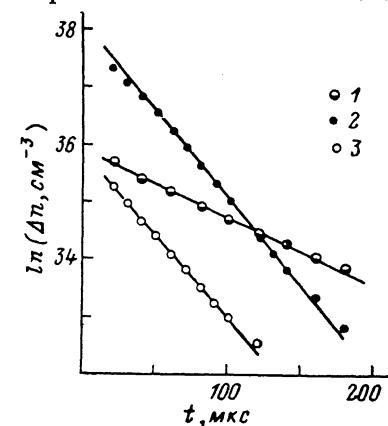
УДК 537.311.33

Журнал технической физики, т. 58, в. 6, 1988

ВРЕМЯ ЖИЗНИ ПЕРВИЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

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

Образование стабильных радиационных дефектов (РД) во многих случаях контролируется диффузией компонентов пар Френкеля (вакансий или межузельных атомов), созданных облучением. Измерения коэффициентов диффузии вакансий проводились [1, 2] через длительное время после прекращения облучения, когда электронная подсистема кристалла находилась в равновесном состоянии. При облучении движение вакансий и межузельных атомов происходит в условиях ионизации кристалла, поэтому их миграционные способности могут отличаться от равновесных. Нами сделана попытка измерения времени жизни первичных РД в кремнии по отношению к захвату их имеющимися в кристалле атомами легирующих примесей и другими технологическими дефектами в условиях сильного возбуждения электронной подсистемы.



Образцы *n*-Si, выращенные по методу Чохральского, с концентрацией фосфора $(8.9 \pm 0.2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и кислорода $\sim 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, степень компенсации ≤ 0.13 облучались одиночными импульсами электронов с энергией 3 МэВ при комнатной температуре. Измерялись величина фототока, наведенного импульсом быстрых электронов, и ее спад во времени после окончания импульса. При выбранных размерах образцов ($10 \times 2 \times 2 \text{ мм}$) и используемой энергии электронов облучение приводит к практически равномерному по толщине возбуждению неравновесных носителей заряда (ННЗ). Это позволяет наиболее корректно определять рекомбинационные характеристики изучаемых образцов [3].

Амплитуда плотности тока пучка в электронном импульсе выбиралась такой, чтобы в исследуемом диапазоне интенсивностей выполнялось условие сильной ионизации кристалла. Определяемая в этом случае из эксперимента постоянная линейной рекомбинации τ_{∞} не зависит от концентрации ННЗ. При этом тестирующие импульсы должны были иметь сравнительно небольшую амплитуду, чтобы концентрация введенных облучением РД была меньше исходной концентрации рекомбинационных центров. Следующий после тестирующих мощный электронный импульс приводил к созданию заметной концентрации рекомбинационных РД. В этом случае кинетика спада концентрации ННЗ была связана с рекомбинацией ННЗ через имеющиеся в кристалле центры, а также с перестройкой (или образованием) рекомбинационных РД.

На рисунке представлены зависимости $\Delta n(t)$, характеризующие спад концентрации ННЗ после облучения образцов одиночными импульсами электронов различной интенсивности. Кривая 1 характеризует спад концентрации ННЗ непосредственно после окончания тести-

рующего импульса электронов с интенсивностью $2 \cdot 10^{15}$ эл./см²·с. Как видно, зависимость экспоненциальна, $\tau_{\infty} = 84$ мкс. Величина τ_{∞} соответствует постоянной линейной рекомбинации в исходном, неповрежденном облученном образце. Второй импульс облучения с интенсивностью $3 \cdot 10^{17}$ эл./см²·с привел к образованию достаточно большой концентрации рекомбинационных РД, что проявилось в уменьшении τ_{∞} до 33 мкс (кривая 2). Кривая 3 измерена примерно через 15 мин после измерения кривой 2 и характеризует спад концентрации ННЗ после действия тестирующего импульса электронов с интенсивностью $2.5 \cdot 10^{15}$ эл./см²·с. Наклоны прямых 2 и 3 в пределах ошибки эксперимента оказались одинаковыми.

Из рисунка (кривая 2) видно, что после действия дефектообразующего импульса, за исключением начального участка спада концентрации ННЗ ($\Delta t \leq 50$ мкс), наблюдается экспоненциальная зависимость концентрации от времени. Это значит, что при $t > \Delta t$ не происходит изменения концентрации рекомбинационных РД. Наклон прямой 3, измеренной через 15 мин после дефектообразующего импульса электронов, не изменился. Следовательно, рекомбинационные РД образуются во время и после импульса облучения (длительность импульса 4 мкс), но не более чем за 50 мкс. Указанный временной интервал является экспериментальной оценкой сверху суммарной длительности этапов первичного и вторичного дефектообразования.

Известно (например, [1]), что при облучении *n*-Si высокоэнергетическими электронами вводятся три основных типа РД: А-центр (комплекс вакансии с атомом кислорода), Е-центр (комплекс вакансии с атомом донора) и дивакансия. Эффективность введения А-центров, полученная из измерений эффекта Холла и методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней, на порядок больше эффективности введения других вакансионных комплексов акцепторного типа. При этом, поскольку в условиях сильной ионизации кристалла темп рекомбинации определяется захватом электрона на нейтральный акцептор [4], основной вклад в рекомбинацию ННЗ дают те дефекты, концентрация которых больше, т. е. А-центры. Действительно, концентрация введенных за один импульс А-центров $\sim 10^{12}$ см⁻³, а $\Delta \frac{1}{\tau_{\infty}} \simeq$

$\simeq (50 \text{ мкс})^{-1}$. Оцененное из выражения $\Delta \frac{1}{\tau_{\infty}} = \sigma v N_A$, где v — тепловая скорость носителей,

N_A — концентрация А-центров, сечение захвата ННЗ А-центром $\sigma \sim 10^{-15}$ см², что не противоречит литературным данным (например, [5]). Проведенная оценка в первом приближении позволяет исключить из рассмотрения движение вакансий на другие дефекты, кроме атомов кислорода. Тогда по известному значению концентрации атомов кислорода N_O и интервалу времени, в течение которого могут образовываться вторичные РД ($\Delta t \leq 50$ мкс), можно оценить минимальное значение коэффициента диффузии вакансии D_V

$$D_V \geq \frac{N_O^{-2/3}}{\Delta t} \sim 10^{-8} \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

Если же основным рекомбинационным дефектом окажется Е-центр или дивакансия, то минимальное значение D_V возрастает на 2—3 порядка.

Отметим, что D_V при комнатной температуре, полученный экстраполяцией температурной зависимости $D_V(T)$ экспериментальных данных (150—350 °С) [2], по крайней мере на порядок меньше полученного в настоящей работе. Это может быть свидетельством того, что первичные РД ускоренно мигрируют в условиях возбуждения электронной подсистемы.

Литература

- [1] Watkins G. D. In: Effects des Rayonnements sur les semiconducteurs. Paris: Dunod, 1964, p. 97—111.
- [2] Ершов С. Н., Пантелеев В. А., Нагорных С. Н., Черняховский В. В. ФТТ, 1977, т. 19, № 1, с. 322—323.
- [3] Войцеховский А. И., Крайчинский А. Н., Мизрухин Л. В., Шаховцов В. И. ФТП, 1981, т. 15, № 5, с. 938—942.
- [4] Рыжик С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963. 496 с.
- [5] Галкин Г. Н., Рытова Н. С., Вавилов В. С. ФТТ, 1960, т. 2, № 9, с. 2025—2030.

Институт физики АН УССР
Киев

Поступило в Редакцию
10 ноября 1986 г.