

О НОВОМ МЕХАНИЗМЕ РЕКОМБИНАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Е. М. Гершензон, Ю. П. Ладыжинский, А. П. Мельников

Обычно считают, что при низких температурах и межзонном фотовозбуждении носителей заряда акцепторы и доноры, дающие мелкие уровни, нейтрализуются и не принимают существенного участия в рекомбинации [1, 2]. В настоящей работе показывается, что это представление нуждается в пересмотре: нейтральные мелкие примеси могут при определенных условиях полностью определять время жизни свободных носителей. Рекомбинация при этом происходит благодаря захвату либо электрона нейтральным донором (образование D^- -центра) с последующим захватом дырки притягивающим центром, либо дырки нейтральным акцептором (A^+ -центр) с последующим захватом электрона. Хотя идея образования D^- (A^+) центров высказывалась ранее [3], возможность рекомбинации через них необоснованно отвергалась [4].

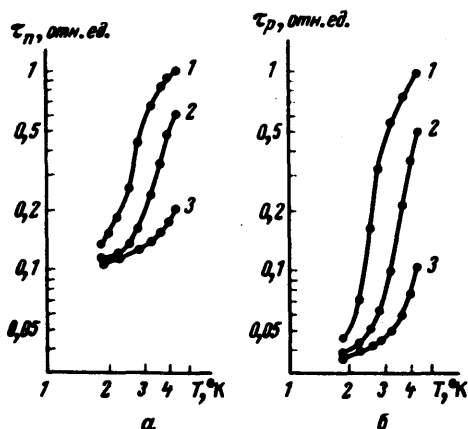


Рис. 1

Нами проведено исследование процессов рекомбинации на образцах кремния, легированного бором с $N_B = 10^{14} + 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, и компенсацией $\approx 10\%$ при межзонном фотовозбуждении носителей в интервале температур $T = 1,7 + 4,2^\circ\text{K}$ в условиях циклотронного резонанса, что позволяет отдельно изучать времена жизни электронов τ_n и дырок τ_p [5].

Было обнаружено, что в образцах Si с $N_D + N_A \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ τ_n и τ_p слабо меняются с температурой ($\tau \sim T + T^{3/2}$) и практически не зависят от интенсивности фотовозбуждения. В образцах, легированных бором, с $N_B \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ появляется сильная температурная зависимость как τ_n , так и τ_p : для электронов она может быть $\tau_n \sim T^4 - T^5$, для дырок $\tau_p \sim T^6 - T^7$. На рис. 1, а и 1, б показаны зависимости $\tau(T)$ и $\tau_p(T)$ для образца Si:B с $N_B = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при различных уровнях подсвета (уровень фотовозбуждения растет от

1 к 3). Такие зависимости являются типичными для легированных образцов. Здесь проявляется отчетливое влияние уровня фотовозбуждения на время жизни носителей.

Приведенные данные не могут быть объяснены в рамках известных механизмов рекомбинации. Как показывают оценки, полученные зависимости времени жизни от температуры и уровня фотовозбуждения при использованных концентрациях примесей не связаны с межпримесной рекомбинацией [6] и не определяются захватом электронов на нейтральный бор [2]. Малая концентрация свободных носителей ($\leq 10^9 \text{ см}^{-3}$) исключает межзонную излучательную, экситонную и Оже рекомбинации. Данные эксперимента свидетельствуют о наличии мелкого уровня рекомбинации, обязанного бору, и объясняются предлагаемым механизмом рекомбинации через A^+ -центры (см. рис. 2).

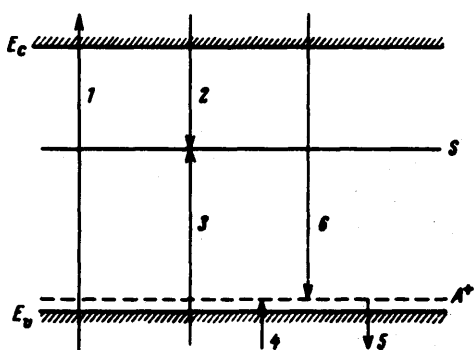


Рис. 2. 5 — глубокий уровень, A^+ -уровень A^+ -центра, 1 — межзонное возбуждение носителей заряда, 2, 3 — захват электронов и дырок глубокими центрами, 4, 5 — захват дырок нейтральным бором и их реэмиссия, 6 — захват электронов A^+ -центрами

При высоких температурах, когда концентрация A^+ -центров мала из-за интенсивной реэмиссии захваченных дырок, рекомбинация происходит через глубокие центры [7]. С понижением температуры и увеличением уровня фотовозбуждения концентрация A^+ -центров растет и бор начинает оказывать существенное влияние на процесс рекомбинации. Расчет, проведенный на основе предлагаемой модели, дает зависимости τ_n, τ_p от температуры и уровня подсвета, близкие к эксперименту, если положить коэффициент захвата дырки нейтральным акцентором $a_n^0 = 10^{-7} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$, коэффициент захвата электрона A^+ -центром $a_n^+ = 5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$ и энергию связи дырки с нейтральным бором $\epsilon_i = 5 \text{ мэв}$.

Аналогичные эксперименты выполнены нами на образцах n - и p -Ge и n -Si. Влияние рассматриваемого механизма рекомбинации в этих материалах начинает проявляться при более низких температурах, чем в Si: B. Это находится в соответствии с характерными для них меньшими значениями ϵ_i , непосредственно измеренными нами в [8].

Литература

- [1] M.Fukai, H.Kawamura, K.Sekido, I.Imai. J. Phys. Soc. Japan., 19, 30, 1964.
 - [2] Ya. E.Pokrovskii, K I Svistunova. Phys. Stat. Sol., 33, 517, 1969.
 - [3] M.A.Lampert. Phys. Rev. Lett., 1, 450, 1958.
 - [3] Eiso Otsuka, Tyuzi Ohyama, Kazuo Muraze. J. Phys. Soc. Japan., 25, 729, 1968.
 - [5] Е.М.Гершензон, А.П.Мельников, Э.Л.Шимичева. ФТП, 4, 892, 1970.
 - [6] Я.Е.Покровский, К.И.Свистунова. ФТТ, 7, 1837, 1965.
 - [7] Я.Е.Покровский, К.И.Свистунова. ФТП, 1, 756, 1967.
 - [8] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, А.П.Мельников. Письма в ЖЭТФ, 14, вып. 5, 1971.
-