

05;06

О ВЛИЯНИИ ИЗОВАЛЕНТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА РЕКОМБИНАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ АТОМНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ A_3B_5

© С.А.Исломов, Б.Л.Оксенгендлер

В 70-х годах в полупроводниках A_3B_5 экспериментально был открыт класс так называемых рекомбинационно-стимулированных атомных процессов (РСАП) [1], суть которых, как потом оказалось [2-3], сводилась к эффективной передаче энергии электронного возбуждения (E_e) на атомные степени свободы. Несмотря на 6 возможных типов таких процессов [4], в A_3B_5 в подавляющем большинстве случаев реализуется следующая схема: при электронно-дырочном безызлучательном переходе возбуждаются колебательные состояния всей дефектной молекулы, которые затем, интерферируя, сосредоточивают энергию, необходимую для атомной перестройки (Q_T), на "координате реакции" (КР). Для вероятности (в единицу времени) такого процесса было получено следующее выражение [2-3]:

$$W_0 = \eta \left(\frac{Q_T - E_e}{Q_T} \right)^{S-1} \exp \left(-\frac{Q_T - E_e}{kT^*} \right), \quad (1)$$

где η — темп перезарядки глубокого уровня, вносимого в запрещенную зону квазимолекулой; S — число колебательных степеней свободы дефектной квазимолекулы; T^* — эффективная температура, превышающая температуру кристалла из-за вовлечения в безызлучательный переход кристаллических колебаний (см.[5]).

Возникает вопрос: что нового вносит в процессы РСАП легирование изовалентными примесями?

Как известно [6], изовалентное легирование привносит ряд особенностей в геометрию решетки полупроводника, в его электронный и колебательный спектр. Поэтому можно ожидать, что каждая из этих особенностей модифицирует формулу (1).

Рассмотрим полупроводник A_3B_5 , легированный изовалентной примесью M с атомной массой m_n и средней концентрацией s . Отметим, что вероятность попадания N атомов

такой примеси в дефектную квазимолекулу объемом Ω_0 есть

$$\omega(N, \bar{N}) = e^{-\bar{N}} (\bar{N})^N / N!,$$

где $\bar{N} = \bar{c}\Omega$; $N = c\Omega_0$; $\Omega_0 = a_0^3 S/3$, a_0^3 — атомный объем.

Выделим ряд интересных ситуаций.

Тяжелая примесь замещения. При неизменной силовой константе ($k = \text{const}$) и большой массе ($m_n > \max\{m_A, m_B\}$, где m_A и m_B — массы атомов A и B), атом примеси колеблется существенно медленнее остальных атомов квазимолекулы:

$$\omega_n/\omega_0 \sim \sqrt{\frac{\min\{m_A, m_B\}}{m_n}} < 1.$$

В этом случае при перекачке колебаний между атомными степенями свободы квазимолекулы тяжелые примесные атомы фактически не успевают принять участие своими колебаниями, эффективно уменьшая число колебательных степеней свободы квазимолекулы:

$$S \rightarrow S_{\text{эф}} = 3(N_0 - N_n); \quad N_0 = S/3.$$

Это дает

$$W = W_0 \frac{\omega(\bar{N}_n, N_n)}{\left(1 - \frac{E_e}{Q_T}\right)^{3N_n}}. \quad (2)$$

Поскольку в обычных ситуациях $\bar{c}\Omega_0 \ll 1$, то (2) сводится к

$$\frac{W}{W_0} = \left[\frac{\bar{c}\Omega_0}{1 - \frac{E_e}{Q_T}} \right]^{\Omega_0} \approx \left[\frac{\bar{c}\Omega_0}{1 - \frac{E_e}{Q_T}} \right]^{2\Omega_0}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что эффект ускорения РСАП возможен лишь при условии

$$E_e > Q_T(1 - \bar{c}\Omega_0) = Q_T \kappa_1. \quad (4)$$

Легкая примесь замещения. В этом случае при $k = \text{const}$ и $m_n < \max\{m_A, m_B\}$ имеем

$$\omega/\omega_0 \sim \sqrt{\frac{\min\{m_A, m_B\}}{m}} > 1.$$

Это обстоятельство затрудняет обмен энергии между атомом примеси и квазимолекулы [7], хотя в момент безызлучательного перехода атом легкой примеси приобретает

определенную долю энергии электронного перехода $\Delta E_e = \gamma E_e (\gamma < 1)$, так что в обмене между колеблющимися атомами участвует энергия

$$\hat{E}_e \approx E_e(1 - \gamma \bar{c}\Omega_0).$$

Тогда для интересующей нас вероятности остается справедливой формула (3) с заменой в ней E_e на \hat{E}_e , так что легирование изовалентной примесью увеличит вероятность РСАП при условии

$$E_e \geq Q_T \frac{1 - \bar{c}\Omega_0}{1 - \gamma \bar{c}\Omega_0} \equiv Q_T \kappa_2. \quad (5)$$

Простые оценки по (4) и (5) показывают, что обсуждаемый эффект влияния изовалентного замещения на вероятность РСАП реализуется в весьма естественных, а отнюдь не специальных ситуациях. Можно полагать, что во многих случаях фотоприборов на широкозонных гетероструктурах из многих компонентов ($A_{3-x}B_5C_x$; $A_3B_{5-y}D_y \dots$) анализируемое усиление может быть заметно. (Не лишне отметить, что сам этот экспериментальный факт обсуждался одним из нас (Б.Л. Оксенгендлером) с ныне покойным докт. М. Шлютером (Белл-лаб., США) во время его пребывания в Ташкенте в 1989 г.)

Список литературы

- [1] Lang D., Kimerling L. // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 33. P. 489.
- [2] Kimerling L. // Sol. St. Electr. 1978. V. 21. N 11-12. P. 1391-1401.
- [3] Юнусов М.С., Оксенгендлер Б.Л., Магмудов А.Ш. Элементарные атомные процессы и электронная структура дефектов в полупроводниках. Ташкент, 1986.
- [4] Оксенгендлер Б.Л., Юнусов М.С. // ДАН. 1974. № 6. С. 21-24.
- [5] Юнусов М.С. и др. Подпороговые радиационные эффекты в полупроводниках. Ташкент, 1989. 224 с.
- [6] Баженов Ф.К., Фистуль В.И. // ФТП. 1984. Т. 18. С. 1345-1362.
- [7] Chirikov V.V. // Phys. Rep. 1979. V. 52. P. 463.

Ташкентский
государственный
университет
Институт ядерной физики
АН РУз

Поступило в Редакцию
8 ноября 1995 г.