

О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ПОЯВЛЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ p — n -ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ С ГЛУБОКИМИ УРОВНЯМИ

Птащенко А. А., Мороз Н. В., Будулак В. И.

Исследованы S -образные вольт-амперные характеристики (ВАХ) прямого тока p — n -гетероструктур (ГС) на основе GaAlAs при температурах 90—300 К. До и после срыва ВАХ имели участки вида $I=I_0 \exp(eU/nkT)$, где $n > 2$ и растет при понижении температуры. Предложена модель появления отрицательного сопротивления ГС, основанная на локальном уменьшении толщины обедненного слоя при перезарядке глубоких центров в результате туннельного захвата носителей заряда. Получено условие появления отрицательного сопротивления. Анализ ВАХ ГС на основе GaAlAs, согласно данной модели, дает значения локальной толщины обедненного слоя в неоднородностях 20—120 нм.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) прямого тока p — n -гетероструктур (ГС) на основе сильно легированных полупроводников обычно содержит участки, описываемые выражением

$$I = I_0 \exp[-(\varphi_k - eU)/nkT], \quad (1)$$

где «коэффициент неидеальности» $n > 2$ и растет при понижении температуры [1, 2]. ВАХ такого вида связывают с туннельной рекомбинацией носителей заряда через глубокие уровни с испусканием фононов в обедненном слое [1, 3] либо через пограничные состояния, непрерывно распределенные по энергиям [2]. Модель [1, 3] дает для коэффициента неидеальности

$$n = 2 \left[1 - \frac{\hbar^2 kT}{6m_t w_1^2} \left(\frac{1}{kT} + \frac{1}{E_T} \right)^3 \right]^{-1}, \quad (2)$$

где m_t — «туннельная» эффективная масса электрона, w_1 — ширина обедненного слоя, приведенная к высоте барьера 1 эВ, а параметр E_T характеризует зависимость вероятности испускания фононов от их суммарной энергии [3]. Для симметричного резкого p — n -гетероперехода из расчетов [2], выполненных для более общего случая, следует

$$n = 2 \frac{V_s}{kT} \operatorname{cth} \frac{V_s}{kT}, \quad (3)$$

где

$$V_s = \hbar \sqrt{\frac{\pi N e^2}{\epsilon_0 m_t}} = \frac{\hbar}{w_1 \sqrt{2m_t}}, \quad (4)$$

N — концентрация ионизированных центров в области пространственного заряда (ОПЗ). Следует отметить, что в предельном случае при $E_T \gg kT$ и $V_s \ll kT$ значения параметра n , полученные из (2) и (3), совпадают.

Из (2) и (3) видно, что величина n возрастает при повышении концентрации ионизированных центров в ОПЗ. Если перезарядка глубоких центров в ОПЗ приводит к изменению величины w_1 в (2) и (4), то ВАХ туннельно-рекомбинационного тока в этом случае будет иметь вид (1), где величина n не постоянная,

а зависит от тока. Изменение w_1 резко изменяет величину тока и может приводить к S -образной ВАХ.

Исследовались ВАХ прямого тока p - n -гетеропереходов на основе GaAlAs при температурах 90–300 К. ВАХ большинства p - n -переходов имели вид (1). У отдельных образцов, как видно из рис. 1, при токах 0.1–1 мкА наблюдался S -образный участок ВАХ.

Кривые 1 и 2, полученные на двух p - n -гетеропереходах, до и после срыва содержат участки, соответствующие выражению (1). При этом обычно $n_2 > n_1$, где n_1 и n_2 — значения параметра n до и после срыва.

На рис. 2 представлены зависимости $n_1(T)$ и $n_2(T)$, полученные из анализа ВАХ образца 473. Сплошные кривые рассчитаны по формуле (2) при $E_T \gg kT$ для токов, обусловленных туннельной рекомбинацией через глубокие уровни в ОПЗ. Удовлетворительное соответствие экспериментальных данных расчет-

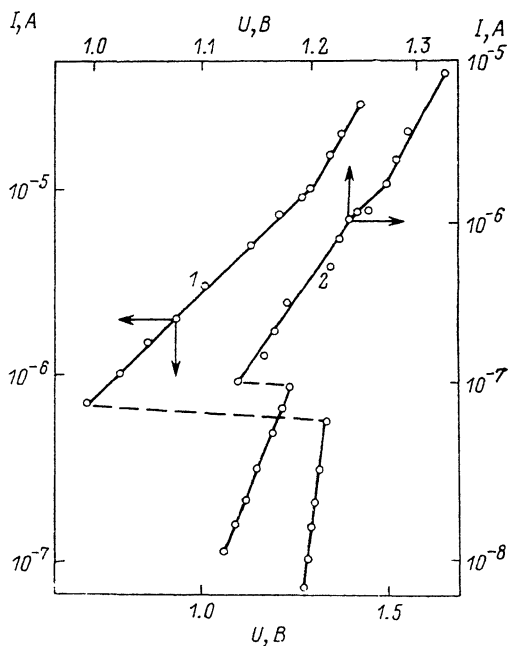


Рис. 1. ВАХ прямого тока p - n -гетеропереходов на основе GaAlAs 474 (1) и 473 (2), измеренные при температуре 95 К.

ным кривым $n(T)$ говорит в пользу применимости модели [3]. Расчеты согласно модели [2], учитывающей рекомбинацию через пограничные состояния в ГС, дают более плавную зависимость $n(T)$, чем экспериментальная. Неравенство $n_2 > n_1$, согласно (2), (3), свидетельствует, что после срыва приведенная толщина обедненного слоя w_1 в области прохождения туннельного тока уменьшилась. Это может происходить, если носители заряда, туннелирующие сквозь ОПЗ, захватываются на глубокие центры (s -центры) и приводят к их перезарядке. Для уменьшения w_1 необходимо, чтобы возросла концентрация захваченных глубокими центрами электронов в области отрицательного объемного заряда и (или) дырок в области положительного объемного заряда. Для концентрации захваченных указанными центрами электронов n_s можно записать уравнение

$$\frac{dn_s}{dt} = bn_1(N_s - n_s) - cn_s, \quad (5)$$

где N_s — полная концентрация s -центров, b , c — вероятности захвата электронов на s -центры и их освобождения, n_1 — локальная концентрация электронов. В первом приближении можно принять $n_1 \sim I$. Если учесть, что для резкого p - n -перехода

$$w_1 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(N_A + N_D)}{eN_A N_D}}, \quad (6)$$

где N_A и N_D — концентрации ионизированных акцепторов и доноров, причем

$$N_A = N_A^0 + n_s, \quad (7)$$

где $N_A^0 = \text{const}$, то из (1), (2), (5) в стационарном случае получим условие наличия отрицательного сопротивления

$$B \frac{\varphi_k - eU}{kT} n_s \frac{(1 - n_s/N_s)}{N_A^0 + n_s} > 1, \quad (8)$$

где коэффициент

$$B = \frac{n-2}{2n}. \quad (9)$$

Условие (8) получено в предположении, что туннельный ток I проходит по всему сечению ГС. Однако величина w_1 , оцененная по температурной зависимости

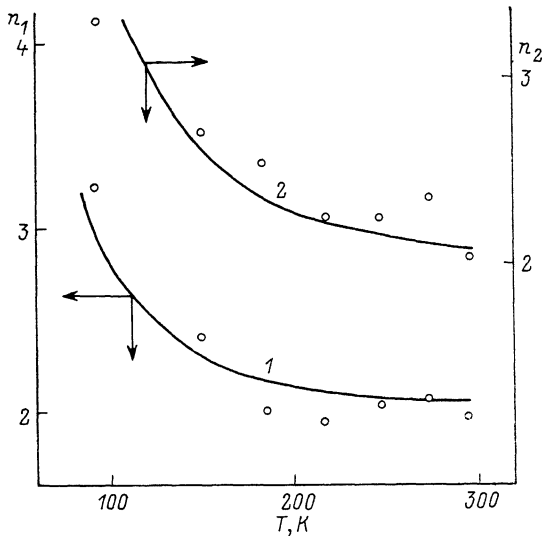


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента неидеальности ВАХ образца 473, полученные из анализа участков ВАХ до (1) и после (2) срыва.

сти коэффициента неидеальности $n(T)$, много меньше приведенной ширины ОПЗ w_c , определенной из емкостных измерений. Это свидетельствует, что туннельный ток проходит не по всему сечению $p-n$ -гетеропереходов, а по неоднородностям малой площади, в которых $w_1 \ll w_c$.

Предположим, что по неоднородности $p-n$ -перехода протекает ток I , определяемый выражением (1), а по остальной площади — ток I' , для которого также справедливо (1), но с другим коэффициентом неидеальности n' . Если в неоднородности, ответственной за туннельный ток I , происходит описанная выше перезарядка глубоких центров, то можно показать, что для появления отрицательного сопротивления необходимо, кроме (8), выполнение дополнительного условия

$$\frac{n'}{n} \frac{I}{I'} + 1 > B \frac{\varphi_k - eU}{kT} n_s \frac{(1 - n_s/N_s)}{N_A^0 + n_s}. \quad (10)$$

При использовании модели [2], дающей для коэффициента неидеальности n выражение (3), в условиях (8) и (10) величина B заменяется на

$$B' = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{n} \left(\frac{V_s}{kT} \right)^2 - \frac{n}{2} \right]. \quad (11)$$

Численные оценки с учетом параметров исследованных структур показали, что на участке отрицательного сопротивления условия (8)—(10) выполняются.

Из изложенного ясно, что S -образный участок ВАХ p — n -перехода может появиться и в том случае, когда вследствие перезарядки глубоких центров в процесс переноса туннельного тока включаются новые, дополнительные неоднородности. В этом случае для значений параметра неидеальности участков ВАХ до и после срыва не обязательно выполнение неравенства $n_2 > n_1$.

Таким образом, S -образные участки ВАХ прямого тока ГС можно объяснить перезарядкой глубоких центров в ОПЗ в результате туннельного захвата носителей заряда. Анализ ВАХ, согласно модели [3], позволяет оценить концентрации глубоких центров и параметры неоднородностей ГС, содержащих глубокие центры. Для исследованных p — n -гетеропереходов $w_1 = 20$ — 120 нм, $N_s = 2 \cdot 10^{17}$ — $5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$.

Авторы признательны А. Я. Шикю за плодотворное обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] Птащенко А. А. // УФЖ. 1982. Т. 27. В. 12. С. 1829—1833.
- [2] Шик А. Я. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 7. С. 1295—1299.
- [3] Птащенко А. А. // УФЖ. 1984. Т. 29. В. 4. С. 575—581.

Одесский государственный
университет
им. И. И. Мечникова

Получена 17.12.1990
Принята к печати 13.02.1991