

## МЕХАНИЗМ ТОКОПЕРЕНОСА В ДИОДНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ *n*-GaP С НАПЫЛЕННЫМ ПАЛЛАДИЕМ

С. В. Слободчиков, Х. М. Салихов, Б. Е. Саморуков,  
Е. В. Руссу, Г. Г. Ковалевская

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021,  
Санкт-Петербург, Россия

(Получена 6 июля 1993 г. Принята к печати 14 июля 1993 г.)

На основе измерений вольт-амперных и вольт-емкостных характеристик диодных структур, созданных напылением палладия в вакууме на кристаллах *n*-GaP с  $n = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и ориентацией (111) и (100), проанализирован механизм токопрохождения. Показано, что токоперенос обусловлен двойной инжекцией носителей тока в компенсированную область, созданную дефектными состояниями акцепторного типа и образующими глубокие центры захвата дырок. Влияние захвата дырок на ВАХ в большей степени изменяет обратную ветвь, причем коэффициент захвата  $\gamma = \sum_j N_{ti} / \sum_i p_{ti} = 2.1$ , и происходит сильное изменение «тока насыщения»  $J_0$  и коэффициента  $n$  в аналитической зависимости  $J = J_0 \exp(qV/nkT)$ . Изменение работы выхода палладия вследствие поглощения водорода не изменяет существенно вид ВАХ, что подтверждает установленный механизм токопереноса.

Основные исследования электрических характеристик диодов Шоттки на основе GaP выполнялись на структурах Au — *n* (*p*)-GaP и в меньшей степени изучались диоды с использованием других металлов, таких как Al, Pt, Cu, Ag, Gr, Ni, Mo [1]. В настоящем сообщении изложены некоторые результаты исследований механизма токопрохождения в диодных структурах Pd — *n*-GaP, позволяющие расширить наши данные об электрических свойствах структур металл—фосфид галлия.

Для создания диодных структур использовались кристаллы *n*-GaP с концентрацией электронов  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и ориентацией (100) и (111), полученные методом Чохральского. Палладий наносился напылением в вакууме  $\sim 10^{-5}$  Тор, омические контакты создавались нанесением сплава Ag/Te.

На рис. 1, 2 представлены вольт-амперные характеристики, снятые на диодных структурах, созданных соответственно на кристаллах *n*-GaP (111) и *n*-GaP (100). Прямые ветви обоих типов диодов («минус» на *n*-GaP) определяются зависимостью  $J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)$  с коэффициентами  $n = 3 \div 3.5$ , причем величина прямого тока в диодах второго типа примерно на порядок выше тока в диодах на основе *n*-GaP (111). Обратная ветвь диода Pd — *n*-GaP (111) имеет в той же полулוגарифмической зависимости тока от напряжения два прямолинейных участка соответственно при относительно низких и более высоких уровнях инжекции (рис. 1, кривая 2) с  $n_1 = 28$  и  $n_2 = 55$ . Эти участки разделены почти вертикальным скачком тока при  $V_r \approx 8$  В. Обратная ветвь диода Pd — *n*-GaP (100) имеет те же черты поведения, хотя и не столь четко выраженные (рис. 2).

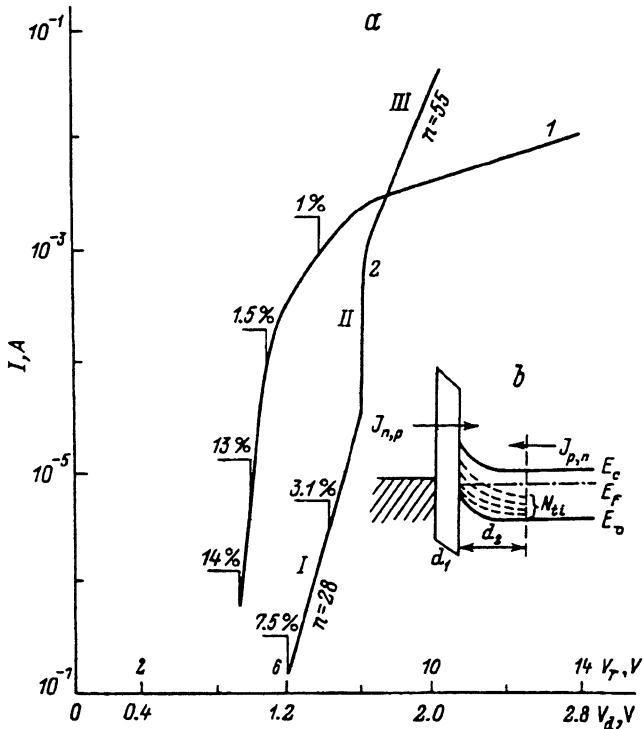


Рис. 1. а. Вольт-амперные характеристики диодной структуры Pd—n-GaP (111); 1 — прямая ветвь («минус» на n-GaP), 2 — обратная ветвь. В точках кривых показано увеличение тока под действием  $H_2$  (в %). б. Зонная схема структуры.

Характерным для исследованных структур является почти полное отсутствие фоточувствительности.

Анализ возможных механизмов токопрохождения показывает, что наиболее вероятно двойная инжекция носителей в компенсированную более высокоомную область диода. В [2] отмечалось, что в диодах Шоттки, созданных на кристаллах GaP примерно с той же концентрацией электронов и с использованием выпрямляющего платинового контакта, наблюдалась линейная зависимость  $C^{-2} = f(-V)$  ( $C$  — емкость диода), причем отсечки на оси напряжений существенно превышали значения диффузионного потенциала. На рис. 3 даны соответствующие зависимости для двух типов наших диодов. И в этом случае наблюдается аналогичная ситуация: напряжения отсечки составили 3.5 и 4.3 В соответственно для диодов на кристаллах n-GaP (111) и n-GaP (100). Рассчитанные по известному соотношению  $N_d = (2/q\epsilon_s) / (dC^{-2}/dV)$  концентрации  $N_d$  в 2—3 раза меньше измеренных по электрическим данным для исходных кристаллов, причем расхождение меньше для диодов на n-GaP (100). Поскольку отмеченная выше аналитическая зависимость тока от напряжения и отсутствие фоточувствительности не позволяет еще и по этим двум методам определить диффузионный потенциал, точная величина его остается неизвестной, но очевидно, что она меньше величины отсечки в 2—3 раза. Указанное расхождение связывается в [2] с наличием промежуточного слоя между металлом и GaP и учетом поверхностных состояний. В наших диодах, однако, должна быть принята другая модель, объясняющая особенности вольт-амперной зависимости. Отметим, в частности, что большая величина расхождения в диодах Pd—n-GaP (100) не может связываться с большей толщиной слоя,

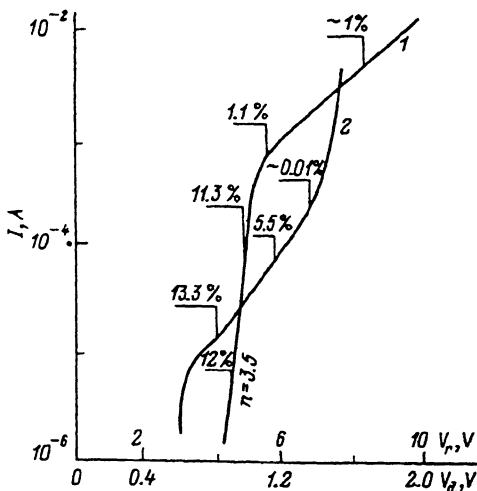


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодной структуры Pd—n-GaP (100); 1 — прямая ветвь, 2 — обратная ветвь. В точках кривых показано увеличение тока под действием H<sub>2</sub> (в %).

характерного для этих структур, поскольку это противоречит количественным данным по значениям прямого и обратного тока. На наш взгляд, для объяснения совокупности экспериментальных результатов и механизма токопрохождения необходимо помимо промежуточного слоя  $d_1$  (рис. 1, б) постулировать образование высокоомного компенсированного слоя  $d_2$ . Последний слой может создаваться в процессе напыления Pd в результате диффузии его атомов или диффузии дефектных состояний от поверхности на некоторую глубину в объем кристалла. Эти состояния образуют ряд акцепторных уровней, компенсирующих доноры  $N_d$  и создающих  $\sum_i N_{ii}$  центров захвата для дырок.

Токопрохождение должно определяться толщиной промежуточного слоя  $d_1$ , а также толщиной и свойствами слоя  $d_2$ . Аналитическая зависимость ток—напряжение позволяет предположить как в прямом, так и в обратном направлении двойную инжекцию электронов и дырок в диффузионном приближении [3]. Толщина промежуточного слоя  $d_1$  должна быть  $\leq 50$  Å, иначе процесс туннелирования будет затруднен. С другой стороны, при таких толщинах нельзя рассматривать двойную инжекцию в этот слой, поскольку полученная в эксперименте аналитическая зависимость справедлива при диффузионной длине  $L$ , меньшей длины высокоомной области  $W$ . В этой связи естественно считать, что эта инжекция идет в слой  $W = d_2$ , а инжектирующими контактами являются, например, в прямом направлении для электронов некомпенсированная основная  $n$ -область кристалла, а для дырок — палладий. В обратном направлении роли этих контактов меняются на противоположные (рис. 1, б). В обратном направлении наиболее отчетливо выявляется роль центров захвата дырок на вид и характеристики вольт-амперной зависимости. Согласно [3], коэффициент  $n = \left[ 2b(\gamma + 1) + \operatorname{ch} \frac{W}{L} + 1 \right] / [b(\gamma + 1) + 1]$ , где  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий захват, и в нашем случае  $\gamma = \sum_i N_{ii} / \sum_i p_{ii}$  ( $p_{ii}$  — концентрация захваченных дырок). Это соотношение справедливо при коэффициентах инжекции дырок  $J_p/J \approx 1$ , а электронов  $J_n/J \neq 1$ . Тогда для участка I вольт-амперной зависимости (рис. 1, а), где идет интенсивный захват дырок,  $\gamma > 1$ , и, согласно теории,  $J_0$  и  $n$  будут сильно

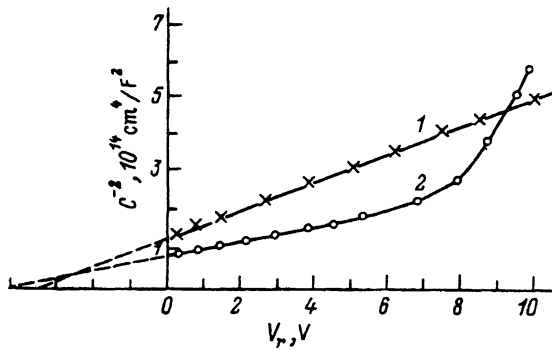


Рис. 3. Зависимость емкости от обратного смещения; 1 — диод Pd—n-GaP (111); 2 — диод Pd—n-GaP (100).

уменьшены ( $J_0 \approx 10^{-14}$  А,  $n = 28$ ). Область II соответствует полному заполнению центров захвата дырками и резкому росту тока, а область III характеризует процесс токопереноса с устраненным влиянием центров захвата дырок ( $\gamma = 0$ ) и в этом случае  $J_0$  и  $n$  возрастают ( $J_0 \approx 10^{-9}$  А,  $n = 55$ ). Оценка  $J_0$  и  $W/L$  по значениям  $n$  в обеих областях дает  $\gamma = 2.1$  и  $W/L \approx 5.4$  (при  $b = \mu_n/\mu_p \approx 1$  для GaP).

В прямой ветви, когда  $J_n/J \approx 1$  и  $J_p/J \neq 1$ , захват дырок не существенно изменяет ВАХ из-за преобладающего электронного тока и поскольку  $n$  в этом случае приближается к 2, когда, согласно теории,  $W/L < 1$ , то можно считать, что в этом процессе токопереноса  $L$  сильно возрастает.

Полученные данные могут свидетельствовать, что за расхождение упомянутых выше диффузионного потенциала и напряжения отсечек в зависимости  $C^{-2} = f(-V)$  ответственны не только промежуточный слой с поверхностными состояниями, но и глубокие уровни захвата дырок. В [4] отмечалось влияние глубоких уровней на емкость GaP — диодов Шоттки, причем плотность таких центров оценивалась в  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Если учитывать расхождения в оценках  $N_d$  в наших образцах, то можно предположить в слое  $W = d_2$  концентрацию центров захвата на порядок выше.

Проведенные дополнительные эксперименты по влиянию водорода на вид и количественные значения вольт-амперных характеристик (рис. 1, а, и 2) показали, что оно не очень значительно. Отмеченные экспериментальные точки на кривых снимались при импульсном воздействии водорода. При малых уровнях инжекции увеличение тока составляло  $7 \div 14\%$ , уменьшаясь при высоких уровнях до  $1\%$ . Это еще раз свидетельствует, что на механизм токопрохождения в исследованных структурах определяющее влияние оказывают свойства слоя  $d_2$ , а не изменение коэффициентов инжекции на границе Pd — промежуточный слой — n-GaP, обусловленное изменением работы выхода палладия при поглощении водорода.

Отсутствие фоточувствительности в изученных структурах несомненно связано с экстремально малым временем жизни и соответственно диффузионной длиной дырок вследствие их захвата. В сочетании с малой вероятностью туннелирования через промежуточный слой это приводит к невозможности разделения неравновесных световых носителей на контактах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Physics and Chemistry of III—V Compound Semiconductor Interfaces (ed. by C. W. Wilmsen), 117. N. Y.—London (1985).
- [2] A. M. Cowley. J. Appl. Phys., 37, 3024 (1966).
- [3] Э. И. Адирович, П. М. Карагеоргий-Алкалаев, А. Ю. Лейдерман. Токи двойной инжекции в полупроводниках, 2, 60. М.: Сов. радио (1978).
- [4] C. R. Wronski. J. Appl. Phys., 41, 3805 (1970).

Редактор В. В. Чалдышев

---