

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА МЕЖДУЗОННЫЙ ТОК ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ GaAs

Калинин Ю. М., Криворотов Н. П.

Исследовано влияние температуры в диапазоне 77÷383 К и гидростатического давления $(0 \div 3) \cdot 10^8$ Па при температурах $-50 \div 110$ °С на междузонный ток туннельных диодов GaAs. Проведено сравнение экспериментальных характеристик с расчетными, полученными в рамках теорий туннельного тока Кейна и Бонч-Бруевича, Серебrenикова с учетом сложного строения зоны проводимости и резонансных состояний донорной примеси. Установлено, что теория Бонч-Бруевича, Серебrenикова точнее описывает эксперимент. Оценены значения энергетического зазора между Γ - и L -минимумами зоны проводимости $E_{\Gamma L} \approx 0.336 \pm \pm 0.036$ эВ, энергетическое положение примесного уровня Sn, связанного с L -минимумами 0.080 ± 0.008 эВ, и термический коэффициент энергетического зазора $E_{\Gamma L}$ в уравнении Варшви $(7.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

Экспериментальному исследованию междузонного туннелирования в туннельных диодах (ТД) GaAs посвящено много работ [1-6], однако до настоящего времени не установлена количественная связь параметров зонной структуры материала с характеристиками туннельного тока. Для интерпретации экспериментальных результатов используются главным образом две теории туннелирования — Кейна [7] и Бонч-Бруевича и Серебrenикова [8]. Эти теории по сути дела не проверяются в эксперименте, а используются как исходные модели, в рамках которых можно описать эксперимент. Как правило, это удается сделать, используя некоторые параметры полупроводника как подгоночные константы. Успех такого описания фактически предопределен, поскольку, с одной стороны, имеется небольшой объем анализируемых результатов (пиковый ток I_p) как функция давления (P) [6], тензочувствительности при постоянной температуре (T) [4], форма вольтамперной характеристики (ВАХ) при постоянных T , P [3], а с другой — обилие параметров, необходимых для расчетов, которые либо неизвестны (концентрации легирующих примесей, формирующих p - n -переход), либо известны не точно (параметры L -минимумов зоны проводимости), либо совсем не учитываются (резонансные состояния донорной примеси).

В настоящей работе представлены результаты сравнения экспериментальных данных по влиянию температуры (77 ÷ 383 К) и гидростатического давления в диапазоне $(0 \div 3) \cdot 10^8$ Па при температурах $-50 \div 110$ °С на туннельный ток ТД GaAs (изготовлены вплавлением Sn в p^+ -GaAs <Zn>) с расчетными, полученными в рамках теорий ВАХ [7, 8]. Типичные экспериментальные данные приведены на рис. 1, 2. Методика эксперимента и основные выражения, необходимые для расчета характеристик туннельного тока и уровня Ферми в n -области (с учетом боковых минимумов зоны проводимости и связанных с ними резонансных состояний донорной примеси), такие же, как и в работе [9]. Напряженность электрического поля в переходе оценивалась, согласно [10], с учетом влияния свободных носителей на ширину области пространственного заряда. Ширина запрещенной зоны $E_g(T, P)$ и величина энергетического зазора

между Γ - и L -минимумами зоны проводимости $E_{\Gamma L}(T, P)$ находились, согласно [11], из выражений

$$E_g = E_g(0) - \alpha T^2 / (\beta + T) + (dE_g/dP) P,$$

$$E_{\Gamma L} = E_{\Gamma L}(0) - \alpha_1 T^2 / (\beta + T) + (dE_{\Gamma L}/dP) P.$$

Значения параметров $E_g(0)$, $E_{\Gamma L}(0)$, $dE_{\Gamma L}/dP$, dE_g/dP , коэффициентов Варшии σ , α_1 , β приведены в табл. 1. При вычислении температурной зависимости эффективной массы в двухзонном приближении коэффициент α в соответствии с [16] умножался на 0.675, поскольку в исследованном диапазоне температур изменение эффективной массы обусловлено лишь тепловым расширением решетки [17]. Кроме того, учитывалось изменение концентрации носителей, обу-

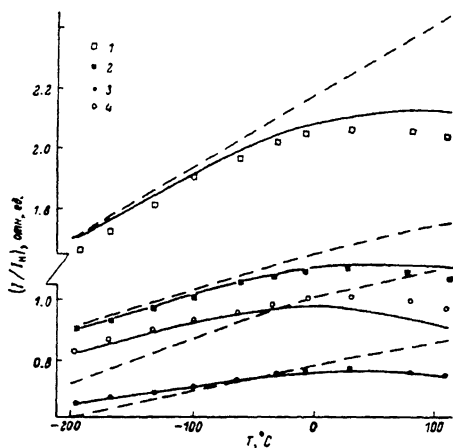


Рис. 1. Зависимость междузонного тока (нормированная на значение тока при $T = -100^\circ\text{C}$, $V = -0.030$ В) от температуры при различных напряжениях смещения. V , мВ: 1 — 50, 2 — 30, 3 — 40, 4 — 85 (эксперимент). Штриховые линии — расчет при параметрах зонной структуры, приведенных в табл. 1 в рамках теории [8], сплошные — расчет при учете резонансных состояний S_p , связанных с L -минимумами зоны проводимости.

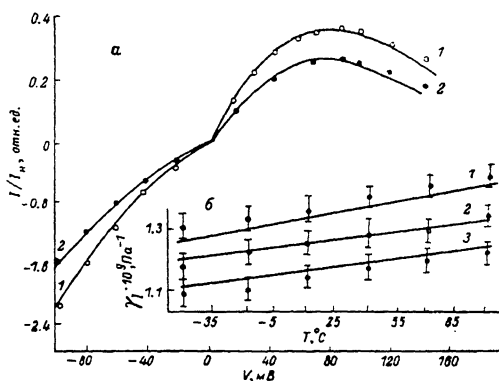


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) характеристики туннельного тока.

а) ВАХ при $T = 10^\circ\text{C}$ и давлениях P , Па: 1 — 0, 2 — $2 \cdot 10^8$ (нормирована на значение тока при $P = 0$, $V = -0.06$ В); б) тензочувствительность $\gamma_T = d \ln I/dP$ при различных температурах и напряжениях V , В: 1 — 0.1, 2 — 0.04, 3 — 0.04.

словенное тепловым расширением полупроводника (использовалась температурная зависимость коэффициента термического расширения, представленная в [18]).

Вначале рассматривалась возможность описания экспериментальных результатов в рамках параметров зонной структуры GaAs, приведенных в литературе (табл. 1). В процессе подгонки расчетных зависимостей к экспериментальным варьировались концентрации легирующих примесей, формирующих p - n -переход. Наиболее близкие к эксперименту результаты были получены в рамках теории [8], но, как видно из рис. 1 (штриховые линии), расчетные зависимости и в этом случае неудовлетворительно описывают эксперимент. Предполагалось, что причиной расхождения являются недостаточно точные значения параметров L -минимумов зоны проводимости, приведенные в [11].

С учетом сделанного замечания число варьируемых параметров при дальнейших вычислениях было расширено (N_d , N_a , α_1 , m_{SL} , $E_{\Gamma L}$). Состояния донорной примеси, связанные с боковыми минимумами, как и прежде, не учитывались. Статистический анализ полученных решений (проводился на основе анализа отклонений расчетных характеристик от экспериментальных с помощью критерия χ^2) показал, что экспериментальные данные по влиянию температуры и гидростатического давления на туннельный ток могут быть объяснены только в рамках теории [8] (среднеквадратичное отклонение расчетных характеристик от экспериментальных не превышает 3%). Полученные при этом оценки плотности тока и отношения I_p/C_v (C_v — емкость в долине) в 1.5—2 раза превышают

Т а б л и ц а 1
 Параметры зонной структуры GaAs,
 используемые при расчетах

Параметр	Значение	Литература
$E_g(0)$	1.43 эВ*	} [12]
α	$5.1 \cdot 10^{-4}$ эВ/К*	
β	250 К*	
$E_{\Gamma L}(0)$	0.296 эВ	} [11]
$m_e(0)$	$0.067 m_0$	
m_{SL}	$0.56 m_0$	
α_1	$9.5 \cdot 10^{-5}$ эВ/К	**
$dE_{\Gamma L}/dP$	$(6.2 \div 7.1) \cdot 10^{-11}$ эВ/Па	[13]
$d \ln \epsilon / dT$	$1.24 \cdot 10^{-4}$ К ⁻¹	[14]
$d \ln \epsilon / dP$	$1.4 \cdot 10^{-11}$ Па ⁻¹	[15]
dE_g/dP	$11.7 \cdot 10^{-11}$ Па ⁻¹	[13]

Примечание. * Сильно легированный материал. ** Рассчитывалось по результатам [11] с использованием α для сильно легированного материала [13]. $m_e(0)$ — эффективная масса электрона; m_{SL} — эффективная масса плотности состояний в L -минимумах зоны проводимости; ϵ — диэлектрическая проницаемость.

экспериментальные значения ($10 \div 250$ А/см², $0.014 \div 0.3$ мА/пФ при концентрации носителей в исходном материале 4 и $6 \cdot 10^{19}$ см⁻³). Оценки концентрации нескомпенсированных акцепторов составляли 3.8 и $5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ (ниже концентрации в исходном материале), доноров — 0.75 и $1.9 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Параметры зоны проводимости, определенные из характеристик $I(V, T, P)$, представлены во второй колонке табл. 2. Величины среднеквадратичных отклонений оцени-

Т а б л и ц а 2
 Параметры зоны проводимости GaAs,
 оцененные из характеристик $I(V, T, P)$

Параметр	Модель зоны проводимости	
	без учета резонансных состояний	с учетом резонансных состояний
$E_{\Gamma L}(0)$	0.255 ∓ 0.026 эВ	0.336 ∓ 0.036 эВ
α_1	$(9.2 \mp 1.6) \cdot 10^{-5}$ эВ/К	$(7.73 \mp 0.8) \cdot 10^{-5}$ эВ/К
m_{SL}	$(0.72 \mp 0.13) m_0$	—
E_{LR}	—	0.080 ∓ 0.008 эВ

вались по совокупности экспериментальных результатов, полученных на различных образцах. Значения α_1 и m_{SL} удовлетворительно совпадают с литературными данными (табл. 1), однако оценка $E_{\Gamma L}(0)$ значительно меньше приведенной в [11], тем более что в сильно легированном материале величина энергетического зазора $E_{\Gamma L}(0)$, по-видимому, должна быть больше, чем в слабо легированном, вследствие слияния состояний мелких доноров с зонными.

Исследования транспорта в GaAs и растворах Ga_xAl_{1-x}As [19, 20] показывают, что донорные примеси создают локализованные состояния, связанные с боковыми минимумами, энергетическое положение которых зависит от типа легирующей примеси. Такие состояния могут оказать существенное влияние на положение уровня Ферми в сильно легированном полупроводнике. В связи с этим в дальнейшем уравнение электронейтральности решалось с учетом резонансных состояний E_{LR} (энергетическое положение отсчитывалось от L -минимумов зоны проводимости).

Варьировались $N_d, N_a, E_{\Gamma L}(0), E_{LR}, \alpha_1$. Значение m_{SL} полагалось равным $0.56 m_0$ [11]. Для того чтобы не увеличивать число варьируемых переменных,

расчеты проводились в двух вариантах при концентрации резонансных уровней $N_{AR}=N_d$ (отсутствие компенсации n -области) и $N_{AR}=N_d+N_a$ (перекомпенсация p^+ -GaAs при формировании p - n -перехода). Расчеты показывают, что такой произвол в выборе N_{AR} не сильно влияет на значение оцениваемых параметров (их различие не превосходит 6 %). Полученные оценки и их дисперсии представлены в табл. 2. Значения N_d , N_a , плотности туннельного тока и отношения I_p/C_v мало отличались от приведенных ранее. Примеры расчетных зависимостей приведены на рис. 1, 2.

Таким образом, влияние температуры и гидростатического давления на междузонный ток ТД GaAs может быть объяснено с учетом сложного строения зоны проводимости и резонансных состояний донорной примеси, связанных с боковыми минимумами. Отметим, что это объяснение для туннельных диодов как GaAs, так и GaSb [9] возможно лишь в рамках теории [8], основанной на неочевидном предположении о том, что междузонный ток в неоднородном электрическом поле p - n -перехода является суммой туннельных токов (описываемых теорией Кейна) локальных участков области пространственного заряда, меньших реальной длины туннелирования.

Л и т е р а т у р а

- [1] Именков А. Н., Мескин С. С., Наследов Д. М., Равич В. М., Царенков Б. В. Электрические свойства туннельных p - n -переходов в арсениде галлия. — ФТТ, 1964, т. 6, в. 8, с. 2281—2288.
- [2] Анашкина Т. М., Именков А. Н., Мескин С. С., Равич В. Н., Синюжин Г. Б., Сыркин Л. Н., Феоктистова Н. Н., Царенков Б. В. Влияние всестороннего давления и температуры на характеристики туннельных p - n -переходов в GaAs. — ФТТ, 1967, т. 9, в. 1, с. 294—299.
- [3] Белова Н. А., Бонч-Бруевич В. Л., Зильберман П. Е. и др. Туннельные диоды. М., 1966. 141 с.
- [4] Сыркин Л. Н., Феоктистова Н. Н. Влияние всестороннего давления на туннельный и избыточный токи в туннельных диодах. — ФТП, 1972, т. 6, в. 9, с. 1862—1866.
- [5] Andrews A. M., Korb H. W., Holonyak N. J., Suke C. B., Kleiman G. G. — Phys. Rev. B, 1972, v. 5, N 6, p. 2273—2295.
- [6] Алексеева З. М., Вяткин А. П., Криворотов Н. П. Влияние давления на междузонный туннельный ток в арсениде галлия. — ФТП, 1977, т. 11, в. 2, с. 222—225.
- [7] Kane E. O. — J. Appl. Phys., 1961, v. 32, N 11, p. 83—91.
- [8] Бонч-Бруевич В. Л., Серебренникова П. С. О вольтамперной характеристике туннельного диода. — Радиотехн. и электрон., 1961, № 12, с. 2041—2053.
- [9] Вяткин А. П., Калинин Ю. М., Криворотов Н. П. Исследование влияния температуры и гидростатического давления на междузонный ток GaSb-туннельных диодов. — ФТП, 1986, т. 20, в. 3, с. 564—566.
- [10] Пикус Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов. М., 1965. 448 с.
- [11] Aspnes D. E. — Phys. Rev. B, 1976, v. 14, N 12, p. 5331—5343.
- [12] Diego Olego, Manuel Cordona. — Phys. Rev. B, 1981, v. 22, N 2, p. 886—892.
- [13] Welber B., Cordona M., Kim C. K., Rodrigues S. — Phys. Rev. B, 1975, v. 12, N 12, p. 5729—5738.
- [14] Пухтин А. Н., Ясков А. Д. Дисперсия коэффициента преломления света в полупроводниках со структурой алмаза и цинковой обманки. — ФТП, 1978, т. 12, в. 6, с. 1047—1053.
- [15] Comphasen D. L., Connell G. A., Paul W. — Phys. Rev. Lett., 1971, v. 26, p. 184—188.
- [16] Lifshits N., Jayaraman A., Logan R. A., Gard H. C. — Phys. Rev., 1980, v. 21, N 2, p. 670—678.
- [17] Цидильковский И. М. Электроны и дырки в полупроводниках. М., 1972. 640 с.
- [18] Сирота Н. Н., Антюхов А. М., Сидоров А. А. Температурная зависимость коэффициентов теплового расширения фосфида и арсенида галлия и индия в области 7—310 К по рентгенографическим данным. — ДАН СССР, 1984, т. 277, в. 6, с. 1379—1384.
- [19] Saxena A. K. — Phys. St. Sol.(b), 1981, v. 105, N 2, p. 777—787.
- [20] Adler P. N. — J. Appl. Phys., 1969, v. 40, N 9, p. 3554—3560.

Сибирский физико-технический институт
им. В. Д. Кузнецова при ТГУ
Томск

Получена 21.04.1987
Принята к печати 12.06.1987