

# Влияние глубокой примеси на электрические характеристики эпитаксиальных структур на основе GaAs

© В.М. Калыгина<sup>†</sup>, Е.С. Слюнько

Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия

(Получена 12 марта 2009 г. Принята к печати 25 марта 2009 г.)

Проведен анализ электрических характеристик  $p^+ - i - n^+$ -структур на основе двух типов эпитаксиальных слоев GaAs: структуры с  $i$ -слоем на основе нелегированного GaAs и  $i$ -слоем на основе GaAs:Cr. Прямые токи диодов первого типа обусловлены рекомбинацией в области пространственного заряда. Обратные вольт-амперные характеристики при напряжениях до 10–15 В определяются генерационной составляющей тока. При  $|U| > 20$  В рост тока обусловлен эффектом Пула–Френкеля, который с увеличением напряжения сменяется туннелированием электронов через вершину потенциального барьера, облегченным электрон-фононным взаимодействием. Прямые ветви вольт-амперных характеристик  $p^+ - i - n^+$ -диодов с  $i$ -слоем на основе GaAs:Cr объясняются монополярной инжекцией в полупроводник, которая с увеличением напряжения сменяется двойной инжекцией. Обратные вольт-амперные характеристики линейны в интервале 1–15 В; при  $|U| > 20$  В рост тока вызван ударной ионизацией.

PACS: 71.55.Eq, 73.20.Hb, 73.40.Kp

## 1. Введение

Создание диагностических систем нового поколения, используемых в современной науке, технике, в различных технологических процессах и медицине, сдерживается отсутствием чувствительных элементов — разных видов сенсоров, детекторов, способных регистрировать единичные кванты ионизирующего излучения. Усилия исследователей в настоящее время направлены на поиски новых материалов, технологий, нетрадиционных принципов конструирования чувствительных элементов.

Для фиксирования низких доз ионизирующего излучения необходимо, чтобы фоновый ток был как можно более низким. Для создания детекторов ионизирующего излучения одним из перспективных полупроводниковых материалов является полуизолирующий GaAs благодаря большой ширине запрещенной зоны и более высокому по сравнению с кремнием коэффициенту поглощения  $\gamma$ -излучения. Известна уникальная технология получения высокоомного GaAs на основе его компенсации в процессе диффузии примесями с глубокими уровнями (Cr, Fe). В данной работе представлены результаты исследований электрических характеристик двух типов детекторов:  $p^+ - i - n^+$ -структуры с  $i$ -областью на основе нелегированного GaAs и  $p^+ - i - n^+$ -структуры с  $i$ -областью на основе GaAs, легированного хромом.

## 2. Методика эксперимента

Эпитаксиальные слои  $n$ -GaAs выращивали на  $n^+$ -подложках слиточного арсенида галлия методом газофазной эпитаксии. На поверхности активного слоя этим

же методом наращивали  $p^+$ -слой GaAs:Zn толщиной 2–3 мкм. Концентрация акцепторной примеси в  $p^+$ -слое составляла  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

При легировании GaAs хромом на поверхность  $p^+$ -слоя термическим испарением в вакууме наносили пленку Cr и проводили диффузию. Время отжига варьировали от 3 до 5 ч, а температуру — в интервале от 800 до 900 °С. Омические контакты к  $n^+$ - и  $p^+$ -слоям создавали термическим испарением NiCr. Толщина базы диодов  $W$  составляла 30–50 мкм (см. таблицу). В таблице указаны режимы изготовления структур. Диоды с нелегированной  $n$ -областью GaAs в таблице обозначены как диоды Т-25, Т-50.

Проведены измерения прямых и обратных ветвей вольт-амперных характеристик (ВАХ), а также вольт-фарадных характеристик (ВФХ)  $p^+ - i - n^+$ -структур для двух типов  $i$ -слоев: нелегированных и легированных хромом.

Для изучения прямой ветви вольт-амперной характеристики использовали автоматизированный комплекс, управляемый компьютером.

Верхний и нижний пределы измеряемых токов определялись возможностью экспериментальной установки.

Обратные вольт-амперные характеристики в интервале от 1 до 240 В измерялись на установке, включающей источник калиброванных напряжений П-4108, вольтметр В7-23 для определения суммарного падения напряжения на образце и нагрузочном сопротивлении  $R_l = 10$ –100 кОм. Падение напряжения на  $R_l$  измеряли с помощью вольтметра G-1212.010.

Измерения ВФХ проводились при использовании автоматизированного комплекса, включающего измеритель индуктивности, емкости и сопротивления Е7-12 и регистратор-измеритель для сопровождения Е7-12 с компьютером.

<sup>†</sup> E-mail: kalygina@ngs.ru

### 3. Результаты эксперимента

#### 3.1. Вольт-фарадные характеристики

Характерной особенностью темновых ВФХ является независимость емкости  $C$  от напряжения  $U$  почти во всем интервале используемых напряжений. Однако для нелегированных образцов (например, Т-25) в области небольших обратных смещений (от 0 до 3–10 В) наблюдается зависимость  $C$  от  $U$ , и этот участок ВФХ был использован для расчета концентрации носителей заряда в базе диода. При  $U > 10$  В емкость слабо зависит от напряжения. Область пространственного заряда (ОПЗ) распространяется практически на всю базу диода и достигает  $n-n^+$ -границы. С увеличением интенсивности освещения и, возможно, при изменении спектра излучения наблюдается повышение емкости для всех образцов.

#### 3.2. Вольт-амперные характеристики $p^+ - i - n^+$ -структур, полученных на нелегированных слоях GaAs

Прямые ветви ВАХ в полулогарифмических координатах ( $\ln I_f \propto U$ ) изображаются двумя отрезками (рис. 1). При напряжениях меньше 1 В тангенс угла наклона прямой к оси напряжений ( $\operatorname{tg} \alpha$ ) равен 17.7 при  $10^\circ\text{C}$  и незначительно снижается с повышением температуры  $T$ . Рост тока с увеличением  $T$  описывается экспоненциальной зависимостью с энергией активации  $\Delta E_1 = 0.42 - 0.44$  эВ (см. таблицу). При  $U \geq 1$  В на кривых появляется второй участок с меньшим наклоном ( $\operatorname{tg} \alpha = 3.8$ ).

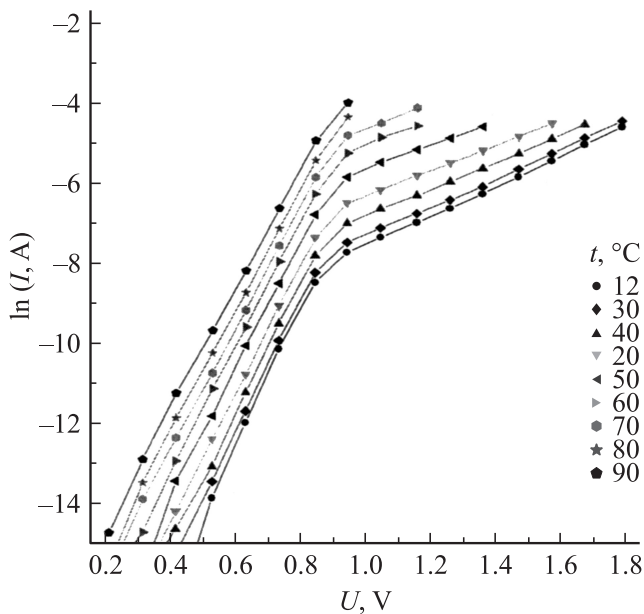


Рис. 1. Типичный вид прямых ветвей вольт-амперных характеристик  $p^+ - i - n^+$ -диода с  $i$ -слоем на основе нелегированного GaAs.

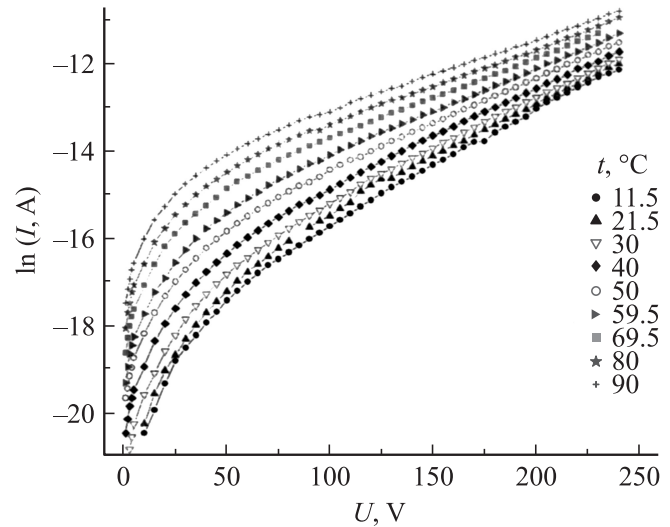


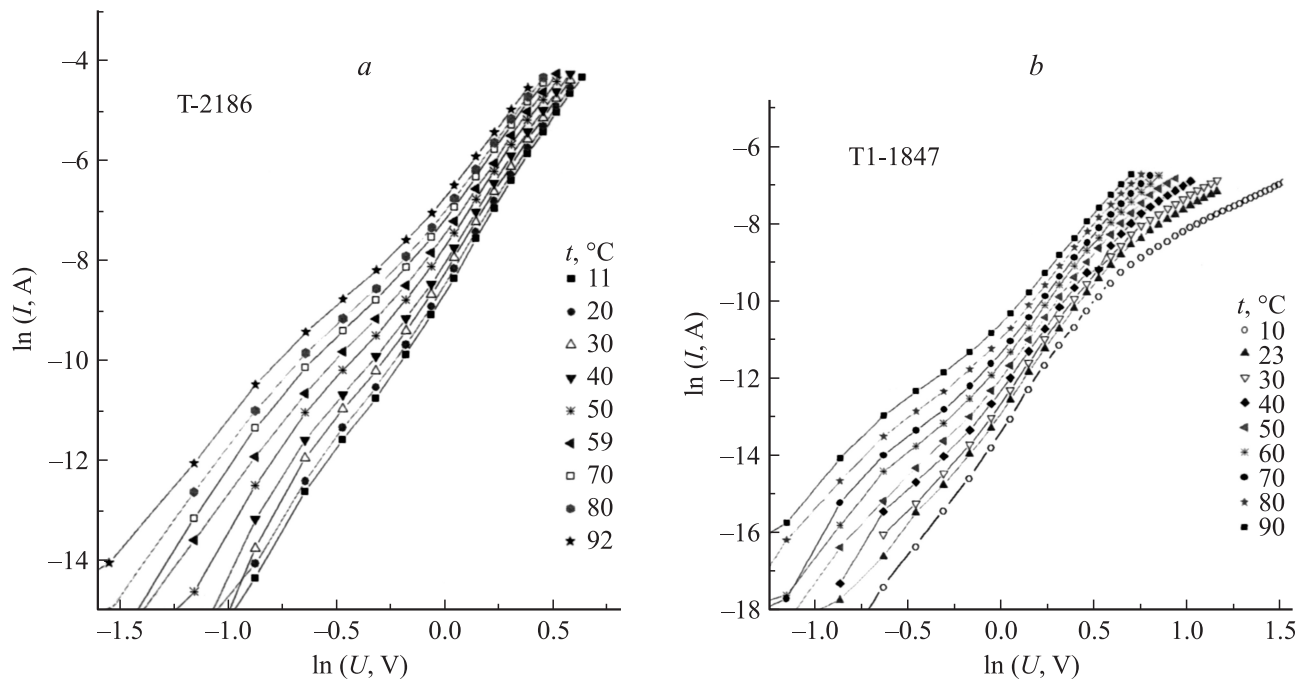
Рис. 2. Температурная зависимость обратных ветвей вольт-амперных характеристик  $p^+ - i - n^+$ -диода с  $i$ -слоем на основе нелегированного GaAs.

Обратные ветви ВАХ (рис. 2) при напряжениях до 10 В описываются линейной зависимостью  $I$  от  $U$  в двойном логарифмическом масштабе, тангенс угла наклона прямых примерно равен 1. С увеличением напряжения ( $|U| > 15$  В) обратные ВАХ отклоняются от линейной зависимости  $I$  от  $U$ . При  $|U| \geq (80 - 100)$  В обратные ветви ВАХ изображаются прямыми в координатах  $\ln I$  от  $U$ .

#### 3.3. Вольт-амперные характеристики $p^+ - i - n^+$ -структур, полученных на слоях GaAs, легированных хромом

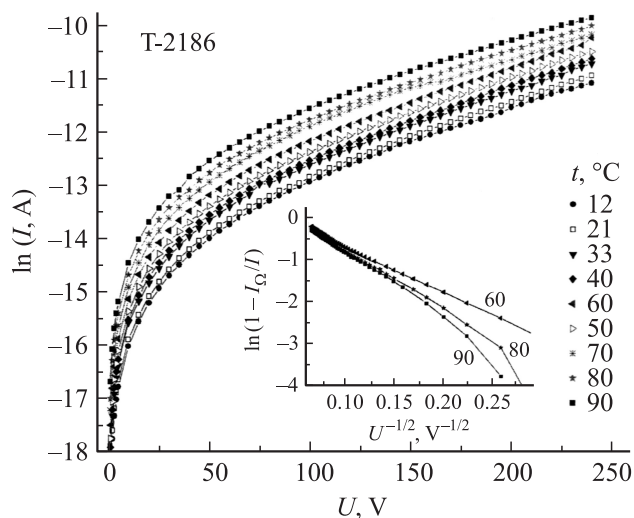
Характерный вид прямых ВАХ для диодов, полученных на эпитаксиальных слоях  $n$ -GaAs:Cr, показан на рис. 3 для двух режимов отжига: диод Т-2186 — время отжига 3 ч при температуре  $800^\circ\text{C}$  и диод Т-1847 — время отжига 3.5 ч при температуре  $900^\circ\text{C}$ . Предполагается, что в образцах типа Т-1847 достигается значительно большая компенсация электронов в зоне проводимости  $n$ -GaAs.

В отличие от структур с нелегированным  $i$ -слоем прямые ВАХ  $p^+ - i - n^+$ -диодов с базой  $n$ -GaAs:Cr частично спрямляются в двойном логарифмическом масштабе. Независимо от режима отжига начальные участки прямых ВАХ в координатах  $\ln I_f \propto \ln U$  изображаются линейной зависимостью с наклоном  $\operatorname{tg} \gamma$ , равным 6.7. На этих участках (например, при  $U = 0.4 - 0.5$  В) энергия активации роста тока равна  $\Delta E_1 = 0.52 \pm 0.02$  эВ и  $0.54 \pm 0.03$  эВ для диодов Т-2186 и Т-1847 соответственно (см. таблицу). Для образцов, подвергнутых отжигу при  $900^\circ\text{C}$  (3.5 ч),  $\operatorname{tg} \gamma$  снижается до 2.3 при напряжениях выше 2 В (рис. 3, б). Дальнейшее увеличение прямого напряжения приводит к появлению на ВАХ участка отрицательного сопротивления S-типа.



**Рис. 3.** Прямые ветви вольт-амперных характеристик  $p^+i-n^+$ -диодов с  $i$ -слоем на основе GaAs:Cr после отжига:  $a$  — при  $800^\circ\text{C}$ , 3 ч;  $b$  — при  $900^\circ\text{C}$ , 3.5 ч.

Обратные ВАХ при  $|U| \leq 10$  В представлены на рис. 4. Ток возрастает с повышением температуры с энергией активации, равной  $0.23 \pm 0.02$  эВ. В отличие от диодов первого типа (нелегированный  $i$ -слой) при режимах отжига, использованных в данной работе, наклон ВАХ в координатах  $\ln I$  от  $U$  для диодов второго типа практически не зависит от температуры при  $|U| > 70$  В.



**Рис. 4.** Обратные ветви вольт-амперных характеристик  $p^+i-n^+$ -диода на основе GaAs:Cr. На вставке — вольт-амперные характеристики в координатах  $\ln(1 - I_0/I)$  от  $U^{-1/2}$  для трех температур, указанных на рисунке в  $^\circ\text{C}$ .

## 4. Обсуждение результатов эксперимента

Из сравнения прямых и обратных ВАХ для  $p^+i-n^+$ -структур, полученных на нелегированных эпитаксиальных слоях арсенида галлия и слоях GaAs:Cr, следуют их существенные различия. Поэтому анализ результатов проведем отдельно для образцов двух типов.

### 4.1. $p^+i-n^+$ -структуры на нелегированных слоях GaAs

Предполагается, что прямые токи  $p^+i-n^+$ -диодов, полученных на нелегированных слоях, при напряжениях до 1 В обусловлены рекомбинацией носителей в ОПЗ, и плотность тока определяется выражением [1]

$$I_f = \frac{n_i k T d(U)}{2\tau_0(U_c - U)} \exp\left(\frac{eU}{bkT}\right), \quad (1)$$

где  $b \approx 2$  — коэффициент,

$$d(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(U_c + U)}{en_0}}, \quad (2)$$

$n_0$  — равновесная концентрация электронов,  $U_c$  — контактная разность потенциалов. Подтверждением рекомбинационной природы прямых ВАХ в нелегированных образцах является линейная зависимость тока от напряжения в координатах  $\ln I$  от  $U$  и  $b \approx 2$ , что соответствует теории [1].

Образец	Режим отжига	W, мкм	S, $10^{-2}$ см <sup>2</sup>	$N_d$ , см <sup>-3</sup>	$\Delta E_1$ , эВ	$\tau_0$ , с
T-25		40	5.96	$1.5 \cdot 10^{13}$	$0.44 \pm 0.02$	$1.3 \cdot 10^{-9}$
T-50		30	4.29	$1.5 \cdot 10^{14}$	$0.42 \pm 0.01$	$7.9 \cdot 10^{-10}$
T-1847		900°C 3.5 ч	50	3.90	$6.0 \cdot 10^{15}$	$0.54 \pm 0.03$
T-2186	800°C 3 ч	50	8.12	$1.3 \cdot 10^{15}$	$0.51 \pm 0.02$	

Согласно формуле (1), температурная зависимость прямого тока диодов на рекомбинационном участке ВАХ в основном определяется зависимостью от температуры концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp(-E_g/2kT), \quad (3)$$

где  $N_c$ ,  $N_v$  — эффективные плотности состояний в разрешенных зонах полупроводника,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны. С учетом выражения (3) зависимость  $I_f$  от температуры изображается прямой в координатах  $\ln(I_f/T^{2.5})$  от  $1/T$ . Из значения тангенса угла наклона этой прямой нашли  $E_g/2 = (0.67 \pm 0.03)$  эВ, что соответствует полуширине запрещенной зоны в GaAs. Используя экспериментальные данные и формулы (1), (2), оценили  $\tau_0$  (см. таблицу).

При больших прямых напряжениях (второй участок ВАХ) выполняется условие высокого уровня возбуждения, и вольт-амперные характеристики могут быть представлены выражением [1]

$$I = I_c \exp\left(\frac{eU}{C_0 kT}\right), \quad (4)$$

где  $I_c$  — множитель, не зависящий от  $U$ ,

$$C_0 = \frac{2b_0 + \text{ch}(W/L_p)}{b_0 + 1}, \quad b_0 = \frac{\mu_n}{\mu_p}.$$

Полагая, что подвижности равны  $\mu_n = 6000$  см<sup>2</sup>/(В·с), а  $\mu_p = 400$  см<sup>2</sup>/(В·с), получим  $b_0 = 15$ .

Из значений  $C_0$ , найденных из наклона прямых на втором участке ВАХ, при известной ширине базы ( $W$ ) рассчитывали диффузионную длину  $L_p$ . Отношение  $W/L_p = 4.93$ , тогда  $L_p = 9.75 \cdot 10^{-4}$  см. Из данных для  $L_p$  оценили время жизни носителей зарядов в базе:  $\tau = L_p^2/D_p = 9.8 \cdot 10^{-8}$  с.

Обратная ветвь при напряжениях  $|U| \leq 10$  В описывается генерационной составляющей тока

$$I_{\text{gen}} = \frac{en_i d(U)S}{2\tau_i}, \quad (5)$$

где  $S$  — площадь образца, и для этого участка  $I \propto U^{1/2}$ . Однако экспериментальные данные в координатах  $\ln I$  от  $U$  изображаются прямой с наклоном, близким

к 1. Возможно, при малых обратных смещениях преобладающими становятся токи утечки. Оценки показали, что генерационная составляющая тока, рассчитанная с использованием формулы (5) для  $|U| = 5$  В, равна  $I_{\text{gen}} = 2.87 \cdot 10^{-10}$  А. Экспериментальное значение обратного тока при  $|U| = 5$  В в 7 раз превосходит расчетное.

Рост тока в интервале  $10 \leq |U| \leq 80$  В объясняется эффектом Пула–Френкеля [1]:

$$I_{\text{PF}} = \frac{2en_1 d_0}{C_F^2 \tau_{n0}} [(C_F U^{1/4} - 1) \exp(C_F U^{1/4})] S, \quad (6)$$

где  $d_0$  — константа, равная  $d/U^{1/2}$ ,

$$n_1 = N_c \exp\left[-\frac{(E_c - E_{\text{дп}})}{kT}\right] \quad (7)$$

— концентрация равновесных носителей заряда для случая, когда уровень Ферми совпадает с энергией глубоких центров  $E_{\text{дп}}$ ,  $\tau_{n0}$  — время жизни электронов в полупроводнике, когда рекомбинационные центры полностью заняты дырками.

Для анализа экспериментальных данных в предположении эффекта Пула–Френкеля разделим обе части формулы (6) на величину  $(C_F U^{1/4} - 1)$  и прологарифмируем полученное выражение. Тогда

$$\ln\left[\frac{I_{\text{PF}}}{(C_F U^{1/4} - 1)}\right] = \ln M + C_F U^{1/4}, \quad (8)$$

где

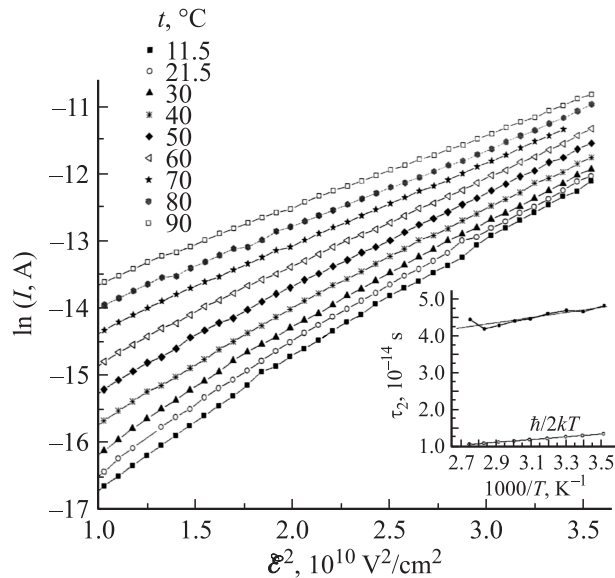
$$\ln M = \ln\left[\frac{4k^2 T^2 \pi (\epsilon \epsilon_0)^2 n_1}{e^2 N_d \tau_{n0}}\right], \quad (9)$$

$N_d$  — концентрация доноров.

Используя формулу (9), из температурной зависимости ВАХ определили энергию активации локальных уровней в запрещенной зоне полупроводника  $E_c - E_{\text{дп}} = 0.99$  эВ.

При более высоких напряжениях ( $|U| > 80$ – $100$  В) рост обратного тока объясняется туннелированием электронов через барьер, облегченным электрон-фононным взаимодействием и описывается выражениями [2–5]

$$I_t \propto \exp(\mathcal{E}^2/\mathcal{E}_c^2), \quad (10)$$



**Рис. 5.** Температурная зависимость обратных вольт-амперных характеристик  $p^+ - i - n^+$ -диодов на основе нелегированного GaAs в координатах  $\ln I$  от  $\mathcal{E}^2$ . На вставке — температурная зависимость времени релаксации  $\tau_2$  и  $\hbar/2kT$ .

где

$$1/\mathcal{E}_c^2 = \frac{\tau_2^3 e^2}{3m_n^* \hbar}, \quad (11)$$

$$\tau_2 = \frac{\hbar}{2kT} \pm \frac{\hbar}{2\hbar\omega} \ln \left( \frac{S_c \hbar\omega}{E_{дф}} \right), \quad (12)$$

$\mathcal{E}$  — электрическое поле,  $\hbar\omega$  — энергия фонона,  $S_c$  — некоторая константа.

На рис. 5 обратные ВАХ представлены в координатах  $\ln I$  от  $\mathcal{E}^2$ . Максимальную напряженность электрического поля рассчитывали по формуле [1]

$$\mathcal{E} = \frac{2(U_c + U)}{d(U)}. \quad (13)$$

Для рассматриваемого интервала напряжений  $U_c \ll U$ . В соответствии с формулами (10) и (11) из наклона ВАХ, представленных на рис. 5, нашли время релаксации  $\tau_2 = (4.2 - 4.6) \cdot 10^{-14}$  с.

Температурная зависимость  $\tau_2$  определяется первым членом в правой части формулы (12). На вставке к рис. 5 показаны температурные зависимости  $\hbar/2kT$  и  $\tau_2$ . Наклоны обеих зависимостей оказываются примерно одинаковыми, что говорит о справедливости предложенной модели. Так как кривая  $\tau_2(T)$  оказывается выше зависимости  $\hbar/2kT$ , в соответствии с [5] можно считать, что в исходном состоянии (слабые электрические поля) глубокие центры электронейтральны и приобретают положительный заряд после ионизации.

Поскольку слои GaAs не легированы, то предполагается, что роль глубоких центров, с которых происходит ионизация электронов, выполняют антиструктурные дефекты типа  $E2L$ -центров.

## 4.2. $p^+ - i - n^+$ — структуры, полученные на слоях GaAs, легированных хромом

Прямые ветви ВАХ  $p^+ - i - n^+$ -структур, полученных на слоях GaAs:Cr, обусловлены монополярной инжекцией в полупроводник, которая при больших прямых напряжениях переходит в двойную инжекцию. Последнее объясняет появление участка с отрицательным сопротивлением на ВАХ. На рис. 3, *a* и *b* ВАХ соответствуют случаю, когда все ловушечные центры при монополярной инжекции в полупроводник заполнены электронами. Ток пропорционален напряжению  $U^m$ , где  $m \gg 1$  [6]. В большинстве случаев для реальных кристаллов  $m \approx 7 - 8$ . При напряжениях  $U > 2$  В показатель степени  $m$  снижается до 2.3 (рис. 3, *b*), что соответствует переходу к механизму протекания инжекционных токов в безловушечном полупроводнике, когда  $I \propto U^2$  [6]. Однако для наших диодов  $m > 2$ , что может быть связано с наличием диффузионной составляющей тока вблизи инжектирующего контакта [6].

Тангенс угла наклона обратных ВАХ в области низких напряжений в двойном логарифмическом масштабе примерно равен 1 и ВАХ описываются законом Ома. Энергия активации роста тока составляет 0.21–0.23 эВ. Детальный анализ обратных вольт-амперных характеристик структур при больших напряжениях затруднен в силу того, что не известно реальное распределение электрического поля в базе диода. Как следует из рис. 4, обратные ВАХ при  $|U| > 70$  В изображаются прямыми в координатах  $\ln I$  от  $U$ , но в отличие от диодов первого типа наклон прямых не зависит от температуры. Предполагается, что для этих диодов в сильных электрических полях преобладает механизм ударной ионизации. Тогда, согласно работе [7],

$$I = I_\Omega / [1 - K_1 \exp(-A_1/\mathcal{E})], \quad (14)$$

где  $K_1$  и  $A_1$  — некоторые константы, а  $I_\Omega$  — ток на участке ВАХ, соответствующем закону Ома. При больших обратных напряжениях ОПЗ охватывает практически всю базу диода, и напряженность электрического поля  $\mathcal{E} \propto U^{1/2}$ . На вставке к рис. 4 измеренные значения тока приведены в координатах  $\ln(1 - I_\Omega/I) \propto U^{-1/2}$ . Спрямление данных в выше указанных координатах, начиная с  $|U| \geq 20$  В, может служить косвенным подтверждением предложенного механизма.

## 5. Заключение

Исследована температурная зависимость прямых и обратных вольт-амперных характеристик  $p^+ - i - n^+$ -структур двух типов, изготовленных на эпитаксиальных слоях арсенида галлия. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Вольт-амперные характеристики  $p^+ - i - n^+$ -структур определяются природой  $i$ -области.

2. Прямые токи диодов, изготовленных на нелегированных слоях GaAs, обусловлены рекомбинацией в области пространственного заряда. Обратные ВАХ при напряжениях до 10–15 В определяются генерационной составляющей тока. В более высоких электрических полях рост тока обусловлен ионизацией глубоких центров за счет эффекта Пула–Френкеля, который сменяется туннелированием электронов через вершину потенциального барьера, облегченным электрон-фононным взаимодействием.

3. Прямые ВАХ  $p^+ - i - n^+$ -диодов, полученных на эпитаксиальных слоях GaAs:Cr, объясняются монополярной инжекцией в полупроводник, которая при больших напряжениях сменяется двойной инжекцией. Обратные ВАХ в области малых напряжений описываются законом Ома, а при больших напряжениях ток определяется ударной ионизацией глубоких уровней.

Авторы выражают благодарность М.Д. Вилисовой за предоставление образцов и В.И. Гаману за помощь при обсуждении результатов.

## Список литературы

- [1] В.И. Гаман. *Физика полупроводниковых приборов* (Томск, Изд-во „НЛТ“, 2000).
- [2] С.Д. Ганичев, И.Н. Яссиевич, В. Преттл. *ФТП*, **39**, 1907 (1997).
- [3] П.А. Пипинис, А.К. Римейка, В.А. Лапейка, А.В. Пипинене. *ФТП*, **35**, 188 (2001).
- [4] В. Карпус, В.И. Перель. *ЖТФ*, **91**, 2319 (1986).
- [5] S.D. Ganichev, E. Ziemann, Th. Gleim, W. Prettl, I.N. Yassievich, V.I. Perel, I. Wilke, E.E. Haller. *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 2409 (1998).
- [6] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [7] А. Милнс. *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках* (М., Мир, 1977).

Редактор Т.А. Полянская

## The influence of deep impurity on electrical characteristics of GaAs epitaxial structures

V.M. Kalygina, E.S. Slunjko

Tomsk State University,  
634050 Tomsk, Russia

**Abstract** The analysis of electrical characteristics of  $p^+ - i - n^+$ -structures based on two types of GaAs epitaxial layers is carried out: the structures with  $i$ -layer based on undoped GaAs and  $i$ -layer based on GaAs:Cr. The forward currents of the first type diodes are caused by recombination in space charge region. The reverse current-voltage characteristics at biases up to 10–15 V are defined by the generation current. At  $|U| > 20$  V the current increase is determined by Poole–Frenkel effect which is changed by electron tunneling through the top of potential barrier as a result of electron-phonon interaction with voltage raising. The forward characteristics of  $p^+ - i - n^+$ -diodes with  $i$ -layer based on GaAs:Cr can be explained due to monopolarity injection in semiconductor which is changed by bipolarity injection with increasing bias. The reverse current-voltage are linear dependences in the range 1–15 V and the current increase is produced by impact ionization at  $|U| > 20$  V.