

Проводимость гетеропереходов Ga₂O₃–GaAs

© В.М. Калыгина, И.Л. Ремезова, О.П. Толбанов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

E-mail: Kalygina@ngs.ru

(Получена 29 марта 2017 г. Принята к печати 17 апреля 2017 г.)

Исследовано влияние отжига в аргоне при температурах $T_{\text{ан}} = 700\text{--}900^\circ\text{C}$ на вольт-амперные характеристики структур металл–Ga₂O₃–GaAs. Образцы получали термическим напылением порошка Ga₂O₃ на пластины GaAs с концентрацией доноров $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для измерений вольт-амперных характеристик напыляли металлические V/Ni электроды: верхний электрод на пленку Ga₂O₃ через маски с площадью $S_k = 1.04 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ (затвор) и нижний электрод к GaAs в виде сплошной металлической пленки. После отжига в аргоне при $T_{\text{ан}} \geq 700^\circ\text{C}$ структуры Ga₂O₃–*n*-GaAs приобретают свойства изотипных гетеропереходов *n*-типа. Показано, что проводимость структур при положительных потенциалах на затворе определяется термоэлектронной эмиссией из GaAs в Ga₂O₃. При отрицательных смещениях рост тока с повышением напряжения и температуры обусловлен термополевой эмиссией в арсениде галлия. В области сильных электрических полей преобладает туннелирование электронов через вершину потенциального барьера, облегченное фононами. Отжиг при высокой температуре не изменяет концентрацию электронов в оксидной пленке, но влияет на энергетическую плотность поверхностных состояний на границе GaAs–Ga₂O₃.

DOI: 10.21883/FTP.2018.02.45436.8597

1. Введение

Для успешного использования диэлектрических пленок в полупроводниковой электронике необходимо знать механизмы их проводимости. В таких приборах, как полевые транзисторы с индуцированным или встроенным каналом, элементах памяти, газовых сенсорах, фотодетекторах на основе МДП-структур и других, пленки диэлектриков наносятся на различные поверхности: металлические, полупроводниковые, керамические и т.д. В зависимости от устройства и материала диэлектрика проводимость пленок может определяться объемными свойствами либо свойствами контактов диэлектрика с другими материалами.

Электрические характеристики тонких слоев оксида галлия определяются методикой получения и последующими технологическими обработками, включающими температуру отжига, газовую атмосферу, в которой проводится термообработка, легирование различными элементами и т.д. Электропроводность пленок оксида галлия может меняться в широких пределах: от металлической до проводимости диэлектрических материалов [1].

Ранее было показано, что пленки оксида галлия, полученные термическим испарением порошка Ga₂O₃ на подложки арсенида галлия, находятся в аморфном состоянии и проявляют свойства диэлектрика. Образцы металл–Ga₂O₃–*n*-GaAs обнаруживают свойства структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП-структуры). После отжига в инертном газе при температурах $T_{\text{ан}} \geq 700^\circ\text{C}$ происходит постепенная кристаллизация и пленки переходят в поликристаллическое состояние, а структуры Ga₂O₃–*n*-GaAs приобретают свойства изотипных гетеропереходов *n*-типа [2].

В данной работе на основе результатов измерений температурных зависимостей вольт-амперных характе-

ристик (ВАХ) обсуждается механизм проводимости структур Ga₂O₃–*n*-GaAs после отжига при $T_{\text{ан}} \geq 700^\circ\text{C}$.

2. Методика эксперимента

Пленки оксида галлия толщиной $d = 100\text{--}120 \text{ нм}$ наносили на пластины электронного GaAs с концентрацией доноров $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Перед нанесением оксидной пленки пластины GaAs проходили стандартную химическую обработку, в процессе которой удаляются различные загрязнения и собственный окисел. После химической обработки на пластины арсенида галлия термическим методом напыляли пленку оксида галлия, в качестве исходного материала использовали порошок Ga₂O₃.

Подложку с нанесенной оксидной пленкой делили на несколько частей. Одну из них не подвергали отжигу, а остальные части подложки отжигали в аргоне в течение 30 мин при температуре $T_{\text{ан}} = 600, 700, 800$ либо 900°C . Изготовление образцов завершалось напылением металлических V/Ni электродов толщиной 150 нм (30/120 соответственно): верхнего управляющего электрода через маски с площадью $S_k = 1.04 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ на пленку Ga₂O₃ (затвор) и нижнего электрода в виде сплошной металлической пленки к GaAs.

Анализ поверхности пленок оксида галлия проводился с помощью атомного силового микроскопа „Solver HV“. Обработка полученных с АСМ микрофотографий осуществлялась с помощью программы „Nova“.

Измерение вольт-фарадных и вольт-сиemensных характеристик на частоте 10^6 Гц проводили с помощью измерителя E7-12, который при использовании специально разработанных программы и устройства позволял в автоматическом режиме в одном цикле измерять зависимости емкости и активной проводимости от напряжения на образце.

Прямые и обратные вольт-амперные характеристики измеряли с помощью автоматизированного комплекса, позволяющего записывать как зависимости тока от напряжения, так и временные зависимости изменений токов при внешних воздействиях.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Пленки оксида галлия после нанесения термическим испарением на полупроводниковые подложки имеют аморфную структуру. Неотожженные пленки и отожженные при $T_{\text{ан}} < 700^\circ\text{C}$ обладают высоким сопротивлением. Образцы металл–Ga₂O₃–GaAs обнаруживают свойства структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП-структуры) с присущими им особенностями поведения вольт-фарадных (ВФХ) и вольт-сиemensных характеристик (ВСХ) (рис. 1).

После отжига в течение 30 мин при $T_{\text{ан}} = 700^\circ\text{C}$ общий вид поверхности изменяется, в аморфной матрице появляются отдельные зерна кристаллической фазы [2]. Одновременно резко изменяется вид вольт-фарадных и вольт-сиemensных характеристик образцов.

При повышении $T_{\text{ан}}$ до 800°C на поверхности пленки появляются эллипсообразные зерна кристаллической

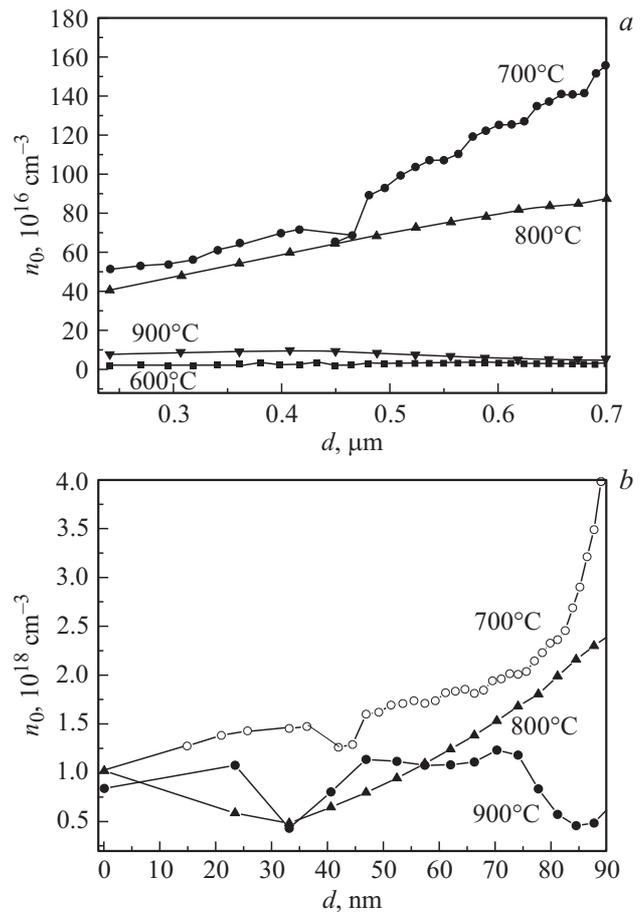


Рис. 2. Распределение концентрации носителей заряда по координате: *a* — в GaAs, *b* — в Ga₂O₃.

фазы шириной 70 нм и длиной 150 нм, ориентированные в одном направлении. После отжига при 900°C вся оксидная пленка становится поликристаллической. Двухмерные и трехмерные изображения поверхности пленки оксида галлия без отжига и после отжига в интервале $600\text{--}900^\circ\text{C}$ приведены в работе [2].

Влияние режимов отжига на электрические характеристики пленок Ga₂O₃ отслеживали по поведению образцов на переменном сигнале и по изменению вольт-амперных характеристик. Как показано на рис. 1, после отжига при $(700\text{--}900)^\circ\text{C}$ структуры Ga₂O₃/n-GaAs приобретают характеристики изотипных гетеропереходов *n*-типа.

Гетеропереход представляется в виде двух барьеров Шоттки, включенных навстречу друг другу. При этом предполагается, что напряжение, поданное на структуру, в основном падает на обратно смещенном барьере, и падением напряжения на втором барьере, который оказывается включенным в прямом направлении, можно пренебречь.

Известно, что вид вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик гетеропереходов зависит от соотношения концентраций в контактирующих материалах и плотности состояний на границе раздела [3].

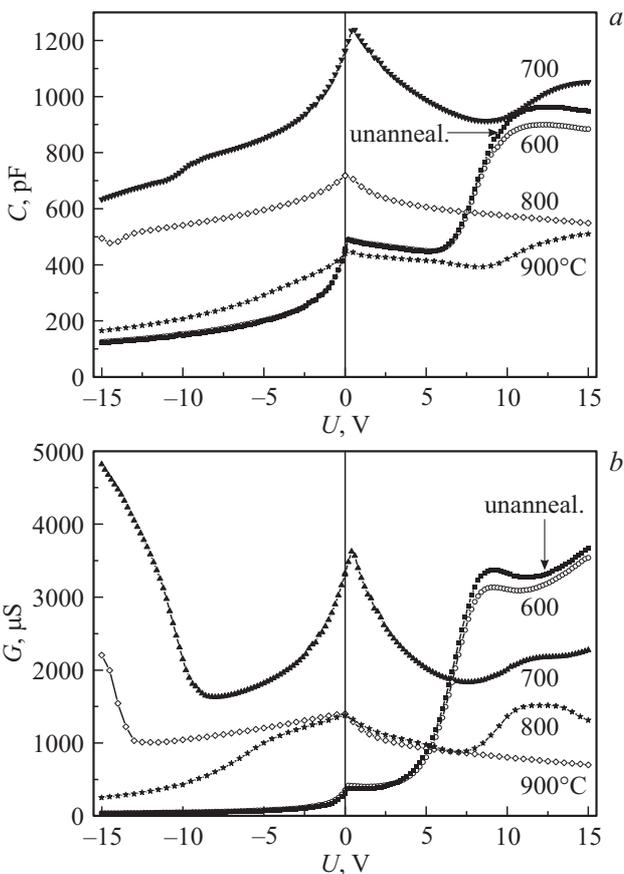


Рис. 1. Вольт-фарадные (*a*) и вольт-сиemensные (*b*) характеристики структур М–Ga₂O₃–n-GaAs в зависимости от температуры отжига.

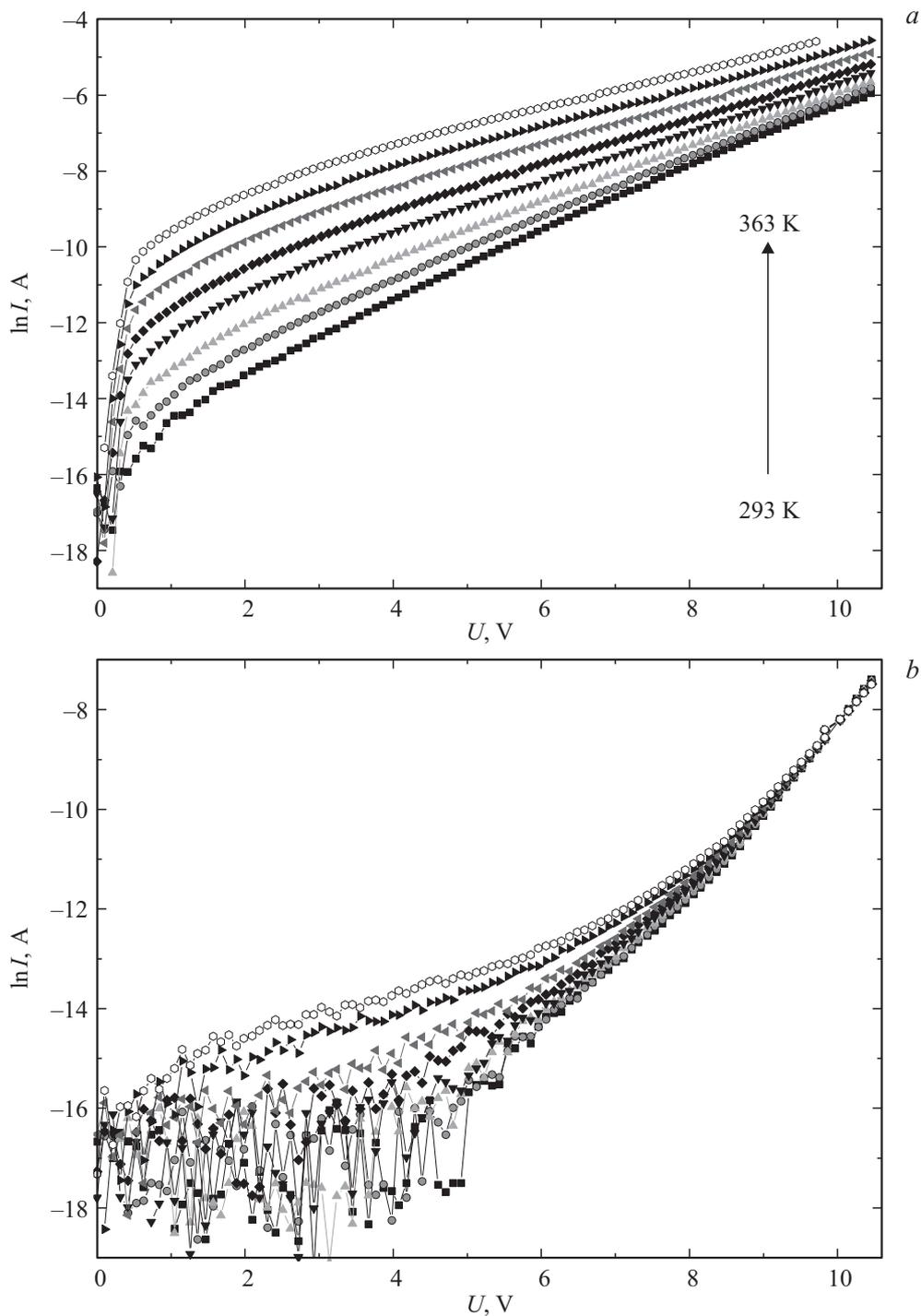


Рис. 3. Температурные зависимости вольт-амперных характеристик структур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$ после отжига при 700°C при положительных (а) и отрицательных (б) потенциалах на затворе.

Используя ВФХ, рассчитали концентрацию носителей заряда в оксидной пленке и полупроводнике (рис. 2). Однако линейная зависимость $1/C^2$ от обратного напряжения наблюдалась только для структур с пленкой оксида галлия без отжига и после отжига при 600°C . После отжига при более высоких температурах зависимость $1/C^2$ от U изображается сложной кривой. Рассчитанные значения N_d в GaAs после отжига при 700 и 800°C

существенно превышают исходную концентрацию n_0 и концентрации электронов в образцах без отжига и отожженных при низкой температуре.

Высокие рассчитанные значения N_d в GaAs, скорее всего, не являются истинными значениями, а объясняются влиянием поверхностных состояний N_s на границе $\text{Ga}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$, находящихся в равновесии с полупроводником [4,5].

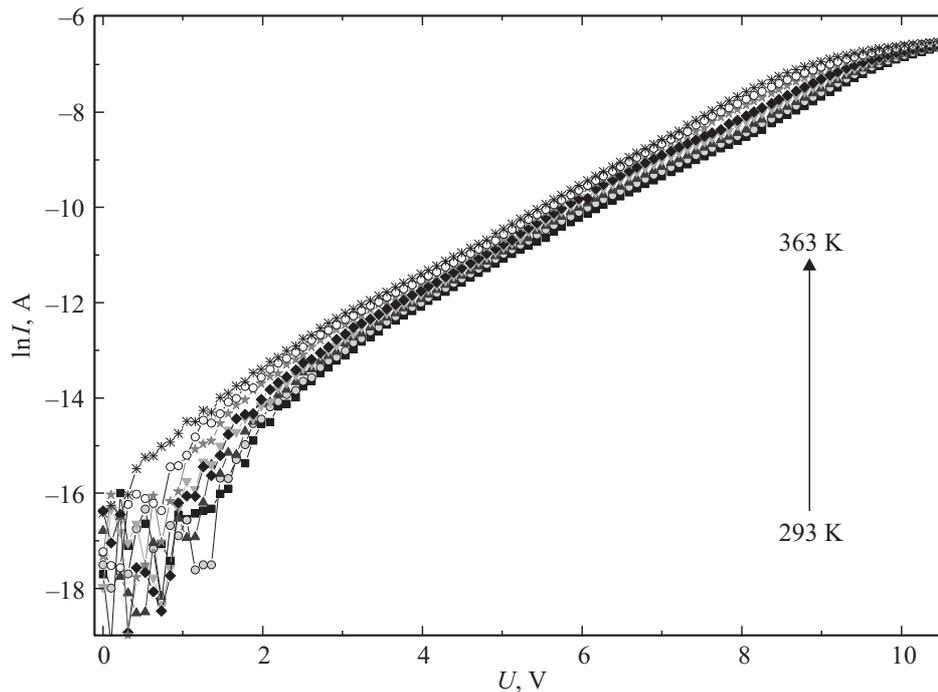


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики структуры Ga₂O₃/GaAs в интервале 293–363 К при положительных потенциалах на затворе после отжига при 900°С.

Отжиг при высокой температуре влияет на концентрацию электронов только в GaAs. После отжига при 700°С n_0 резко увеличивается по сравнению с исходной концентрацией, $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, и уменьшается при дальнейшем повышении температуры отжига (рис. 2, а).

Изменение структуры пленки Ga₂O₃ в результате отжига формирует новые N_s на границе оксидной пленки с полупроводником. При этом наибольшее расчетное значение N_d получено после отжига при 700°С, когда в аморфной пленке зарождаются отдельные зерна кристаллической фазы.

При удалении от границы раздела двух материалов концентрация электронов в оксидной пленке практически не изменяется, оставаясь в среднем равной $(1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствует данным, приводимым для монокристаллов и пленок оксида галлия в ряде работ [6–10]. Изменение плотности поверхностных состояний на границе Ga₂O₃–GaAs не оказывает существенного влияния на большие значения n_0 в оксидной пленке.

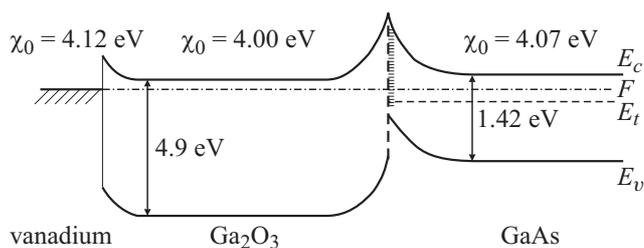


Рис. 5. Схематическое изображение энергетической диаграммы гетероперехода.

Вольт-амперные характеристики структур, отожженных при 700°С, показаны в полулогарифмических координатах на рис. 3.

После отжига при 800 и 900°С поведение вольт-амперных характеристик аналогично данным, приведенным на рис. 3. Наблюдалось лишь изменение абсолютных значений токов I при положительных и отрицательных потенциалах U на затворе.

Отжиг при 900°С, как правило, приводил к существенному снижению токов и уменьшению температурной зависимости I от U при положительных потенциалах на затворе (рис. 4).

Для выяснения механизма токов в образцах после отжига при $T_{\text{ан}} \geq 700^\circ\text{C}$ использовали схематическое изображение предполагаемой энергетической диаграммы с учетом значений ширины запрещенной зоны и электронного сродства (χ_0) контактирующих материалов (рис. 5).

Анализ вольт-амперных характеристик при положительных потенциалах на затворе показал, что наиболее вероятным механизмом протекания тока через переход Ga₂O₃/n-GaAs является термоэлектронная эмиссия через барьер Φ_b на границе Ga₂O₃–GaAs. Зависимость тока от напряженности электрического поля при эмиссии в диэлектрик описывается выражением [11,12]

$$I = S_k A^* T^2 \exp \left[\frac{-e(\Phi_b - \sqrt{e\mathcal{E}/4\pi\epsilon\epsilon_0})}{kT} \right], \quad (1)$$

где A^* — постоянная Ричардсона, T — абсолютная температура, e — заряд электрона, ϵ_0 — электрическая постоянная, ϵ — относительная диэлектрическая прони-

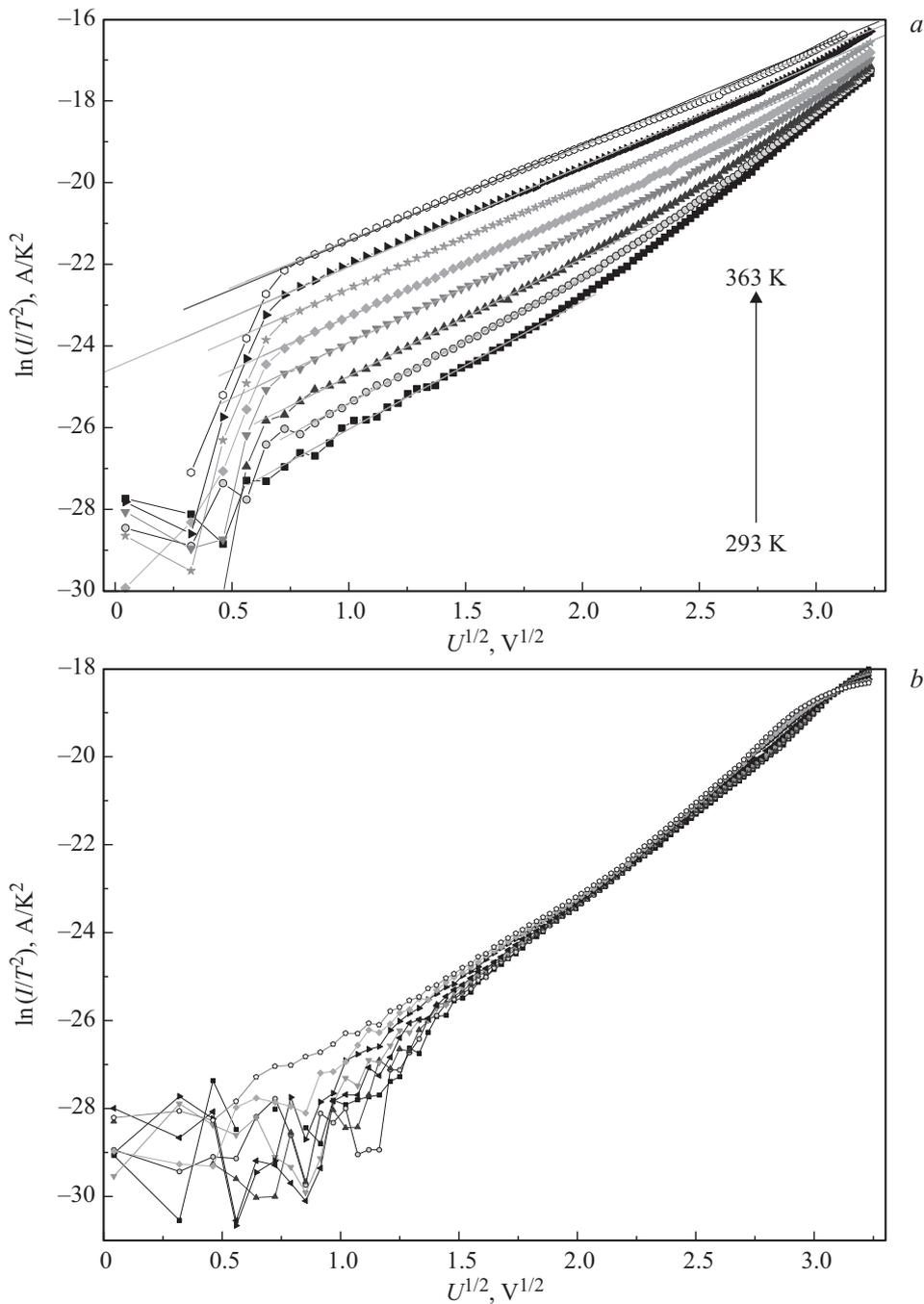


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики для образцов после отжига при 700°C (*a*) и 900°C (*b*) при положительных потенциалах на затворе.

цаемость оксидной пленки, k — постоянная Больцмана, \mathcal{E} — напряженность электрического поля.

На рис. 6 представлены температурные зависимости вольт-амперных характеристик в соответствии с формулой (1). Из этих данных по стандартной методике определена высота потенциального барьера $\Phi_b = (0.73 \pm 0.01)$ эВ на границе $\text{Ga}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$.

Как отмечалось выше, после отжига при 900°C пленка оксида галлия становится полностью поликристаллической с преобладанием кристаллитов β -фазы. В резуль-

тате изменяются условия на границе $\text{Ga}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$, что проявляется в снижении токов через структуру (ср. рис. 6, *a, b*).

Резкое уменьшение температурной зависимости токов при положительных потенциалах на затворе (рис. 6, *b*) свидетельствует о повышении вероятности туннелирования электронов через потенциальный барьер.

При отрицательных потенциалах на затворе напряжение в основном падает на GaAs, и барьер в полупроводнике оказывается смещенным в обратном направлении.

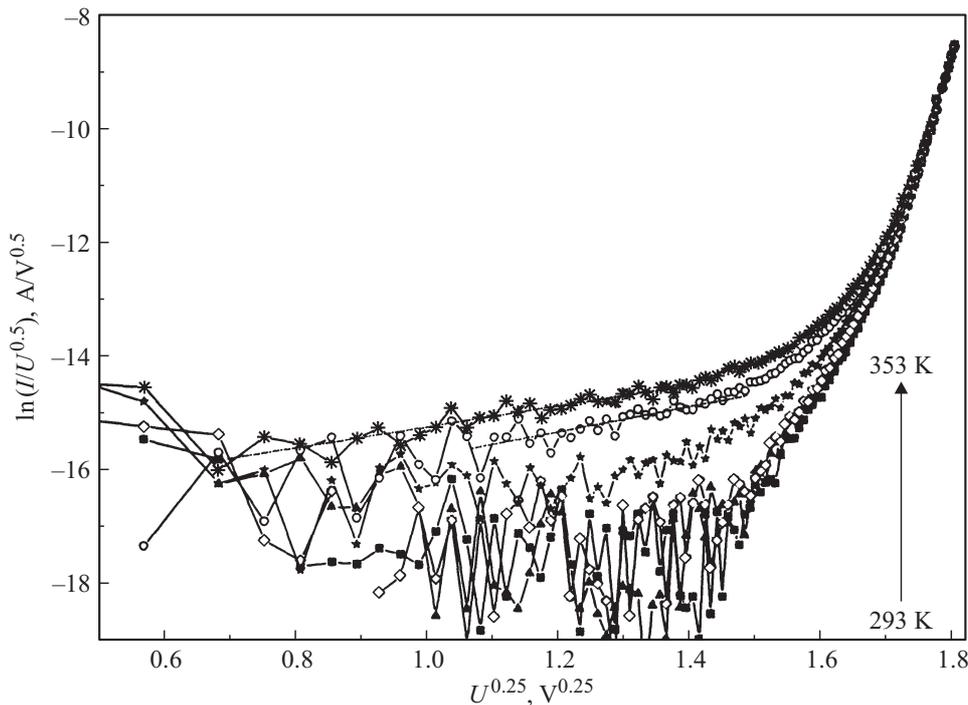


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики структуры в координатах Пула–Френкеля при отрицательных потенциалах на затворе ($T_{\text{ан}} = 700^\circ\text{C}$).

В интервале не очень больших отрицательных потенциалов на затворе рост тока с повышением напряжения и температуры определяется термополевой ионизацией электронов с ловушечных центров E_t в зону проводимости E_c : $\Delta E_t = E_c - E_t$ (эффект Пула–Френкеля). Зависимость тока от напряжения описывается выражением [11,12].

$$I = S_k e \mu N_c \mathcal{E} \exp \left[\frac{-e(\Delta E_t - \sqrt{e\mathcal{E}/4\pi\epsilon_s\epsilon_0})}{kT} \right], \quad (2)$$

где μ — дрейфовая подвижность электронов, N_c — эффективная плотность квантовых состояний в зоне проводимости арсенида галлия, ϵ_s — относительная диэлектрическая проницаемость арсенида галлия; остальные обозначения аналогичны формуле (1). Напряженность

Энергетическое положение ловушечных центров и время туннелирования электронов через вершину потенциального барьера в зависимости от температуры отжига

Температура отжига, °C	№ образца	$\Delta E_t = E_c - E_t$, эВ	$\tau_2, 10^{-13}$ с
700	4	0.71 ± 0.03	5.5
	9	0.72 ± 0.09	
800	4	0.44 ± 0.12	3.6
	5	0.42 ± 0.03	
	8	0.58 ± 0.08	
900	4	0.40 ± 0.08	2.7
	7	0.57 ± 0.09	

электрического поля рассчитывали по формуле

$$\mathcal{E}(U) = \sqrt{\frac{2en_0(U_k + U)}{\epsilon_s\epsilon_0}}, \quad (3)$$

где U_k — контактная разность потенциалов между затвором и полупроводником.

На рис. 7 экспериментальные данные представлены в координатах в соответствии с уравнением (2). Значения ΔE_t в зависимости от температуры отжига для нескольких образцов приведены в таблице.

Эффект Пула–Френкеля преобладает, как правило, при повышенных температурах в области промежуточных электрических полей и сменяется туннелированием электронов через вершину потенциального барьера, облегченного фононами, в сильных электрических полях. Из рис. 7 видно, что при достаточно больших напряжениях на структуре ток практически не зависит от температуры, что является косвенным подтверждением предполагаемого механизма. Зависимость плотности тока от электрического поля \mathcal{E} описывается соотношением [13–16]

$$I_t \sim \exp(\mathcal{E}^2/\mathcal{E}_0^2), \quad (4)$$

где

$$(\mathcal{E}_0)^{-2} = \frac{\tau_2^3 e^2}{3m_n^* \hbar}, \quad (5)$$

$$\tau_2 = \frac{\hbar}{2kT} - \frac{\hbar}{2\hbar\omega} \ln \left(\frac{S\hbar\omega}{\Delta E_t} \right), \quad (6)$$

τ_2 — время туннелирования электронов, ω — энергия фононов, S — некоторая постоянная, ΔE_t — энергия

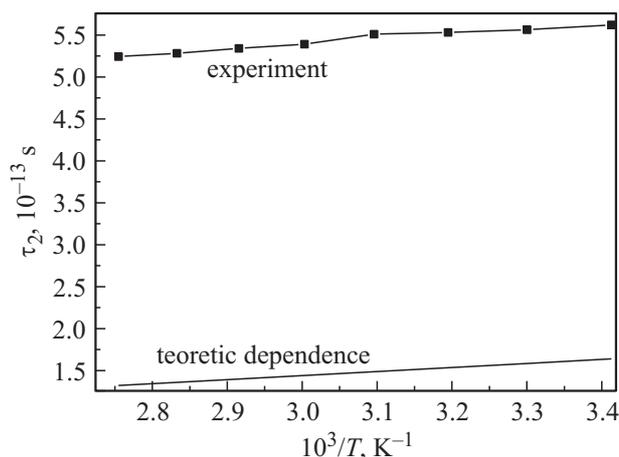


Рис. 8. Расчетная и экспериментальная температурные зависимости τ_2 .

активации глубоких центров, отсчитываемая от дна зоны проводимости E_c . Значения τ_2 приведены в таблице. Расчетная (6) и экспериментальная температурные зависимости τ_2 для образца № 9 после отжига при 700°C сравниваются на рис. 8.

4. Заключение

Изучено влияние термического отжига на структуру и электрические характеристики пленок оксида галлия, нанесенных термическим испарением в вакууме на пластины электронного арсенида галлия. Установлено, что после отжига при $T_{\text{an}} \geq 700^\circ\text{C}$ структура пленки изменяется от аморфной до поликристаллической, а образцы металл– Ga_2O_3 – n -GaAs проявляют свойства изотипных гетеропереходов n -типа.

Проводимость структур при положительных потенциалах на затворе определяется термоэлектронной эмиссией из GaAs в Ga_2O_3 и термополевой эмиссией в области пространственного заряда арсенида галлия при отрицательных потенциалах. В интервале сильных электрических полей преобладает туннелирование электронов через вершину потенциального барьера, облегченное фононами.

Температура отжига не изменяет концентрацию электронов в оксидной пленке, но влияет на энергетическую плотность поверхностных состояний на границе GaAs– Ga_2O_3 .

Авторы выражают благодарность И.А. Прудасеву за полезное обсуждение работы.

Список литературы

- [1] N. Ueda, H. Hosono, R. Wasseda, H. Kawazoe. Appl. Phys. Lett., **70**, 3561 (1997).
- [2] В.М. Калыгина, И.А. Прудасев, И.Л. Ремезова, О.П. Толбанов. ФТП, (в печати)

- [3] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. Полупроводниковые гетеропереходы (М., Сов. радио, 1979).
- [4] S. Ashok, J.M. Borrego, R.J. Gutman. Sol. St. Electron., **22**, 621 (1979).
- [5] M.K. Hudait, S.B. Krupanidhi. Sol. St. Electron., **44**, 1089 (2000).
- [6] F. Zhang, M. Arita, X. Wang, Z. Chen, K. Saito, T. Tanaka, M. Nishio, T. Motooka, Q. Guo. Appl. Phys. Lett., **109**, 102105 (2016).
- [7] F. Zhang, K. Saito, T. Tanaka, M. Nishio, Q. Guo. J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **26**, 9624 (2015).
- [8] E.G. Vllora, K. Shimamura, Y. Yoshikawa, T. Ujiie, K. Aoki. Appl. Phys. Lett., **92**, 202120 (2008).
- [9] M. Fleischer, J. Giber, H. Meixner. Appl. Phys. A, **54**, 560 (1992).
- [10] T. Oishi, K. Harada, Y. Koga, M. Kasu. Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 030305 (2016).
- [11] E.W. Lim, R. Ismail. Electronics, **4**, 586 (2015).
- [12] F.-C. Chiu. Advances Mater. Sci. Engin., **2014**, ID 578168, 18 p.
- [13] R. Brazis, P. Pipinys, A. Rimeika, L. Gegznaite. Sol. St. Commun., **55** (1), 25 (1985).
- [14] В.Н. Абакумов, В. Карпус, В.И. Перель, И.Н. Ясевич. ФТП, **22** (2), 262 (1988).
- [15] П.А. Пипинис, А.К. Римейка, А.В. Пипинене. ФТП, **35** (2), 188 (2001).
- [16] С.Д. Ганичев, И.Н. Ясевич, В. Преттл. ФТТ, **39** (11), 1905, (1997).

Редактор Г.А. Оганесян

Conductivity of Ga_2O_3 –GaAs heterojunctions

V.M. Kalygina, I.L. Remizova, O.P. Tolbanov

National Research Tomsk State University, 634050 Tomsk, Russia

Abstract Influence of annealing in argon at temperature $T_{\text{an}} = 700$ – 900°C on current-voltage characteristics (CVC) of Ga_2O_3 –GaAs structures was investigated. The samples were fabricated by thermal deposition of Ga_2O_3 powder on n -GaAs substrates with the donor concentration $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Metal V/Ni electrodes were deposited to measure electrical characteristics of the structures: electrode on the Ga_2O_3 film was deposited through masks with an area $S_k = 1.04 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ (gate) and lower electrode as continuous metallic film to GaAs. After annealing at $T_{\text{an}} \geq 700^\circ\text{C}$ Ga_2O_3 –GaAs structures gain characteristic of n -isotype heterojunctions. It is shown that conductivity of Ga_2O_3 –GaAs heterojunctions is determined by thermionic emission from GaAs in the oxide film at positive gate potentials. At negative voltage bias Ga_2O_3 –GaAs junction conductance is due to thermal field emission in GaAs. In the region of high electric fields tunneling of electrons through the top of potential barrier activated with phonons dominates. High temperature annealing does not change electron concentration in the oxide film, but affects on the energy density of interface states.