

УДК 538.971

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ЛАТЕРАЛЬНУЮ ОДНОРОДНОСТЬ Ti/InAlAs БАРЬЕРОВ ШОТТКИ

© 2024 г. И. Ю. Гензе^{1, 2, *}, М. С. Аксенов^{1, 2}, Д. В. Дмитриев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук», Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Новосибирск, Россия

*E-mail: genze@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 11.04.2024

После доработки 24.04.2024

Принята к публикации 31.05.2024

Изучено влияние температуры (300–450 °С) и времени (0–20 мин) отжига на параметры (высота барьера, коэффициент идеальности) и однородность Au/Pt/Ti/i(n)-In_{0.52}Al_{0.48}As(001) барьеров Шоттки. Однородность барьеров Шоттки определялась путем анализа температурных зависимостей параметров в диапазоне 80–350 К, а также графиков Ричардсона в рамках модели Танга.

Ключевые слова: InAlAs, барьер Шоттки, вольт-амперная характеристика, неоднородность, модель Танга

DOI: 10.31857/S0367676524090209, EDN: OCQTIC

ВВЕДЕНИЕ

Барьер Шоттки (БШ) Ti/i(n)-In_{0.52}Al_{0.48}As(001), используемый при создании СВЧ-транзисторов и фотодетекторов микроволнового диапазона [1, 2], во многом определяет характеристики работы, долговременную стабильность и надежность данных приборов. В этой связи важной технологической задачей является формирование однородной границы раздела с воспроизводимыми электрофизическими параметрами БШ (высота барьера ϕ_b , коэффициент идеальности n). Из-за высокой адгезии и низкого коэффициента диффузии для формирования БШ на основе InAlAs наиболее широко применяется Ti. Для близких к идеальному ($n < 1.1$) Ti/InAlAs БШ типичные значения ϕ_b составляют 0.64–0.71 эВ [3]. Как известно [4], помимо отклонения от теории термоэлектронной эмиссии (ТЭ), связанного с коэффициентом идеальности, в реальных БШ наблюдается низкотемпературная аномалия, которая выражается в уменьшении ϕ_b и увеличении n при уменьшении температуры измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ). В наиболее обоснованной и актуальной модели Танга [5], данный эффект объясняется введением локальных областей с отличающимися от основной площади контакта значениями ϕ_b и n . Причины возникновения таких областей, как правило, связывают с различными локальными неоднородностями [6]. Для Ti/InAlAs БШ ранее было показано, что

неоднородность высоты барьера напрямую связана с плотностью характерных ростовых структурных дефектов слоев InAlAs [7], сформированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [8]. Также известно, что отжиг может существенно изменять электрофизические параметры БШ и индуцировать твердотельные процессы [9, 10].

Графики Ричардсона являются актуальным и информативным инструментом для анализа однородности распределения высоты БШ [11–14]. При их линейной аппроксимации можно определить значения высоты барьера и постоянную Ричардсона. Наблюдающееся при низких температурах отклонение от линейной зависимости связано с влиянием неоднородности высоты барьера. При модификации в рамках модели Танга графики Ричардсона, как правило, спрямляются в области низких температур, что позволяет определить высоту однородного барьера [3]. К настоящему моменту анализ на основе графиков Ричардсона изменения однородности электрофизических параметров для Ti/InAlAs БШ до и после температурного воздействия не проводился.

В данной работе было изучено влияние температуры (300–450 °С) и времени (0–20 мин) отжига на температурные (80–350 К) зависимости вольт-амперных характеристик ($I-V-T$) и однородность Au/Pt/Ti/i(n)-In_{0.52}Al_{0.48}As(001) БШ в рамках модели Танга [5].

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Дизайн используемых гетероструктур, а также особенности формирования мезоструктур и омического контакта подробно описаны в работах [7, 10]. БШ диаметром 50 мкм формировались методом взрывной фотолитографии слоями Au/Pt/Ti (200/30/80 нм), которые осаждались методами электронно-лучевого (Ti) и резистивного (Pt, Au) испарения. Поверхность мезоструктур пассивировали слоем SiO₂ (200 нм) при температуре 250 °С. Отжиг проводили в проточной камере в атмосфере формовочного газа (95% N₂, 5% H₂). Измерения темновых ВАХ проводили в термостатированной камере с контролем температуры с помощью анализатора полупроводниковых приборов Keysight B1500A. ϕ_b и n определяли стандартно в рамках теории ТЭ с использованием значений постоянной Ричардсона $R = 10.1 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$ [7] и площади контакта $A = 1.963 \cdot 10^5 \text{ см}^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены графики средних значений ϕ_b (а) и n (б) в зависимости от продолжительности отжига при различных температурах. Усреднение проводилось по данным (пустые квадраты) для не менее трех различных контактов. БШ до отжига (0 мин) характеризовались типичными для Ti/InAlAs значениями $\phi_b = 0.69\text{--}0.7 \text{ эВ}$ при $n = 1.08\text{--}1.12$.

Отжиг при температурах 300 (кривая 1) и 350 °С (кривая 2) схожим образом воздействует на параметры БШ (рис. 1а и 1б). После 5 мин отжига наблюдается увеличение ϕ_b на 0.1 эВ, при этом n уменьшается до значений 1.06–1.09. При последующем отжиге (10–20 мин) при 300 °С ϕ_b практически не изменяется, а при 350 °С плавно уменьшается до изначального значения 0.69 эВ. При этом n не изменяется для обеих температур. При повышении температуры отжига до 400 °С (кривая 3) в первые 5–10 мин наблюдается линейный рост параметров ϕ_b и n до значений 0.73 эВ и 1.3 соответственно. Далее (10–20 мин) параметры значительно не изменяются. На рис. 1в

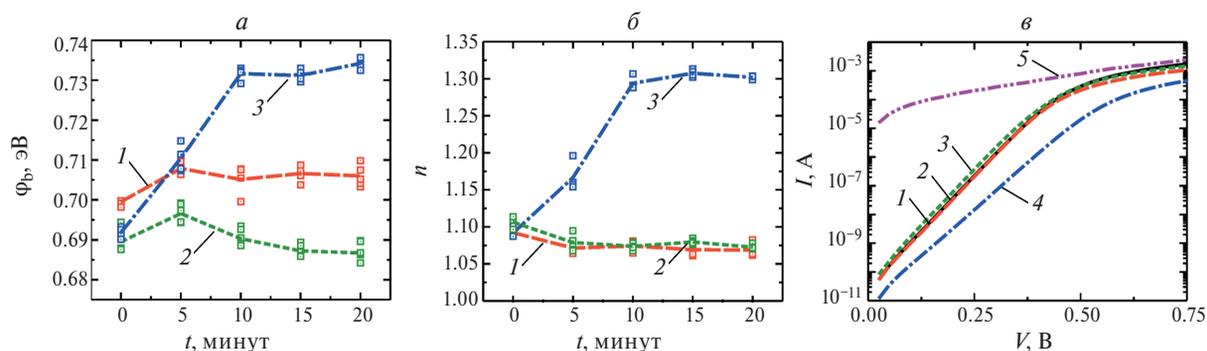


Рис. 1. Зависимость высоты барьера ϕ_b (а) и коэффициента идеальности n (б) от времени отжига t при температурах 300 (кривая 1), 350 (кривая 2) и 400 °С (кривая 3). Прямые ветви зависимостей тока I от напряжения V для Ti/InAlAs БШ до отжига (кривая 1), а также отожженных в течение 20 мин при температурах 300 °С (кривая 2), 350 °С (кривая 3), 400 °С (кривая 4) и 450 °С (кривая 5).

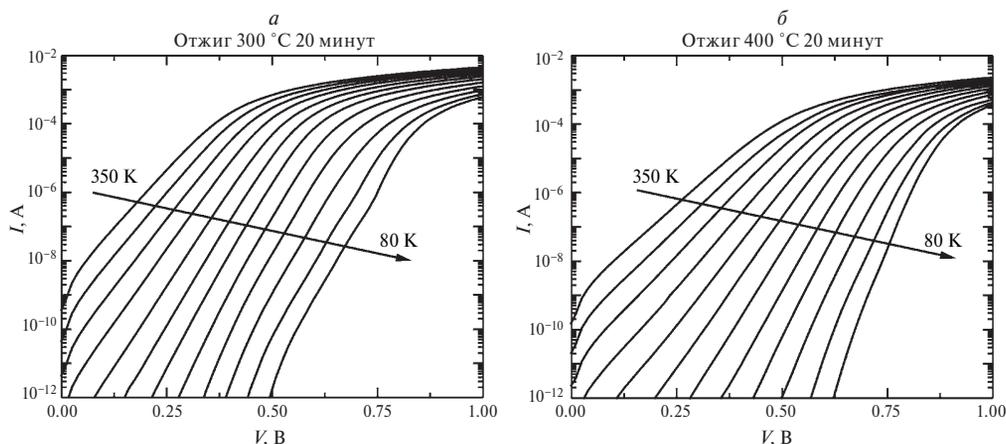


Рис. 2. Прямые ветви зависимостей тока I от напряжения V для Ti/InAlAs БШ, отожженных при температуре 300 °С (а) и 400 °С (б) в течение 20 мин, измеренные при температуре 80 К, затем от 100 до 350 с шагом 25 К.

в полулогарифмическом масштабе приведены характерные прямые ветви ВАХ исходных (кривая 1) и отожженных в течение 20 мин при различных температурах (кривые 2–5) структур с БШ. Внешний вид ВАХ существенно не изменяется при температурах отжига до 350 °С включительно, а при 400 °С значение тока уменьшается на порядок и наблюдается увеличение наклона прямой, что связано с повышением ϕ_b и n . Для 450 °С отжига параметры не рассчитывались поскольку уже через 5 мин происходила деградация БШ.

Для изучения влияния отжига на неоднородность БШ были измерены $I-V-T$ зависимости (80–350 К) для образцов с БШ не подвергавшихся отжигу и отожженных при температурах 300 °С (рис. 2а) и 400 °С (рис. 2б) в течение 20 минут. На рис. 3 представлены соответствующие данным образцам зависимости параметров ϕ_b и n от температуры [ϕ_b-T (кривая 1) и $n-T$ (кривая 2)] для БШ после отжига при 300 (а) и 400 °С (б). Значения ϕ_b и n получены при анализе токов в диапазоне 10^{-10} – 10^{-5} А. Зависимости для БШ до отжига существенно не отличаются от структур, отожженных при 300 °С, и поэтому не представлены. Таким образом, отжиг при 300 °С продолжительностью до 20 минут не приводит к существенным изменениям количества (площади) неоднородностей и/или высоты их локального барьера по сравнению с исходными БШ. В совокупности с данными работы [7] можно сделать вывод, что неоднородность в этом случае преимущественно определяется ростовыми структурными дефектами на исходной поверхности InAlAs.

При относительно высоких температурах (> 225 К) зависимости ϕ_b-T и $n-T$ во всех случаях демонстрируют плато со слабым изменением параметров (рис. 3). Это хорошо коррелирует с теорией ГЭ [4], так как при данных температурах, в основном, протекание тока определяется однородным контактом с соответствующими значениями ϕ_b и n . При понижении

температуры заметный вклад начинают вносить локальные области с более низкими значениями высоты барьера, что вызывает уменьшение эффективных значений ϕ_b и увеличение эффективных значений n (рис. 3), определенных из прямых ветвей ВАХ (рис. 2). Для образцов, отожженных при 400 °С, изменение параметров БШ начинается при более низкой температуре и меньше по абсолютной величине, что свидетельствует об улучшении однородности БШ.

При температурах ниже 225 К зависимости ϕ_b-T и $n-T$ (рис. 3) хорошо описываются моделью Танга [5], предполагающей гауссово распределение вводимого параметра неоднородных областей, который зависит от линейного размера и величины уменьшения высоты барьера относительно однородной области БШ. Таким образом, значение стандартного отклонения гауссова распределения (σ) данного параметра косвенно указывает на степень неоднородности БШ. Детали расчета значения σ описаны в работе [3]. Рассчитанные значения σ для БШ, отожженных при 300 и 400 °С в течение 20 мин составляют $1.2 \cdot 10^{-4}$ и $8.3 \cdot 10^{-5}$ см^{2/3}·В^{1/3} соответственно. Таким образом, в отличие от 300 °С, 20 мин отжиг при 400 °С, приводит к заметному (в 1.5 раза) снижению значения σ по сравнению с изначальным. В рамках модели Танга этот эффект можно интерпретировать как уменьшение площади, занимаемой областями с пониженной высотой барьера, и/или уменьшение разницы в высоте барьера ($\Delta\phi_b$) между этими областями и однородным БШ. Данное улучшение однородности контакта Шоттки, согласно работам [9, 10], может быть связано с происходящими при тех же условиях отжига твердотельными реакциями с образованием слоя TiAs и формированием новой физической границы раздела Ti/TiAs. Отметим, что дополнительным аргументом [3] к использованию модели Танга является наличие линейной зависимости ϕ_b от n при температурах 80–200 К (на вставках к рис. 3а и 3б).

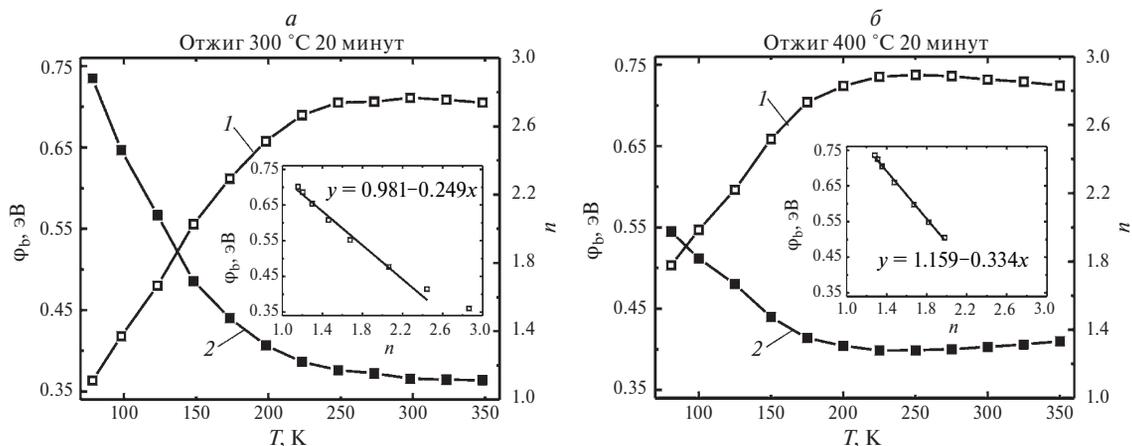


Рис. 3. Температурные зависимости высоты барьера (ϕ_b-T , кривая 1) и коэффициента идеальности ($n-T$, кривая 2) для Ti/InAlAs БШ, отожженных при температуре 300 °С (а) и 400 °С (б) в течение 20 мин. На вставках зависимость ϕ_b-n .

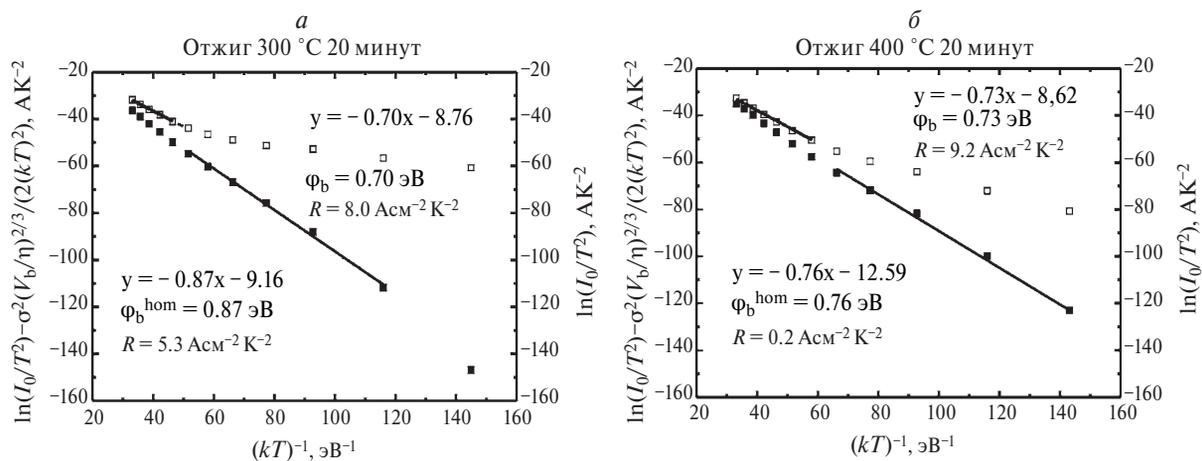


Рис. 4. Графики Ричардсона для Ti/InAlAs БШ, отожженных при температуре 300 °С (а) и 400 °С (б) в течение 20 мин, в рамках теории ТЭ (пустые квадраты) и модели Танга (заполненные квадраты).

Графики Ричардсона в рамках теории ТЭ (пустые квадраты) и модели Танга (заполненные квадраты) представлены на рис. 4 соответственно для БШ отожженных при температуре 300 (а) и 400 °С (б).

В случае БШ после отжига при температуре 300 °С (рис. 4а) для немодифицированного графика зависимость линейна только в диапазоне температур 250–350 К. Наклон и точка пересечения аппроксимирующей кривой дают значения $\phi_b = 0.70$ эВ, хорошо согласующееся с теорией ТЭ, и $R = 8.0 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$, близкое к теоретическому ($10.1 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$). Модифицированный график имеет линейную зависимость в диапазоне температур 100–225 К. Аппроксимация при этих температурах дает значение $\phi_b^{\text{hom}} = 0.87$ эВ, что хорошо согласуется с результатом для схожего неотожженного Ti/InAlAs БШ [3], и $R = 5.3 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$.

В случае БШ, отожженных при температуре 400 °С (рис. 4б), немодифицированный график имеет линейную зависимость в большем диапазоне температур (200–350 К), а отклонение при низких температурах выражено слабее. Рассчитанные значения ϕ_b и R составляют 0.73 эВ и $9.2 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$ соответственно. Значение составляет 0.76 эВ, а модифицированная постоянная R имеет значение $0.2 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$, что значительно меньше теоретического.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было показано, что отжиг продолжительностью до 20 мин при температурах до 350 °С практически не влияет на абсолютные значения и однородность распределения параметров Au/Pt/Ti/i(n)-In_{0.52}Al_{0.48}As(001) барьеров Шоттки. Отжиг при температуре 400 °С (10 минут) приводит к увеличению высоты барьера ϕ_b и коэффициента идеальности n до значений 0.73 эВ и 1.3 соответственно. Анализ температурных зависимостей

параметров в рамках модели Танга показал, что в результате 400 °С отжига происходит существенное уменьшение значения σ с $1.2 \cdot 10^{-4}$ до $8.3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{2/3} \cdot \text{В}^{1/3}$. На основе модифицированных графиков Ричардсона было показано, что при этом происходит уменьшение однородной высоты барьера Шоттки с 0.87 до 0.76 эВ, однако существенно уменьшается разница между измеряемой ϕ_b и однородной высотой барьера (с 0.17 до 0.03 эВ). Таким образом отжиг (400 °С, 20 мин) значительно уменьшает влияние (плотность) локальных областей с пониженной высотой барьера и приводит к улучшению латеральной однородности Au/Pt/Ti/i(n)-In_{0.52}Al_{0.48}As(001) барьеров Шоттки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Takahashi T., Kawano Y., Makiyama K. et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. V. 64. No. 1. P. 89.
2. Чиж А.Л., Микитчук К.Б., Журавлев К.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 14. С. 52; Chizh A.L., Mikitchuk K.B., Zhuravlev K.S. et al. // Tech. Phys. Lett. 2019. V. 45. P. 739.
3. Chistokhin I.B., Aksenov M.S., Valisheva N.A. et al. // Mater. Sci. Semicond. Process. 2018. V. 74. P. 193.
4. Rhoderick E.H., Williams R.H. Metal-semiconductor contacts. Oxford: Clarendon Press, 1988. P. 57.
5. Tung R.T. // Phys. Rev. B. 1992. V. 45. No. 23. Art. No. 13509.
6. Gammon P.M., Pérez-Tomás A., Shah V.A. et al. // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. No. 22. Art. No. 223704.
7. Чистохин И.Б., Аксенов М.С., Валишева Н.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 4. С. 59; Chistokhin I.B., Aksenov M.S., Valisheva N.A. et al. // Tech. Phys. Lett. 2019. V. 45. No. 2. P. 180.

8. *Dmitriev D.V., Valisheva N.A., Gilinsky A.M. et al. // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. V. 475. Art. No. 012022.*
9. *Wang L., Adesida I. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. No. 2. Art. No. 022110.*
10. *Aksenov M.S., Genze I.Yu., Chistokhin I.B. et al. // Surf. Interfaces. 2023. V. 39. Art. No. 102920.*
11. *Korucu D., Turut A. // Int. J. Electron. 2014. V. 101. No. 11. P. 1595.*
12. *Helal H., Benamara Z., Comini E. et al. // Eur. Phys. J. Plus. 2022. V. 137. No. 4. Art. No. 450.*
13. *Özdemir A.F., Göksu T., Yıldırım N., Turut A. // Phys. B. Cond. Matter. 2021. V. 616. No. 1. Art. No. 413125.*
14. *Jabbari I., Baira M., Maaref H., Mghaieth R. // Chin. J. Phys. 2021. V. 73. P. 719.*

Influence of annealing on the lateral homogeneity of Ti/InAlAs Schottky barriers

I. Yu. Genze^{1, 2, *}, M. S. Aksenov^{1, 2}, D. V. Dmitriev¹

¹*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*
²*Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia*
**e-mail: genze@isp.nsc.ru*

The influence of temperature (300–450 °C) and time (0–20 min) of annealing on the parameters (barrier height, ideality coefficient) and homogeneity of Au/Pt/Ti/i(n)-In_{0.52}Al_{0.48}As(001) Schottky barriers was studied. The homogeneity of the Schottky barriers was determined by analyzing the temperature dependences of the parameters in the range of 80–350 K, as well as Richardson plots within the framework of the Tung model.

Keywords: InAlAs, Schottky barrier, current-voltage characteristic, inhomogeneity, Tung model