

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК НА ПОДЛОЖКЕ Ni/Cu И Ni/GaAs

А. А. Родионова¹, В. В. Филиппов^{2,3,4}

¹ — *Елецкий государственный университет имени И. А. Бунина;*

² — *Липецкий государственный технический университет;*

³ — *Липецкий государственный педагогический университет
имени П. П. Семенова-Тян-Шанского;*

⁴ — *Московский государственный университет технологий и управления
имени К. Г. Разумовского, Липецкий филиал*

Поступила в редакцию 15.07.2025 г.

Аннотация. Внедрение тонкопленочных магнитных материалов на подложках в микро- и нанoeлектронику требует детального понимания их зонной структуры и термоэлектрических явлений, возникающих на контактах. В статье представлены современные исследования в этой области, подчеркивающие актуальность работы и степень изученности темы. Для моделирования энергетической структуры контактов Ni/GaAs использована модель Шоттки-Мотта, дополненная поправками на поверхностные состояния и температурные эффекты. В рамках моделей Шоттки и Андерсона проанализировано влияние оксидного промежуточного слоя на электронные состояния системы, а также термоэлектрические эффекты Томсона и Пельтье. Исследованы особенности взаимодействия металлических и полупроводниковых подложек с тонкопленочными структурами. Рассмотрены случаи применения как вырожденных, так и невырожденных полупроводниковых подложек, что позволило выявить ключевые закономерности в формировании контактных явлений.

Ключевые слова: зонные диаграммы, термоЭДС, барьер Шоттки, эффект Пельтье.

MODELING OF THERMOELECTRIC PROPERTIES OF STRUCTURES BASED ON FERROMAGNETIC FILMS ON Ni/Cu AND Ni/GaAs SUBSTRATES

A. A. Rodionova, V. V. Filippov

Abstract. The integration of thin-film magnetic materials on substrates into micro- and nanoelectronics requires a detailed understanding of their band structure and thermoelectric phenomena arising at the interfaces. The article presents current research in this field, highlighting the relevance of the work and the extent of prior studies. The Schottky-Mott model, supplemented with corrections for surface states and temperature effects, was used to simulate the energy structure of Ni/GaAs contacts. Within the framework of the Schottky and Anderson models, the influence of an oxide intermediate layer on the electronic states of the system, as well as the thermoelectric Thomson and Peltier effects, was analyzed. The features of interaction between metallic and semiconductor substrates with thin-film structures were investigated. Cases involving both degenerate and non-degenerate semiconductor substrates were examined, revealing key patterns in the formation of contact phenomena.

Keywords: nickel films, band diagrams, thermo-EMF, Schottky barrier, Peltier effect.

ВВЕДЕНИЕ

Современная микро- и нанoeлектроника требуют совершенствования существующих контактных структур и создание качественно новых квантовых устройств. Основным структурным элементом современной технологической базы электроники является контакт металл-полупроводник (металл-оксид-полупроводник), поэтому исследования влияния подложки на критические явления в низкоразмерных системах очень важны [1]. Наноконтакты на основе никеля (Ni), меди (Cu) и арсенида галлия (GaAs) весьма распространены в электронике ввиду их механических, химических и электрических параметров. Особый интерес вызывает их применение в высокопроизводительных электронных устройствах, где ключевую роль играют электрофизические и магнитные свойства. Моделирование энергетических структур таких контактов позволяет оптимизировать их параметры, что согласуется с актуальными задачами создания материалов с управляемыми характеристиками для квантовых технологий и термоэлектрических преобразователей [2, 3].

Для получения никелевых плёнок могут быть использованы различные методы вакуумного и химического осаждения. Среди наиболее распространённых технологических подходов следует выделить: магнетронное распыление, молекулярно-лучевую эпитаксию, электрохимическое осаждение и термовакуумное напыление [6, 8–10]. Данные методы позволяют контролировать морфологию и структурное совершенство формируемых слоёв, что является критически важным для обеспечения заданных функциональных свойств контактов.

В данной статье рассматривается моделирование энергетических контактных структур Ni/Cu и Ni/GaAs, которые имеют непосредственное отношение к проводимости и другим электрическим свойствам [4,5,6]. Моделирование этих структур критически важно для понимания поведения контактов и их влияния на работу устройств.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КОНТАКТА Ni/Cu

Металлические наноструктурированные контакты системы Ni/Cu имеют особое значение в микроэлектронике, а также при создании металлических соединений с улучшенной электропроводностью и повышенной термической стабильностью. Моделирование энергетической структуры позволяет исследовать изменение проводимости и контактного сопротивления при взаимном влиянии никеля и меди [7]. Важными аспектами, которые следует учитывать при моделировании, являются взаимная диффузия атомов двух металлов на наноразмерном уровне, а также формирование межфазного слоя между Ni и Cu, который может существенно влиять на электрофизические и термодинамические характеристики контактов.

Графическая иллюстрация энергетической структуры контакта Ni/Cu, представленная на рис. 1, демонстрирует характерные особенности электронного взаимодействия в межфазной области [11]. В исходном состоянии наблюдается разница работ выхода материалов: $\Phi_{\text{Ni}} \approx 5,0$ эВ для никеля и $\Phi_{\text{Cu}} \approx 4,7$ эВ для меди. После образования контакта происходит выравнивание уровней Ферми, устанавливающее единый электрохимический потенциал по всей системе.

В переходной области толщиной 0,6–2 нм, что подтверждается расчетными и экспериментальными данными, отмечается плавный изгиб зон проводимости без образования запрещенной зоны. Этот процесс сопровождается частичным смешением электронных орбиталей Ni(3d) и Cu(3d), формирующий гибридные состояния на границе раздела. Важным отличием от системы Ni/GaAs является отсутствие выраженного барьера Шоттки, а также наличие незначительного дипольного слоя с потенциалом около 0,3 эВ на межфазной границе.

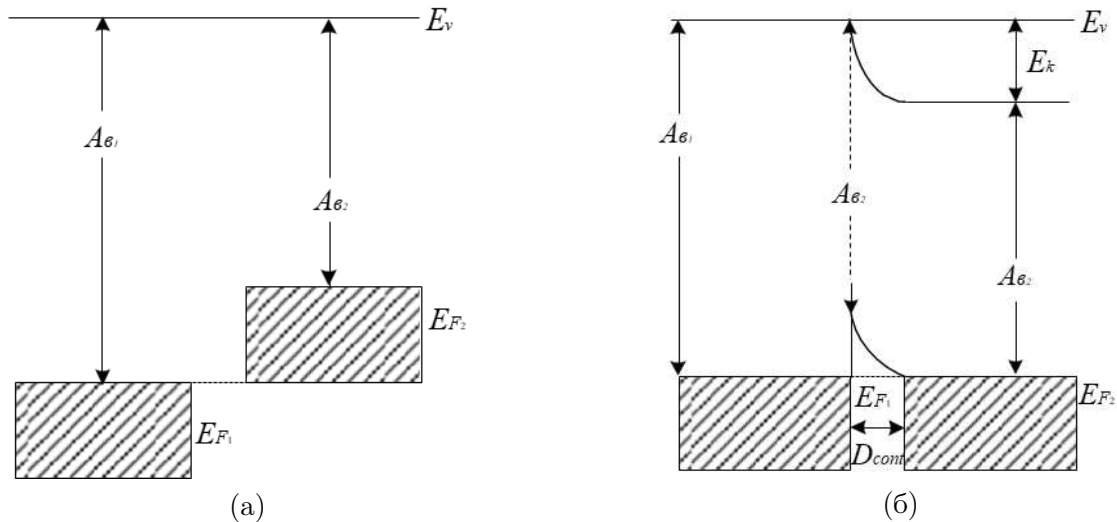


Рис. 1. Зонная диаграмма структуры Ni/Cu: а) до контакта; б) после контакта.

Следует отметить, что для субмикронных размеров в системе Ni/Cu изгиб зон не превышает 0,1 эВ и характеризуется плавным пространственным изменением, что подтверждается результатами расчетов методом функционала плотности [12]. Данные особенности электронной структуры существенно влияют на транспортные свойства металлического контакта [13] и его поведение в рабочих условиях [14]. Для металлических контактов (Ni-Cu) толщина барьерного слоя (d) определяется по формуле [12,13]:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\Delta\varphi}{e^2D(E_F)}}, \quad (1)$$

где: $D(E_F)$ — плотность состояний на уровне Ферми, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (электрическая постоянная), $\varepsilon \approx 1$ (относительная диэлектрическая проницаемость для металлов), $\varphi_0 = \Phi_{\text{Ni}} - \Phi_{\text{Cu}} = 5,0 - 4,7 = 0,3$ эВ (контактная разность потенциалов), $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (заряд электрона), $N \approx 8,5 \cdot 10^{28}$ м³ (концентрация электронов в меди). Получаем для структуры Ni/Cu $d \sim 0,8$ нм.

Расчет толщины барьерного слоя (d) для системы Ni/Cu определяется согласно модели Родерика для металлических контактов:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_0}{eN}}, \quad (2)$$

получаем $d \approx 0,62$ нм.

Расчет толщины барьера согласуется с экспериментами [14] и моделью [12]. Экспериментальные данные обычно показывают большие значения из-за возникающих поверхностных дефектов, примесей на границе и термического воздействия при осаждении [14, 15]. Для точных расчетов необходимо учитывать реальную концентрацию дефектов (N_d), температурные эффекты, а также кристаллографическую ориентацию поверхностей.

В модели Шоттки-Мотта, при контакте уровни Ферми (E_F) Ni и Cu выравниваются. Разница работ выхода ($\Phi_{\text{Ni}} \approx 5,0$ эВ, $\Phi_{\text{Cu}} \approx 4,7$ эВ) создает контактную разность потенциалов [12, 13]. В металлических контактах электроны рассеиваются на дефектах переходной зоны, адаптируясь к изменению плотности состояний у уровня Ферми, где формируется переходная область ($\sim 1-10$ нм) и происходит частичное смешение электронных состояний. На границе

наблюдается незначительное плавное изменение энергии электронных состояний зон в переходной области, а кроме того, возможно образование дипольного слоя.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ Ni/GaAs

Модель электронной структуры Ni/GaAs существенно отличается от системы Ni/Cu: если в первой формируется потенциальный барьер Шоттки, то в случае Ni/Cu наблюдается плавное сопряжение электронных зон, характерное для металлических соединений.

Наноконтакты Ni/GaAs играют важную роль в производстве полупроводниковых устройств и светодиодов [16]. Моделирование энергетической структуры таких контактов позволяет изучить взаимодействие между металлом и полупроводником, а также определить механизмы образования барьеров Шоттки. Ключевыми аспектами моделирования Ni/GaAs являются энергетические уровни и профили потенциальной энергии на границе раздела между металлоидами. Важно учитывать воздействие внешних факторов, таких как температура и напряжение, на стабильность контактной структуры [17, 18].

Сравнительный анализ энергетических диаграмм контактов Ni/GaAs по модели Шоттки-Мотта [4, 19] представлен на рисунке 2.

Таблица 1. Ключевые энергетические параметры материалов.

Параметр	Ni	GaAs
Работа выхода электрона из металла (Φ_m)	5,0 эВ	-
Энергия электронного сродства (X_S)	-	4,07 эВ
Ширина запрещенной зоны полупроводника (E_g)	-	1,42 эВ

На графической иллюстрации (рис. 2) эволюции зонных диаграмм идеальных контактов никеля к полупроводникам GaAs наблюдается “изгиб” зон в приповерхностной области, наряду с этим происходит смещение уровня Ферми к середине запрещенной зоны [12, 20].

Реальные характеристики контактов Ni/GaAs будут существенно зависеть от [2, 5, 9, 16]:

1. Поверхностных состояний. Плотность поверхностных состояний $\sim 10^{13}$ см² способна фиксировать положение уровня Ферми вблизи середины запрещенной зоны GaAs, препятствуя его смещению при изменении внешних условий (температуры, напряжения). Это приводит к отклонению от идеальной модели Шоттки-Мотта.

2. Оксидных прослоек. Наличие 1-2 монослоев Ga_2O_3 увеличивает барьер на 0,1-0,3 эВ.

3. Температурного эффекта. При $T > 300$ К происходит уменьшение Φ_{Bn} на $\sim 0,01$ эВ/град, что приводит к увеличению туннельной составляющей тока и изменению профиля зонной структуры [8, 9].

Таблица 2. Сравнительная таблица характеристик контактов Ni/GaAs.

Параметр	Ni/n-GaAs	Ni/p-GaAs
Тип контакта	Барьер Шоттки	Омический переход
Высота барьера	0,9-1,0 эВ	0,3-0,5 эВ
Ширина ОПЗ	50-100 нм	10-30 нм
Механизм переноса	Термоэлектронная эмиссия	Туннелирование

Необходимые энергетические параметры для Ni и невырожденного кристалла GaAs, указанные в таблице 2, приведены из литературы [20, 21].

Таким образом, для n-GaAs высокий барьер (0,9 эВ) полезен для выпрямляющих контактов, который можно применять в СВЧ-диодах и фотодетекторах. Для p-GaAs низкий барьер (0,4 эВ) способствует омическому поведению. Следовательно, требуется легирование $> 10^{19}$ см⁻³ для идеального омического контакта [4, 19].

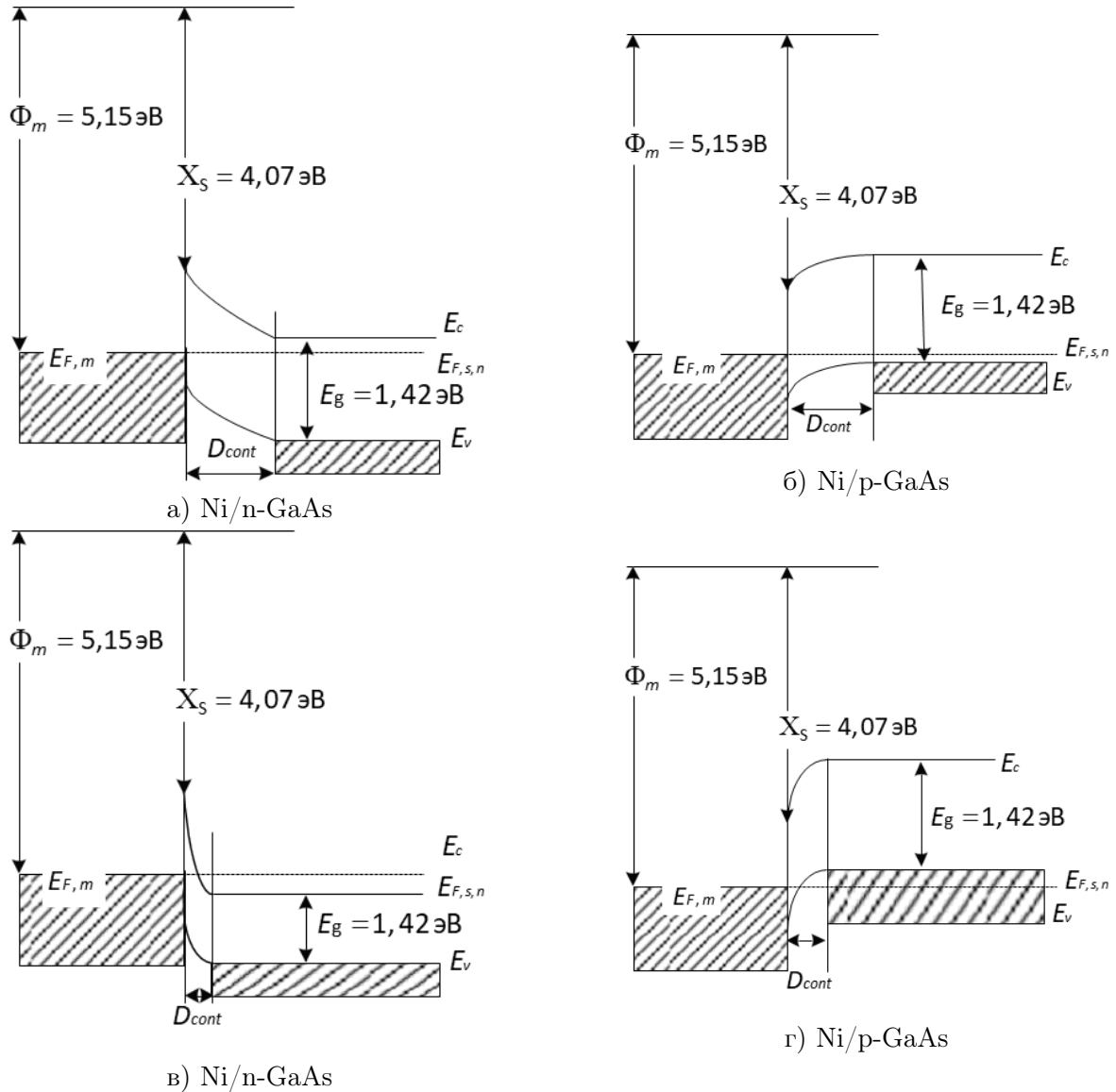


Рис. 2. Зонная диаграмма контакта Ni/GaAs: а), б) невырожденные полупроводники; в), г) вырожденные полупроводники.

3. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНТАКТНЫХ СТРУКТУР

Эффект Пельтье представляет собой одно из ключевых термоэлектрических явлений, играющих важную роль в современных технологиях энергопреобразования и терморегулирования. Он возникает при прохождении электрического тока через контакт двух разнородных проводников или полупроводников, сопровождаясь выделением или поглощением тепла в зависимости от направления тока [22]. Данный эффект обусловлен различием коэффициентов термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) материалов [23] и находит применение в системах охлаждения, термостабилизации и генерации электроэнергии [24]. Определим числовые параметры эффекта Пельтье на основе известных моделей.

Для системы Ni/Cu: термоЭДС Ni ≈ -19 мкВ/К, термоЭДС Cu $\approx +1,8$ мкВ/К. Значительная разница ($\sim 20,8$ мкВ/К) указывает на влияние эффекта Пельтье при прохождении тока

через контакт этих металлов, который связан с термоЭДС материалов соотношением [24]:

$$\Pi = T \cdot \Delta S, \quad (3)$$

где: T — температура, ΔS — разность коэффициентов термоЭДС.

Для Ni/Cu при комнатной температуре (300 K) получаем:

$$\Pi = 300 \text{ K} \cdot 20,8 \text{ мВ/К} \approx 6,24 \text{ мВ}. \quad (4)$$

Следовательно, при протекании тока через контакт Ni-Cu будет выделяться или поглощаться тепло в зависимости от направления тока: при движении электронов от Ni к Cu наблюдается поглощение тепла на границе раздела, при противоположном переносе заряда энергия выделяется.

Для GaAs термоЭДС находится в диапазоне $\sim 100\text{--}500$ мВ/К, что дает разницу с Ni еще больше, а значит наблюдается сильный эффект Пельтье [16, 22, 23].

В общем случае формула для мощности тепловыделения/поглощения имеет вид [23]:

$$Q_{\text{П}} = \Pi \cdot I = (S_A - S_B) \cdot T \cdot I, \quad (5)$$

где: Q_P — мощность тепла Пельтье (Вт), $\Pi = (S_A - S_B) \cdot T$ — коэффициент Пельтье (В), S_A, S_B — коэффициенты термоЭДС материалов (В/К), T — абсолютная температура (К), I — сила тока (А).

Применим правило знаков [22]: если $\Pi \cdot I > 0 \rightarrow$ выделение тепла; если $\Pi \cdot I < 0 \rightarrow$ поглощение тепла.

Контакт Ni ($S = -19$ мВ/К) — Cu ($S = +1,8$ мВ/К):

$$\Pi_{Ni-Cu} = (-19 - 1,8) \cdot 10^{-6} \cdot T = -20,8 \cdot 10^{-6} T [\text{В}]. \quad (6)$$

При $I > 0$ электроны движутся в направлении от Ni к Cu. Коэффициент Пельтье имеет отрицательный знак, следовательно происходит поглощение тепла на границе.

Рассмотрим контакт Ni/n-GaAs ($S = -500$ мВ/К):

$$\Pi_{Ni-GaAs} = (-19 - (-500)) \cdot 10^{-6} \cdot T = +487 \cdot 10^{-6} \cdot T [\text{В}]. \quad (7)$$

При $I > 0$ результирующий знак “+”, следовательно происходит выделение тепла.

Эффект Томсона можно описать через работу выхода (Φ), используя термодинамический потенциал системы [25]:

$$\frac{dQ}{dx} = \tau j \frac{dT}{dx}, \quad (8)$$

где: τ — коэффициент Томсона, связанный с работой выхода через соотношение:

$$\tau = T \frac{dS}{dT} \approx \frac{d\Phi}{dT}, \quad (9)$$

S — термоЭДС материала, Φ — работа выхода.

Электроны на уровне Ферми при нагреве получают дополнительную энергию $\sim k_B \Delta T$. Это изменяет эффективную работу выхода:

$$\Phi(T) = \Phi_0 + \left(\frac{d\Phi}{dT} \right) T. \quad (10)$$

Градиент температуры вызывает пространственное изменение $\Phi(x)$. Тогда разница работ выхода на горячем и холодном краях:

$$\Delta\Phi = \Phi_{hot} - \Phi_{cold} \approx \left(\frac{d\Phi}{dT} \right) \Delta T. \quad (11)$$

Температурная зависимость работы выхода для контактирующих металлов Ni ($\Phi_0 \approx 5,0$ эВ) и Cu ($\Phi_0 \approx 4,7$ эВ) принимает вид [26]:

$$\frac{d\Phi_{\text{Ni}}}{dT} \approx -0,1 \text{ мВ/К}, \quad \frac{d\Phi_{\text{Cu}}}{dT} \approx +0,05 \text{ мВ/К}. \quad (12)$$

Коэффициент Томсона в пересчете на мкВ для контактирующих материалов принимает значения:

$$\tau_{\text{Ni}} \approx -15 \text{ мВ/К}, \quad \tau_{\text{Cu}} \approx +7 \text{ мВ/К}. \quad (13)$$

У полупроводников зависимость сложнее, так как температура существенно влияет на электронное сродство и положение уровня Ферми. К тому же, комбинированный эффект дает сильную температурную зависимость. GaAs ($\chi \approx 4,07$ эВ, $E_g = 1,42$ эВ) [27]:

$$\frac{d\Phi}{dT} \approx \frac{d\chi}{dT} + \frac{1}{2} \frac{dE_g}{dT}. \quad (14)$$

Для GaAs $\frac{dE_g}{dT} \approx -0,4$ мВ/К. Результирующий коэффициент Томпсона:

$$T_{\text{GaAs}} \approx -200 \dots -300 \text{ мВ/К}. \quad (15)$$

Возникновение термоЭДС в цепи из двух разнородных материалов при наличии градиента температуры связано с эффектом Зеебека. Рассмотрим его проявление в контактах Ni/Cu и Ni/GaAs [21].

1. Система Ni/Cu (металл-металл)

Коэффициент Зеебека (S):

$S_{\text{Ni}} \approx -19$ мВ/К (отрицательный, дырочный);

$S_{\text{Cu}} \approx +1,8$ мВ/К (положительный, электронный).

ТермоЭДС в контакте Ni-Cu:

$$V = (S_{\text{Ni}} - S_{\text{Cu}}) \cdot \Delta T = (-19 - 1,8) \cdot \Delta T \approx -20,8 \text{ мВ/К} \cdot \Delta T. \quad (16)$$

Знак минус означает, что при нагреве Ni относительно Cu ток электронов направлен от Ni к Cu (или дырки — от Cu к Ni), т.е. при нагреве Ni (отрицательный S) электроны диффундируют в сторону холодного края. В Cu (положительный S) электроны движутся к горячему краю. Результирующая термоЭДС определяется разностью коэффициентов [23].

2. Система Ni/GaAs (металл-полупроводник)

GaAs (n-тип):

$S_{\text{GaAs}} \approx -100 \dots -500$ мВ/К (зависит от легирования); $S_{\text{Ni}} \approx -19$ мВ/К.

ТермоЭДС в контакте Ni-GaAs:

$$V = (S_{\text{Ni}} - S_{\text{GaAs}}) \cdot \Delta T. \quad (17)$$

Для n-GaAs ($S_{\text{GaAs}} \approx -300$ мВ/К):

$$V = (-19 - (-300)) \cdot \Delta T \approx +281 \text{ мВ/К} \cdot \Delta T. \quad (18)$$

Положительный знак указывает на то, что ток электронов направлен от GaAs к Ni при нагреве GaAs. В n-GaAs электроны диффундируют от горячего конца к холодному (из-за отрицательного S). В Ni электроны также движутся от горячего к холодному, но слабее. Результирующая термоЭДС определяется разницей коэффициентов [28].

Квантовые эффекты в наноконтактах Ni/X ($X = \text{Cu}, \text{GaAs}$), изученные в работе [29], объясняют отклонения в коэффициентах Зеебека и Пельтье за счет изменений плотности состояний электронов на границе раздела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При формировании пленок Ni на GaAs появляется возможность создавать туннельные барьеры для электронов и дырок [29], т. е. состояние пленки Ni и ее работа выхода оказывает существенное влияние на рассмотренные в работе эффекты, поскольку остальные характеристики и их параметры определяются работой выхода электронов контактирующих материалов.

Для системы Ni/Cu значительный эффект на термоэлектрические явления оказывает различие коэффициентов термоЭДС материалов (-19 мкВ/К для Ni и $+1,8$ мкВ/К для Cu), что при комнатной температуре приводит к коэффициенту Пельтье (около $6,24$ мВ). Направление теплопереноса зависит от ориентации тока: при движении электронов от Ni к Cu наблюдается поглощение тепла на границе раздела.

В случае контакта Ni/GaAs термоэлектрические эффекты выражены значительно сильнее из-за большей разницы термоЭДС (до -500 мкВ/К для GaAs), что обусловлено полупроводниковой природой материала. Здесь при аналогичном направлении тока происходит выделение тепла на границе. Важным фактором, влияющим на величину эффектов, является наличие оксидных прослоек, которые могут увеличивать высоту барьера на $0,1-0,3$ эВ.

Температурные зависимости работ выхода материалов определяют особенности эффекта Томсона в этих структурах, что важно для гетерогенных контактов (Ni/Cu, Ni/GaAs), где дополнительно проявляется контактная разность потенциалов. Разница в коэффициентах Зеебека определяет значительную величину (в мкВ) и знак данного эффекта.

Приведенные в работе расчеты могут использоваться для практических расчетов кинетических свойств структур магнитных нанопленок Ni на подложке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белим, С. В. Исследование влияния подложки на критическое поведение двумерного ферромагнетика / С. В. Белим, И. В. Бычков, И. В. Мальцев // Челябинский физико-математический журнал. — 2021. — Т. 6, № 2. — С. 226–236.
2. Влияние финишной обработки поверхности GaAs на свойства границ раздела Au-GaAs / Т. А. Брянцева, Ю. В. Гуляев, В. Е. Любченко [и др.] // Радиотехника и электроника. — 2021. — Т. 66, № 11. — С. 1125–1132.
3. Tritt, T. M. Thermoelectric Materials: Principles and Applications / T. M. Tritt. — Warrendale, PA : Materials Research Society, 2018. — 150 p.
4. Божков, В. Г. Диоды с барьером Шоттки на основе термостойких контактов Ir-GaAs и Pt/Ir-GaAs, созданных электрохимическим осаждением / В. Г. Божков, Т. П. Бекезина, В. А. Бурмистрова // Электроника, радиотехника и связь. Доклады ТУСУР. — 2022. — Т. 25, № 1. — С. 48–52.
5. Торхов, Н. А. Формирование структуры собственного оксида на поверхности n-GaAs при естественном окислении на воздухе / Н. А. Торхов // Физика и техника полупроводников. — 2003. — Т. 37, вып. 10. — С. 1205–1213.
6. Mattox, D. M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing / D. M. Mattox. — Norwich, NY : William Andrew, 2010. — 792 p.
7. Условия формирования и топография поверхности никелевых нанопленок на меди / В. В. Филиппов, С. Е. Лузянин, Е. С. Нефедова [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 59–76.
8. Park, J. Fatigue behavior of freestanding nickel-molybdenum-tungsten thin films with high-density planar faults / J. Park // Nanoscale. — 2024. — V. 25, № 16. — P. 12050–12059.
9. Методы получения магнитных слоев и исследования их физических свойств / В. С. Жигалов, К. П. Полякова, С. Н. Варнаков [и др.]. — Красноярск : Сибирский гос. аэрокосмиче-

ский ун-т, 2008. — 163 с.

10. Ashcroft, N. W. Solid State Physics / N. W. Ashcroft, N. D. Mermin. — New York : Holt, Rinehart and Winston, 1976. — 826 p. — Chapter 13.

11. Матвеев, А. Н. Атомная физика / А. Н. Матвеев. — М. : Высшая школа, 1989. — 439 с.

12. Родерик, Э. Х. Контакты металл-полупроводник / Э. Х. Родерик. — М. : Радио и связь, 1982. — 208 с.

13. Lang, N. D. Theory of Metal Surfaces: Work Function / N. D. Lang, W. Kohn // Physical Review B. — 1971. — V. 3, № 4. — P. 1215–1223.

14. Yoo, J. Temperature-Dependent Contact Potential Difference Measurements in Bimetallic Systems / J. Yoo, Y. Kim // Journal of Applied Physics. — 2009. — V. 105, № 8. — Art. 083715.

15. Thurmond, C. D. The Standard Thermodynamic Functions for the Formation of Electrons and Holes in GaAs / C. B. Thurmond // Journal of The Electrochemical Society. — 1975. — V. 122, № 8. — P. 1133–1138.

16. Мелебаев, Д. Фоточувствительность барьеров Шоттки Ni-n-GaAs / Д. Мелебаев, Г. Д. Мелебаева, В. Ю. Рудь // Физика и техника полупроводников. — 2009. — Т. 43, вып. 1. — С. 34–37.

17. Стриха, В. И. Контактные явления в полупроводниках / В. И. Стриха. — Киев : Вища школа, 1982. — 224 с.

18. Шалимова, К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 392 с.

19. Филиппов, В. В. Особенности формирования контактов Ni-GaAs, получаемых при электролизе, и их электрофизические свойства / В. В. Филиппов, С. Е. Лузянин, К. А. Богоносов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. — 2022. — Вып. 4. — С. 76–91.

20. Бланк, Т. В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник (обзор) / Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг // Физика и техника полупроводников. — 2007. — Т. 41, № 11. — С. 1281–1307.

21. Павлов, Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л. П. Павлов. — М. : Высшая школа, 1987. — 240 с.

22. Rowe, D. M. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano / D. M. Rowe. — Boca Raton : CRC Press, 2006. — 1008 p.

23. Goldsmid, H. J. Applications of Thermoelectricity / H. J. Goldsmid. — New York : Dover, 2010. — 224 p.

24. Rowe, D. M. Thermoelectric Energy Conversion: Basic Concepts / D. M. Rowe // Thermoelectric Energy Conversion: Theories and Mechanisms. — 2018. — P. 15–42.

25. Callen, H. B. The Application of Onsager's Reciprocal Relations to Thermoelectric, Thermomagnetic, and Galvanomagnetic Effects / H. B. Callen // Physical Review. — 1948. — V. 73, № 11. — P. 1349–1358.

26. Smits, F. M. Temperature Dependence of the Work Function of Metals / F. M. Smits // Physical Review. — 1958. — V. 109, № 4. — P. 1172–1175.

27. Michaelson, H. B. The Work Function of the Elements and its Periodicity / H. B. Michaelson // Journal of Applied Physics. — 1977. — V. 48, № 11. — P. 4729–4733.

28. Zhang, Y. Thermoelectric Effects at Metal-Semiconductor Interfaces / Y. Zhang // Physical Review B. — 2015. — V. 91, № 23. — Art. 235305.

29. Родионова, А. А. Моделирование квантовых состояний в твердотельных ферромагнитных наноструктурах / А. А. Родионова, В. В. Филиппов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия : Техника и технологии. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 132–146.

REFERENCES

1. Belim S.V., Bychkov I.V., Maltsev I.V. Study of the Substrate Influence on the Critical Behavior of a Two-Dimensional Ferromagnet. [Belim S.V., Bychkov I.V., Maltsev I.V. Issledovanie vliyaniya podlozhki na kriticheskoe povedenie dvumernogo ferromagnetika]. *Chelyabinskij fiziko-matematicheskij zhurnal — Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 226–236.
2. Bryantseva T.A., Gulyaev Yu.V., Lyubchenko V.E. et al. Effect of GaAs Surface Finishing on the Properties of Au-GaAs Interfaces. [Bryantseva T.A., Gulyaev YU.V., Lyubchenko V.E. [i dr.] Vliyanie finishnoj obrabotki poverhnosti GaAs na svoystva granic razdela Au-GaAs]. *Radiotekhnika i elektronika — Radioengineering and Electronics*, 2021, vol. 66, no. 11, pp. 1125–1132.
3. Tritt T.M. Thermoelectric Materials: Principles and Applications. Warrendale, PA: Materials Research Society, 2018, 150 p.
4. Bozhkov V.G., Bekezina T.P., Burmistrova V.A. Schottky Barrier Diodes Based on Thermally Stable Ir-GaAs and Pt/Ir-GaAs Contacts Formed by Electrochemical Deposition. [Bozhkov V.G., Bekezina T.P., Burmistrova V.A. Diody s bar'ером SHottki na osnove termostojkikh kontaktov Ir-GaAs i Pt/Ir-GaAs, sozdannyh elektrohimicheskim osazhdeniem]. *Elektronika, radiotekhnika i svyaz'. Doklady TUSUR — Electronics, Radio Engineering, and Communications. Reports of TUSUR*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 48–52.
5. Torkhov N.A. Formation of Native Oxide Structure on the n-GaAs Surface During Natural Air Oxidation. [Torhov N.A. Formirovanie struktury sobstvennogo oksida na poverhnosti n-GaAs pri estestvennom okislenii na vozduhe]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Physics and Technology of Semiconductors*, 2003, vol. 37, iss. 10, pp. 1205–1213.
6. Mattox D.M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. 2nd ed. Norwich, NY: William Andrew, 2010, 792 p.
7. Filippov V.V. et al. Formation Conditions and Surface Topography of Nickel Nanofilms on Copper. [Filippov V.V. i dr. Usloviya formirovaniya i topografiya poverhnosti nikel'evykh nanoplenok na medj]. *Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii — Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 59–76.
8. Park J. Fatigue Behavior of Freestanding Nickel-Molybdenum-Tungsten Thin Films with High-Density Planar Faults. *Nanoscale*, 2024, vol. 25, no. 16, pp. 12050–12059.
9. Zhigalov V.S., Polyakova K.P., Varnakov S.N., Seredkin V.A., Parshin A.S. Methods for Obtaining Magnetic Layers and Studying Their Physical Properties. [Zhigalov V.S., Polyakova K.P., Varnakov S.N., Seredkin V.A., Parshin A.S. Metody polucheniya magnitnykh sloev i issledovaniya ih fizicheskikh svoystv]. Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University, 2008, 163 p.
10. Ashcroft N.W., Mermin N.D. Solid State Physics. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976, 826 p. (Chapter 13).
11. Matveev A.N. Atomic Physics. [Матвеев А.Н. Атомная физика]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1989, 439 p.
12. Roderick E.H. Metal-Semiconductor Contacts. [Roderik E.H. Kontakty metall-poluprovodnik]. Moscow: Radio i Svyaz, 1982, 208 p.
13. Lang N.D., Kohn W. Theory of Metal Surfaces: Work Function. *Physical Review B*, 1971, vol. 3, no. 4, pp. 1215–1223.
14. Yoo J., Kim Y. Temperature-Dependent Contact Potential Difference Measurements in Bimetallic Systems. *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 105, no. 8. Art. 083715.
15. Thurmond C.D. The Standard Thermodynamic Functions for the Formation of Electrons and Holes in GaAs. *Journal of The Electrochemical Society*, 1975, vol. 122, no. 8, pp. 1133–1138.

16. Melebaev D., Melebaeva G.D., Rud V.Yu. Photosensitivity of Ni-n-GaAs Schottky Barriers. [Melebaev D., Melebaeva G.D., Rud V.Yu. Fotochuvstvitel'nost' bar'erov SHottki Ni-n-GaAs]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Physics and Technology of Semiconductors*, 2009, vol. 43, iss. 1, pp. 34–37.
17. Strikha V.I. Contact Phenomena in Semiconductors. [Striha V.I. Kontaktnye yavleniya v poluprovodnikah]. Kiev: Vyshcha Shkola, 1982, 224 p.
18. Shalimova K.V. Physics of Semiconductors. [SHalimova K.V. Fizika poluprovodnikov]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 392 p.
19. Filippov V.V., Luzianin S.E., Bogonosov K.A. Features of Ni-GaAs Contact Formation by Electrolysis and Their Electrophysical Properties. [Filippov V.V., Luzianin S.E., Bogonosov K.A. Osobennosti formirovaniya kontaktov Ni-GaAs, poluchaemyh pri elektrolize, i ih elektrofizicheskie svoystva]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Fiziko-matematicheskie nauki — University Proceedings. Volga Region. Physical and Mathematical Sciences*, 2022, iss. 4, pp. 76–91.
20. Blank T.V., Goldberg Yu.A. Current Transport Mechanisms in Metal-Semiconductor Ohmic Contacts (Review). [Blank T.V., Goldberg Yu.A. Mekhanizmy protekaniya toka v omicheskikh kontaktah metall-poluprovodnik (obzor)]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Physics and Technology of Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 11, pp. 1281–1307.
21. Pavlov L.P. Methods for Measuring Semiconductor Material Parameters. [Pavlov L.P. Metody izmereniya parametrov poluprovodnikovyh materialov]. Moscow: Vishaya Shkola, 1987, 240 p.
22. Rowe D.M. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: CRC Press, 2006, 1008 p.
23. Goldsmid H.J. Applications of Thermoelectricity. New York: Dover, 2010, 224 p.
24. Rowe D.M. Thermoelectric Energy Conversion: Basic Concepts. Thermoelectric Energy Conversion: Theories and Mechanisms, 2018, pp. 15–42.
25. Callen H.B. The Application of Onsager's Reciprocal Relations to Thermoelectric, Thermomagnetic, and Galvanomagnetic Effects. *Physical Review*, 1948, vol. 73, no. 11, pp. 1349–1358.
26. Smits F.M. Temperature Dependence of the Work Function of Metals. *Physical Review*, 1958, vol. 109, no. 4, pp. 1172–1175.
27. Michaelson H.B. The Work Function of the Elements and its Periodicity. *Journal of Applied Physics*, 1977, vol. 48, no. 11, pp. 4729–4733.
28. Zhang Y. Thermoelectric Effects at Metal-Semiconductor Interfaces. *Physical Review B*, 2015, vol. 91, no. 23. Art. 235305.
29. Rodionova A.A., Filippov V.V. Modeling of Quantum States in Solid-State Ferromagnetic Nanostructures. [Rodionova A.A., Filippov V.V. Modelirovanie kvantovyh sostoyanij v tverdotel'nyh ferromagnitnyh nanostrukturah]. *Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii — Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 132–146.

Филиппов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и биомедицинской техники, Липецкий государственный технический университет, профессор кафедры математики и физики, Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, профессор кафедры естественных и технических наук, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), Липецкий филиал, Липецк, Российская Федерация
E-mail: wwfilippow@mail.ru

Filippov Vladimir Vladimirovich, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics and Biomedical Engineering, Lipetsk State Technical University, Professor of the Department Mathematics and Physics, Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky, professor Department of Natural and Technical Sciences Lipetsk Cossack Institute of Technology and Management (Branch) Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky, Lipetsk, Russia
E-mail: wwfilippow@mail.ru

Родионова Анастасия Алексеевна, аспирант кафедры агроинженерии, мехатронных и радиоэлектрических систем, Елецкий государственный университет имени И. А. Бунина, Елец, Российская Федерация
E-mail: nastya97zhidkova@yandex.ru

Rodionova Anastasiya Alekseevna, graduate student of the Department of Agroengineering, Mechatronic and Radio-Electronic Systems, Yelets State University named after I. A. Bunin, Yelets, Russian Federation
E-mail: nastya97zhidkova@yandex.ru