

ВЛИЯНИЕ СПИН-ОРБИТАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАШБЫ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В НАНОПРОВОЛОКАХ GaN ПРИ РАССЕЯНИИ НА АКУСТИЧЕСКИХ ФОНОНАХ

А. ВАРТАНЯН¹, А. АСАТРЯН^{1*}, М. ЕРАНОСЯН^{1,2}, А. СТЕПАНЯН¹,
Г. ХАЧАТРЯН¹, С. АЙРАПЕТЯН¹, Ү.-Н. ХИЕ³

¹Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

²Институт химической физики им. А.Б. Налбандяна НАН РА, Ереван, Армения

³University of California, Los Angeles, California, USA

*e-mail: annaa@ysu.am

(Поступила в редакцию 5 ноября 2025 г.)

Исследована подвижность электронов при рассеянии на акустических фононах в цилиндрической полупроводниковой нанопроволоке GaN, помещенной в неполярную среду. С учетом спин-орбитального взаимодействия получены зависимости подвижности электронов от радиуса нанопроволоки, линейной концентрации электронов, параметра спин-орбитального взаимодействия Рашбы и температуры. Показано, что учет спин-орбитального взаимодействия приводит к росту подвижности электронов, причем скорость роста высока при низких температурах. Рассмотрен важный технологический вопрос о влиянии спин-орбитального взаимодействия на подвижность электронов в квазиодномерных транспортных устройствах на основе нанопроволок GaN в области низких температур, где доминирует рассеяние на акустических фононах.

1. Введение

В последнее время нанопроволоки GaN находят всё большее применение в квантовой электронике. Это малотоксичные широкозонные полупроводники с высокой подвижностью электронов, что делает их незаменимыми для электронного транспорта в наноструктурных устройствах. Обладая широкой (3.4 эВ) запрещённой зоной и уникальными физическими и оптическими свойствами, нанопроволоки GaN с успехом применяются в высокоскоростных, мощных и высокочастотных электронных и фотоэлектрических устройствах в условиях высоких температур. Так, широкозонные полупроводники являются важнейшими материалами для создания источников излучения синего света и лазеров [1]. Нанопроволоки GaN обладают одномерной структурой, обеспечивающей их превосходную кристалличность, вследствие чего они демонстрируют замечательную химическую активность, размерно-квантовые эффекты при диаметрах образцов порядка и менее 10–15 нм [2], свойства самоорганизации и снятия напряжений [3], благодаря большой удельной площади поверхности нанопроволоки. В последние годы полупроводниковые нанопроволоки привлекают все большее внимание ввиду их массовых применений в лазерах [4], светодиодах [5],

фотодетекторах [6], солнечных батареях [7], полевых транзисторах [8], биоинтегрированной электронике [9] и т. д.

Спин-орбитальные взаимодействия важны для манипулирования спиновыми и зарядовыми степенями свободы в низкоразмерных и наномасштабных полупроводниковых системах, в частности, они играют существенную роль в управлении оптоэлектронными явлениями в полупроводниковых наноструктурах с целью улучшения характеристик различных устройств на их основе. Следует отметить, что среди кристаллических твердых тел спин-орбитальное взаимодействие (СОВ) особо выражено в некоторых полупроводниках [10], и хотя энергия СОВ обычно мала по сравнению с другими характерными энергиями, она, тем не менее, вызывает расщепление вырожденных энергетических зон вблизи уровня Ферми, тем самым оказывая эффективное влияние на характеристики микро- и нанoeлектронных устройств. Спин-орбитальное взаимодействие напрямую влияет на транспортные явления в наноструктурах, которые, в свою очередь, могут быть использованы для оценки СОВ. Это, в частности, относится к магнитопроводимости низкоразмерных систем. Известно, что ее измерения косвенно дают информацию о СОВ, поскольку проводимость увеличивается при сильном СОВ из-за спиновой релаксации по сравнению со случаями, когда СОВ слабое или вовсе отсутствует [11].

В зависимости от происхождения СОВ обычно различают эффект Рашбы, индуцированный структурно-инверсионной асимметрией [12], и эффект Дрессельхауса, индуцированный объемно-инверсионной асимметрией [13]. По сравнению с СОВ Дрессельхауса, СОВ Рашбы привлекло больший интерес, поскольку его можно адаптировать к различным типам асимметрии низкоразмерных структур, таким как асимметрично-легированные квантовые структуры, неэквивалентные нормальные и инвертированные интерфейсы, асимметричные квантовые ямы и внешние или встроенные электрические поля [14]. Было обнаружено, что СОВ Дрессельхауса, индуцированное объемно-инверсионной асимметрией, важно, особенно в низкоразмерных квантовых структурах, и поскольку в гетероструктурах на основе GaN оно слабее СОВ Рашбы экспериментальное измерение коэффициента СОВ Дрессельхауса затруднено [15].

Другим фактором, влияющим на оптоэлектронные и динамические характеристики наноструктур, является рассеяние носителей заряда. В данной работе изучено влияние спин-орбитального взаимодействия на подвижность при рассеянии электронов на акустических фононах в нанопроволоках GaN при различных значениях параметров спин-орбитального взаимодействия, плотности электронов, радиуса нанопроволоки, и в широком диапазоне температур.

2. Теория

Механизмы рассеяния, ограничивающие подвижность электронов в полупроводниковых гетероструктурах в слабых электрических полях, можно моделировать в приближении времени релаксации импульса, когда энергия фонона значительно меньше средней энергии электрона. Именно такая ситуация имеет место в случае акустических фононов, что является следствием их линейной дисперсии в длинноволновом пределе.

Рассмотрена ограниченная акустическими фононами подвижность

электронов в нанопроволоке длиной L и радиусом r_0 , с использованием формулы Кубо–Гринвуда [16], адаптированной для одномерного транспорта [17], которая в однодолинном полупроводнике имеет вид:

$$\mu(n_L, T, \alpha, \beta) = \frac{2e}{k_B T m^* n_L} \times \sum_{nm\zeta} \int_{E_{nm}}^{\infty} dE g_{nm}(E) \left(E + \frac{\zeta \sqrt{m^* E}}{\hbar} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} - E_{nm} \right) \tau_{nm\zeta}(E) f(E) [1 - f(E)], \quad (1)$$

где k_B – постоянная Больцмана, m^* – эффективная масса электрона, T – температура, n_L – линейная концентрация электронов, α и β – параметры Рашбы и Дрессельхауса, соответственно, $\tau_{nm\zeta}(E)$ – время релаксации импульса электрона, $\zeta = 1$ и $\zeta = -1$ для спиновых состояний $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, соответственно, $f(E) = \left[\exp \left(\left(E_{nm} + E + \zeta \hbar^{-1} \sqrt{m^* E (\alpha^2 + \beta^2)} - \eta \right) / k_B T \right) + 1 \right]^{-1}$ – функция распределения Ферми-Дирака, η – химический потенциал, $g_{nm}(E) = 2[\pi^2(\alpha^2 + \beta^2 + 2\hbar^2(E - E_{nm})/m^*)]^{-1/2}$ – одномерная плотность состояний в подзоне ($nm\zeta$) нанопроволоки, $E_{nm} = \hbar\omega_0(2n + |m| + 1)$ – энергия квантования в сечении нанопроволоки, ω_0 – частота параболического потенциала, ограничивающего поперечное движение электрона в нанопроволоке, $n = 0, 1, 2, \dots$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – квантовые числа. Связь между ω_0 и радиусом нанопроволоки дается выражением $r_0 = (\hbar/m^*\omega_0)^{1/2}$.

3. Численные результаты и обсуждение

Для расчёта подвижности электронов в нанопроволоке GaN необходимо из условия нормировки

$$n_L = \frac{N}{L} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left[f \left(\hbar\omega_0 + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} + k\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \right) + f \left(\hbar\omega_0 + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} - k\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \right) \right] dk. \quad (2)$$

определить химический потенциал системы, зависящий от радиуса нанопроволоки, линейной концентрации электронов, констант Рашбы и Дрессельхауса, а также температуры. Параметр Дрессельхауса $\beta = \gamma_D \pi^2 / r_0^2$, где $\gamma_D = 0.4 \text{ eV}\text{\AA}^3$. Следует отметить, что при слабом возбуждении электронной системы, GaN считается однодолинным полупроводником, так как минимум зоны проводимости находится в центре зоны Бриллюэна (в точке Γ), и именно эта долина является основной.

На рис. 1 представлена зависимость химического потенциала нанопроволоки GaN от температуры (рис. 1a), линейной концентрации электронов (рис. 1b), радиуса нанопроволоки (рис. 1c) и параметра СОВ Рашбы (рис. 1d) при фиксированных значениях остальных параметров. Зависимости химического потенциала от температуры, радиуса нанопроволоки и параметра Рашбы исследовались при постоянной концентрации электронов. В этом случае предполагается, что доноры полностью ионизированы при рассматриваемых температурах.

Увеличение радиуса нанопроволоки приводит к уменьшению энергии электронов, что требует уменьшения химического потенциала для поддержания среднего числа электронов в данной подзоне практически постоянным (рис. 1c). Аналогичным образом объясняется уменьшение химического потенциала с ростом температуры (рис. 1a). Химический потенциал растёт с ростом концентрации электронов при определённых значениях радиуса нанопроволоки,

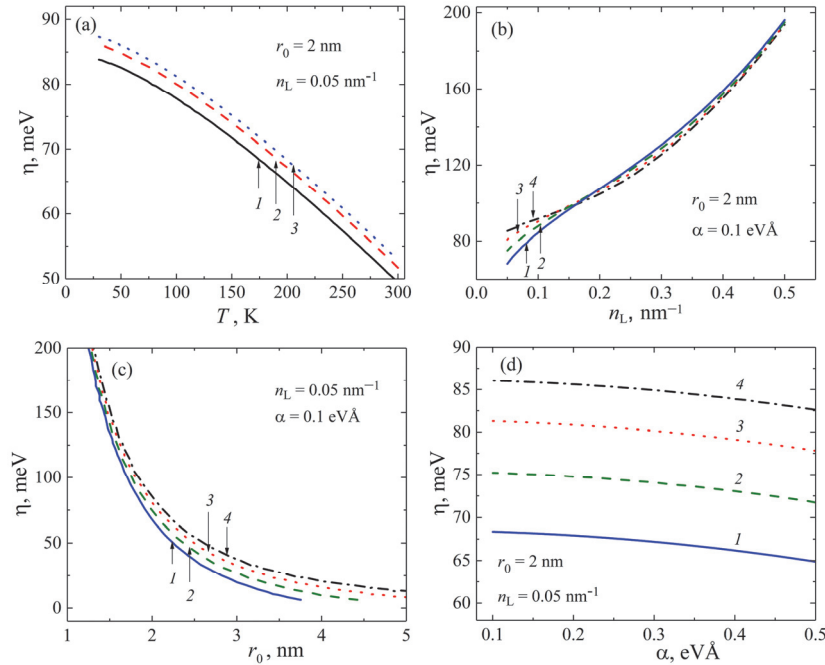


Рис.1. Зависимости химического потенциала η нанопроволоки GaN от (a) температуры T при (1) $\alpha = 0.5$, (2) $\alpha = 0.3$, (3) $\alpha = 0.1$ eVÅ; (b) линейной концентрации электронов n_L , (c) радиуса нанопроволоки r_0 и (d) параметра СОВ Рашбы α , при (1) 200, (2) 150, (3) 100, (4) 50 К.

температуры и параметра Рашбы, поскольку при постоянных энергии квантового ограничения и температуре увеличение концентрации приводит к росту химического потенциала согласно уравнению (2) (рис.1b). При этом, скорость роста химического потенциала увеличивается с ростом температуры. Поведение химического потенциала в зависимости от параметра Рашбы (рис.1d), как видно из уравнения (2), моделируется балансировкой двух слагаемых функций распределения Ферми–Дирака. В результате наблюдается слабая зависимость (уменьшение) химического потенциала с ростом параметра Рашбы.

Зависимости подвижности электронов от различных параметров системы показаны на рис.2. С увеличением радиуса нанопроволоки GaN подвижность электронов увеличивается (рис.2a). Такая зависимость экспериментально наблюдалась при малых значениях радиуса нанопроволоки GaN [18]. СОВ Рашбы практически не влияет на подвижность электронов, когда энергия размерного квантования значительно больше энергии СОВ. При больших радиусах наблюдается значительный рост подвижности из-за СОВ (рис.2b). Более того, обусловленное СОВ повышение подвижности становится более выраженным при увеличении радиуса нанопроволоки. С повышением температуры наблюдается уменьшение подвижности электронов, обусловленное ростом среднего числа акустических фононов (рис.2c). Следует отметить, что влияние СОВ на подвижность электронов проявляется преимущественно при низких температурах, когда энергия акустических фононов становится соизмеримой с энергией СОВ. Увеличение электронной плотности в нанопроволоке приводит к росту

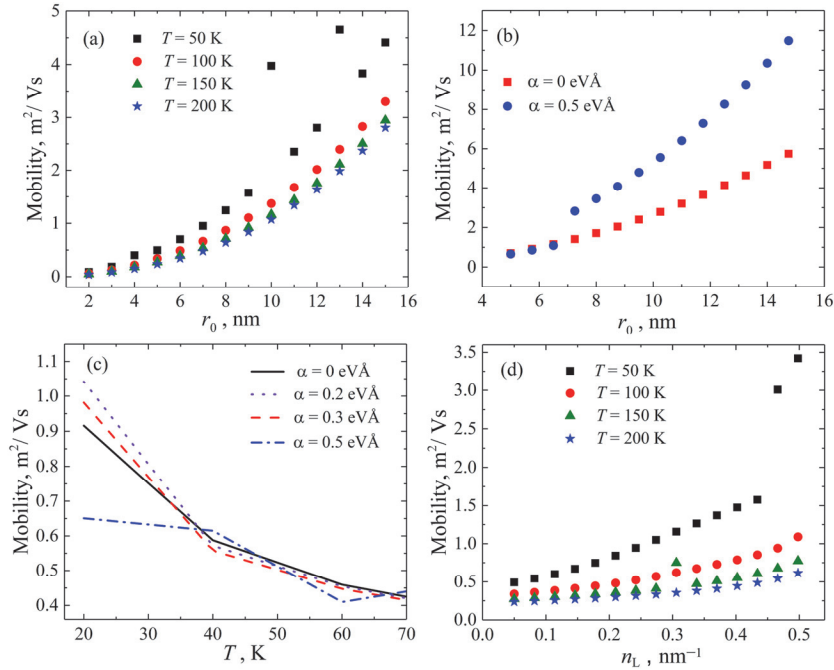


Рис.2. Зависимости подвижности электронов μ в нанопроволоке GaN при $n_L = 0.05 \text{ nm}^{-1}$ от радиуса нанопроволоки r_0 для (a) $\alpha = 0.3 \text{ eVÅ}$, (b) $T = 50 \text{ K}$, (c) от температуры T , (d) от линейной концентрации электронов $n_L(r_0 = 18 \text{ nm}, \alpha = 0.3 \text{ eVÅ})$.

подвижности электронов при рассеянии на акустических фононах (рис.2d). Это связано с тем, что повышение плотности сопровождается увеличением их средней энергии (энергии Ферми). В высокоэнергетических состояниях эффективность рассеяния на акустических фононах заметно снижается, поскольку взаимодействие электронов с низкоэнергетическими фононами становится относительно слабым, что способствует увеличению подвижности носителей заряда.

Полученные результаты открывают существенную возможность для технологических приложений. Характеристики устройств на основе наноструктур, в частности их быстродействие, главным образом определяется подвижностью носителей заряда в активных областях этих устройств. Поэтому управление электронной подвижностью и, следовательно, электропроводностью нанопроволок GaN посредством СОВ делает их перспективными для использования в нанoeлектронных и спинтронных приборах.

4. Заключение

Проведен теоретический анализ влияния спин-орбитального взаимодействия на подвижность электронов в нанопроволоках GaN. Численные результаты расчета подвижности в зависимости от температуры, радиуса нанопроволоки, силы спин-орбитальной связи и линейной концентрации электронов приводят к заключению, что подвижность электронов увеличивается как с увеличением радиуса нанопроволоки, так и с увеличением концентрации

электронов. Полученные результаты показывают, что спин-орбитальное взаимодействие существенно изменяет подвижность электронов при более низких температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке Министерства образования, науки, культуры и спорта Республики Армения в рамках проектов № 21AG-1C048 и № 24WS-1C040.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. H.A.A. Abdul Amir, M.A. Fakhri, A.A. Alwahib. *Mater. Today: Proc.*, **42**, 2815 (2021).
2. F. Qian, J. Li, S. Gradečak, D. Wang, C.J. Barrelet, C.M. Lieber. *Nano Lett.*, **4**, 1975 (2004).
3. T. Kuykendall, P. Ulrich, S. Aloni, P. Yang. *Nat. Mater.*, **6**, 951 (2007).
4. A.B. Greytak, C.J. Barrelet, Y. Li, C.M. Lieber. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 151103 (2005).
5. X. Dai, A. Messanvi, H. Zhang, C. Durand, J. Eymery, C. Bougerol, F.H. Julien, M. Tchernycheva. *Nano Lett.*, **15**, 6958 (2015).
6. X. Dai, S. Zhang, Z. Wang, G. Adamo, H. Liu, Y. Huang, C. Couteau, C. Soci. *Nano Lett.*, **14**, 2688 (2014).
7. P. Krogstrup, H.I. Jørgensen, M. Heiss, O. Demichel, J.V. Holm, M. Aagesen, J. Nygard, A.F. i Morral. *Nat. Photonics*, **7**, 306 (2013).
8. J. Xiang, W. Lu, Y. Hu, Y. Wu, H. Yan, C.M. Lieber. *Nature*, **441**, 489 (2006).
9. N.-K. Nguyen, T. Nguyen, T.-K. Nguyen, S. Yadav, T. Dinh, M.K. Masud, P. Singha, T.N. Do, M.J. Barton, H.T. Ta, N. Kashaninejad, C.H. Ooi, N.-T. Nguyen, H.-P. Phan. *ACS Appl. Electron. Mater.*, **3**, 1959 (2021).
10. Y. Bychkov, E.I. Rashba. *JETP Lett.*, **39**, 78 (1984).
11. G. Dresselhaus. *Phys. Rev.*, **100**, 580 (1955).
12. L. Zhu, Y. Zhang, P. Lin, Y. Wang, L. Yang, L. Chen, L. Wang, B. Chen, Z.L. Wang. *ACS Nano*, **12**, 1811 (2018).
13. C. Yin, B. Shen, Q. Zhang, F. Xu, N. Tang, L. Cen, X. Wang, Y. Chen, J. Yu. *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 181904 (2010).
14. R. Winkler. *Spin-orbit Coupling Effects in Two-Dimensional Electron and Hole Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003.
15. M. Kammermeier, P. Wenk, J. Schliemann. *Phys. Rev. B*, **93**, 205306 (2016).
16. R. Kubo. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **12**, 570 (1958); D.A. Greenwood. *Proc. Phys. Soc. London*, **71**, 585 (1958).
17. R. Kotlyar, B. Obradovic, P. Matagne, M. Stettler, M.D. Giles. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 5270 (2004).
18. A. Motayed, M. Vaudin, A.V. Davydov, J. Melngailis, M. He, S.N. Mohammad. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 043104 (2007).

ՌԱՇԲԱՅԻ ՍՊԻՆ-ՈՒԴԵՐՄԱՅԻՆ ՓՈԽԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՆԵՐԳՈՐԾՈՒԹՅՈՒՆԸ
ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐԻ ՇԱՐԺՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ GaN ՆԱՆՈԼԱՐԵՐՈՒՄ ԶԱՅՆԱՅԻՆ
ՖՈՆՈՆՆԵՐԻ ՎՐԱ ՑՐՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Ա. ԱՍՏՏՐՅԱՆ, Մ. ԵՐԱՆՈՍՅԱՆ, Ա. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ,
Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ս. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Կ.-Խ. ՅԷ

Ուսումնասիրվել է էլեկտրոնների շարժունությունը ոչ բևեռային միջավայրում ներդրված զլանային GaN կիսահաղորդչային նանոլարում՝ ձայնային ֆոնոնների վրա ցրման դեպքում: Սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառմամբ ստացվել են էլեկտրոնային շարժունության կախումները նանոլարի շառավղից, էլեկտրոնների զծային կոնցենտրացիայից, Ռաշբայի սպին-ուղեծրային փոխազդեցության պարամետրից և ջերմաստիճանից: Ցույց է տրվել, որ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառումը հանգեցնում է էլեկտրոնների շարժունության աճի, ընդ որում՝ աճի արագությունը մեծ է ցածր ջերմաստիճաններում: Դիտարկվել է կարևոր տեխնոլոգիական հարց՝ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության ներգործությունը էլեկտրոնային շարժունության վրա GaN նանոլարային հենքով քվազիմիաչափ տրանսպորտային սարքերում՝ ցածր ջերմաստիճաններում, երբ գերակայող է ձայնային ֆոնոնների վրա ցրումը:

IMPACT OF RASHBA SPIN-ORBIT INTERACTION ON ELECTRON MOBILITY IN
GaN NANOWIRES DUE TO SCATTERING BY ACOUSTIC PHONONS

A. VARTANIAN, A. ASATRYAN, M. YERANOSYAN, A. STEPANYAN,
G. KHACHATRYAN, S. HAYRAPETYAN, Y.-H. XIE

The electron mobility due to scattering by acoustic phonons has been studied in a cylindrical GaN semiconductor nanowire embedded in a nonpolar medium. Taking into account the spin-orbit interaction, the dependences of electron mobility on the nanowire radius, the linear electron concentration, the Rashba spin-orbit coupling parameter, and the temperature have been obtained. It is shown that inclusion of spin-orbit interaction leads to an increase in electron mobility, with the rate of increase being especially high at low temperatures. A significant technological issue is examined: the impact of spin-orbit interaction on electron mobility in quasi-one-dimensional transport devices based on GaN nanowires at low temperatures, where scattering by acoustic phonons is dominant.