

Локальные термоэлектрические эффекты в широкозонных полупроводниках

© С.В. Ордин, Ю.В. Жиляев, В.В. Зеленин, В.Н. Пантелеев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт Петербург, Россия

E-mail: stas_ordin@mail.ru

(Получена 27 декабря 2016 г. Принята к печати 12 января 2017 г.)

Получено экспериментальное подтверждение возникновения в структурах на базе широкозонных полупроводников локальных термоэдс, обнаруженных ранее на кремниевых $p-n$ -переходах. Были исследованы вольт-амперные и частотные характеристики асимметричного потенциального барьера на границе GaN/Mg и $p-i-n$ -структуры на базе GaAs. Показано, что вклад локальных термоэдс и в широкозонных полупроводниках определяет как особенности вольт-амперных характеристик, так и особенности частотных вольт-ваттных характеристик, в частности гауссов резонанс. При учете и использовании локальных термоэдс возможно как кардинальное повышение кпд термоэлектрического преобразования, так и улучшение рабочих параметров элементов микроэлектроники.

DOI: 10.21883/FTP.2017.07.44643.29

Термоэлектричество [1–3], вслед за микроэлектроникой, шагнуло в область широкозонных полупроводников. Но если диффузные слабые эффекты Зеебека и Пельтье электроникой справедливо выбрасывались из рассмотрения, то обнаруженные локальные термоэлектрические эффекты сами существенно влияют на работу устройств микроэлектроники [4]. Локальные термоэдс определяются E_g [5,6] и задача повышения кпд термоэлектрических устройств [7–10] пересеклась с задачей повышения эффективности устройств микроэлектроники. При этом, как измерения на низких частотах модуляции [11], так и импульсные измерения [12] кремниевых $p-n$ -переходов, показали, что сигналы на относительно небольшой (единицы мВт/мм²) мощности выходят на насыщение. Таким образом, для работы при больших градиентах температуры и кардинального повышения кпд термоэлектрического преобразования нужно переходить на широкозонные полупроводники и создавать многослойные переходы (в популярном изложении см. [13]).

Метод газовой эпитаксии с поэлементным вводом ингредиентов в реактор с продувкой между вводом ростовых элементов (режим атомно-слоевой эпитаксии) позволяет контролировать рост с точностью до монослоя и выращивать гетероструктуры на базе широкозонных материалов GaN–AlN на различных подложках [14,15]. Был исследован выращенный этим методом образец GaN толщиной 5 микрон на затворе толщиной меньше 0.2 мкм AlN, на подложке Al₂O₃ толщиной около 500 мкм. Тесный тепловой контакт Al₂O₃ подложки с полированным медным радиатором и пленки GaN с электрическими медными контактами обеспечивала InGa-эвтектика (рис. 1, *a*).

Установлено, что эдс на контакте металл/GaN α_c , так же как и на контакте металл/Si, превосходила вклад объемной интегральной эдс α_v . При этом малая объемная термоэдс дает знак носителей тока, противоположный

холловскому, что указывает на существование в образце как дырок, так и электронов. Полуметаллический характер использованного образца GaN определял малый потенциальный барьер на его границе с металлом и соответственно малые локальные термоэдс при тесном контакте GaN с магниевым электродом (рис. 2, *a*). Однако величины генерируемых ими токов было достаточно, чтобы модулировать ток в пленке GaN (рис. 2, *b*) и тем самым реализовать трансформатор сопротивления Лосева на GaN.

На тесном контакте GaN/Mg был создан также термотранзистор Лосева, в котором модуляция тока в пленке GaN осуществлялась локальными термоэдс, возникающими при нагреве пленки GaN относительно магниевое радиатора, падающим на нее сквозь прозрачную подложку из Al₂O₃ излучением (рис. 3, *a*). При этом в интервале частот 9 Гц–150 кГц регистрировалась амплитуда модуляции входного напряжения при различных входных токах смещения (рис. 3, *b*).

Возможность регистрации больших локальных термоэдс обеспечивал асимметричный потенциальный барьер на тесном контакте GaN/Mg. При этом амплитуда модуляции входного напряжения на магниевом контакте на порядки превосходила чисто болометрический эффект на контактах пленки GaN (рис. 1, *b*) при облучении ее между контактами. Но полуметаллический характер образцов GaN ограничивал возможность регистрации локальных термоэдс на границе с Mg без входного тока. При этом и для их регистрации без тока во входной цепи термотранзистора, и для уменьшения эффекта закорачивания сопротивления пленки GaN малым сопротивлением массивного металлического электрода/радиатора требовался микронный зазор на контакте Mg с GaN и дополнительный контакт на пленке GaN, со стороны подложки. Использование зазора позволило в принципе регистрировать выходные, усиленные сигналы

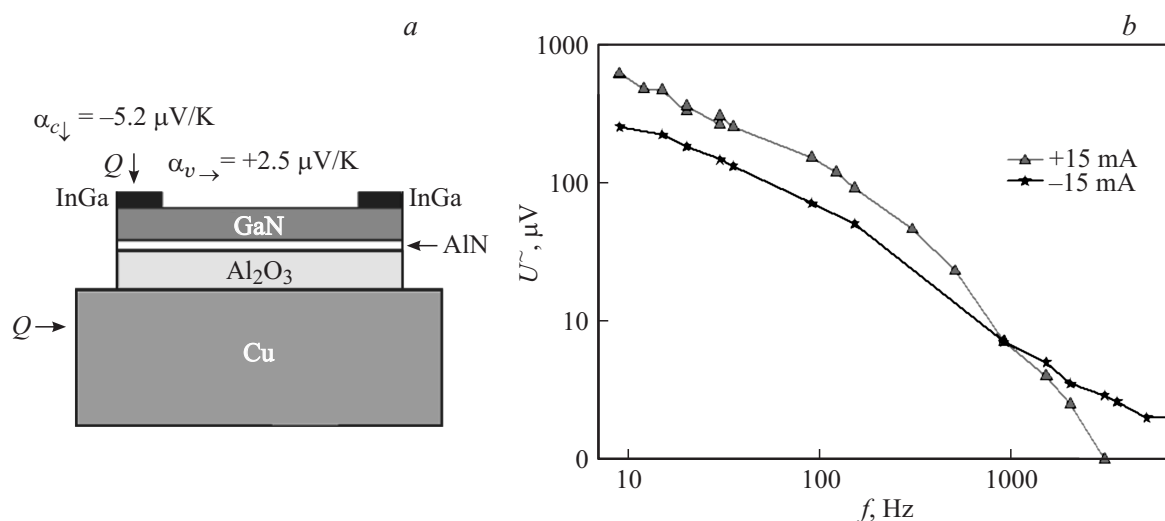


Рис. 1. *a* — структура образца GaN/AlN/Al₂O₃ без Mg-контакта. *b* — зависимость амплитуды модуляции входного напряжения от частоты модуляции тока. Термоэдс контакта α_c и объема α_v GaN, измеренные при указанных на рисунке направлениях теплового потока Q .

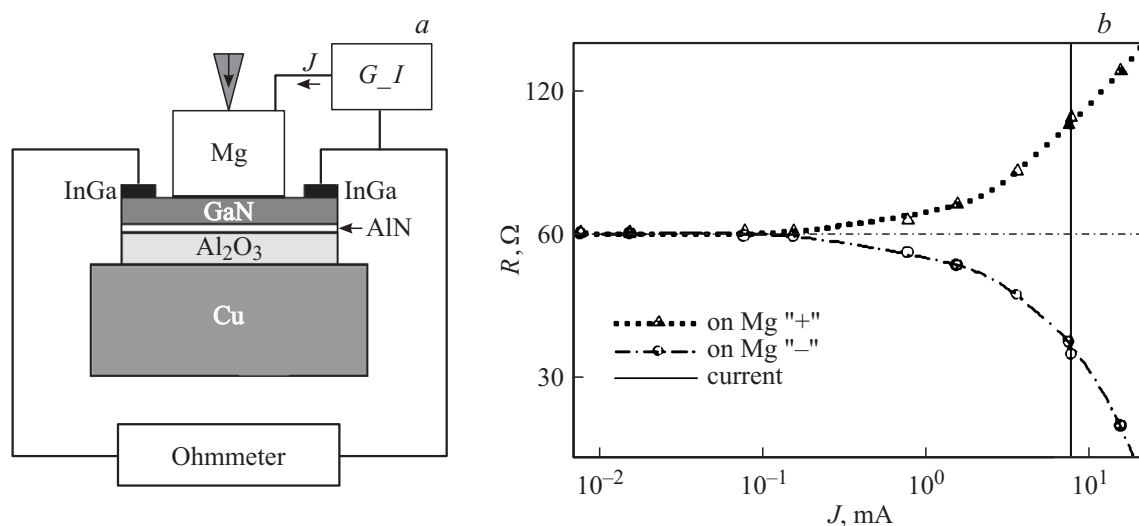


Рис. 2. *a* — структура образца GaN/AlN/Al₂O₃ с Mg-контактом; *b* — зависимость сопротивления пленки GaN от токов разной полярности через магниевый тесный контакт с пленкой (ток омметра 7.5 мА).

и совместить тепловой детектор и усилитель в одном кристалле. Но для надежной воспроизводимости желательно использовать на пленке GaN затвор из AlN и на границе с магниевым электродом.

Созданные в лаборатории Жилиева на базе GaAs наиболее совершенные *p-i-n*-структуры [16] были использованы для построения микротермоэмиссионного преобразователя (рис. 4, *a*).

На приведенной в тепловой контакт микроструктуре на базе GaAs, так же как кремниевом *p-n*-переходе, был зарегистрирован смешанный фототермосигнал. За счет частичного поглощения излучения сильно легированным верхним слоем GaAs и его превращения в тепловой поток, зарегистрированный ранее на *p-n*-переходе на базе Si, характерный резонанс также наблюдается и на

p-i-n-переходе на базе GaAs (рис. 4, *b*). При этом резонанс максимальной амплитуды на Si наблюдается при полном поглощении никелем синего света. Тогда как более сильное, чем для синего света, поглощение ИК-излучения вблизи плазменного минимума GaN приводит к большему вкладу локальных термоэдс на ИК-излучение и характерный резонанс проявляется даже на ослабленном на 10 Дб, как и для Si, излучении, но в ИК-диапазоне.

Таким образом, термоэлектрический „взгляд“ на GaN выявил ранее неучтенную физику: полуметаллический характер образца указывает на расщепление *s*-зоны Ga квази-*d*-зоной N и соответственно самолегирование GaN. Также он выявил новые возможности применения GaN: 1) транзистор Лосева на барьере Шоттки на грани-

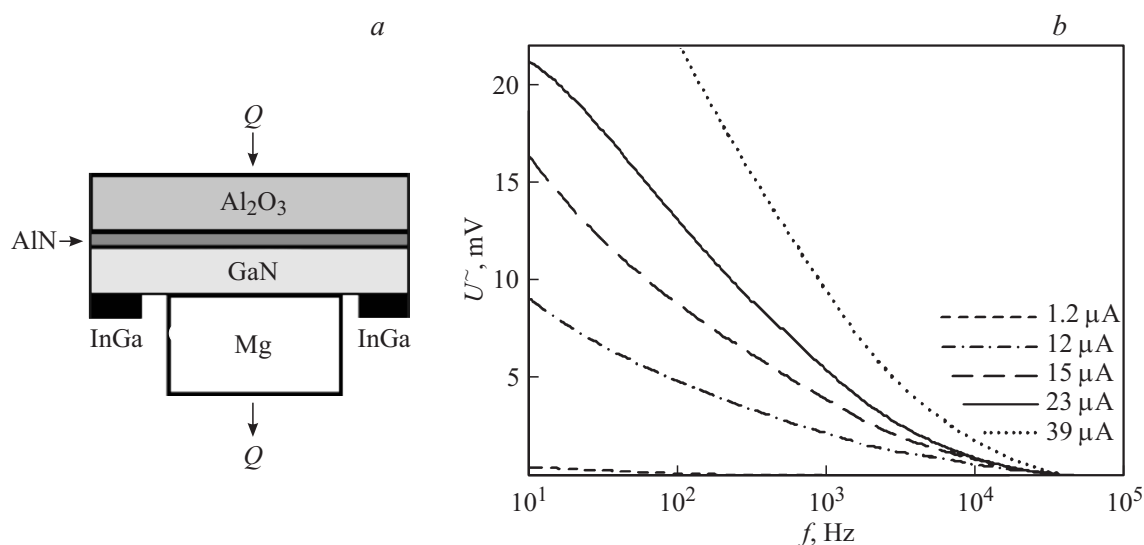


Рис. 3. Термотранзистор Лосева на базе GaN (a) и его входные частотные характеристики (b).

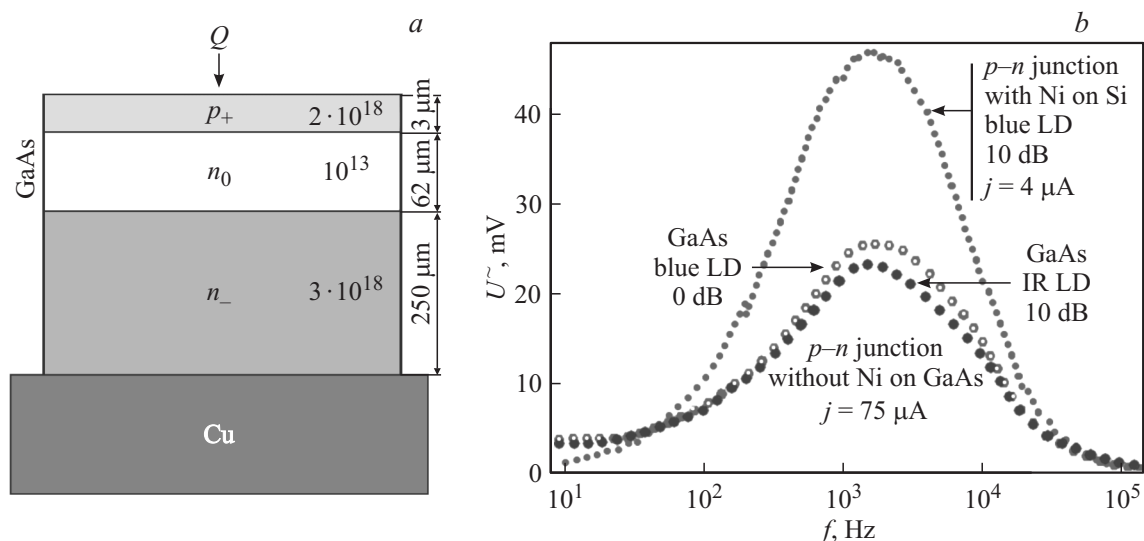


Рис. 4. a — структура микротермоэмиссионного преобразователя; b — гауссов резонанс, возникающий при оптимальном смещении $p-i-n$ -перехода на базе GaAs, характерный при наличии локальных термоэдс.

це Mg/GaN; 2) термоэлектрический диод и термоэлектрический транзистор Лосева; 3) электрический контакт, прозрачный в видимой области спектра и в ближнем ИК-диапазоне; 4) широкополосный ИК-источник излучения (по патенту [16]). По результатам исследования структуры на базе GaAs показана принципиальная возможность использовать $p-n$ -переходы на базе GaAs как для развития физики локальных термоэдс, так и для конструирования высокоэффективных устройств на базе локальных термоэдс, в частности, для создания чувствительных детекторов, работающих, в отличие от фотодетекторов, в широком спектральном диапазоне.

Общий вывод: в структурах на базе широкозонных полупроводников даже без экранирующего металлического покрытия локальные термоэдс дают значитель-

ный, превосходящий наблюдаемый на неметаллизированных кремниевых $p-n$ -переходах, вклад в суммарный фототермосигнал. Для достижения максимального КПД термоэлектрического преобразования в структурах на базе GaN и GaAs требуется оптимизация концентрации носителей в слоях и оптимизация толщин слоев.

Список литературы

[1] Л.С. Стильбанс. *Термоэлектрические явления. Полупроводники в науке и технике* (М.—Л., изд-во АН СССР, 1957) т. 1, с. 113.
 [2] Я. Тауц. *Фото- и термоэлектрические явления в полупроводниках* (М., ИЛИ, 1962).

- [3] CRC Handbook of Thermoelectrics, ed. by D.M. Rowe (N.Y., CRC Press, 1994).
- [4] С.В. Ордин, И.А. Соколов, А.Ю. Зюзин. Тр. Междунар. конф. „Термоэлектрики и их применения“ (СПб., Россия, 2006) с. 41.
- [5] С.В. Ордин, Н.В. Ванг. Тр. Междунар. конф. „Термоэлектрики и их применения“ (СПб., Россия, 2008) с. 55.
- [6] S.V. Ordin, N.W. Wang. Adv. Energy Res., **9**, 311 (2012).
- [7] С.В. Ордин. ФТП, **31**, 1091 (1997).
- [8] С.В. Ордин. Тр. V межгос. сем. „Материалы для термоэлектрических преобразователей“ (СПб., Россия, 1997) с. 149.
- [9] S.V. Ordin, A.Yu. Zjuzin, Yu.V. Ivanov, S. Yamaguchi. ITC2010, Shanghai, China, July, 2010 (J. Electron. Mater., 2010) p. 137.
- [10] С.В. Ордин. Тр. Междунар. конф. „Термоэлектрики и их применения“ (СПб., Россия, 2014) с. 199.
- [11] С.В. Ордин. Тр. XIV Междунар. конф. „Термоэлектрики и их применения“ (СПб., Россия, 2014) с. 234.
- [12] С.В. Ордин и др. Тез. докл. науч.-практ. конф. „Современные тенденции и принципы построения оптоэлектронных систем“ (Ростехнологии, УОМЗ, Россия, 2012) с. 62.
- [13] Yu.V. Zhilyaev, S.N. Rodin. Tech. Phys. Lett., **36**, 397 (2010).
- [14] Yu.V. Zhilyaev, V.V. Zelenin, T.A. Orlova, V.N. Panteleev, N.K. Poletaev, S.N. Rodin, S.A. Snytkina. Tech. Phys. Lett., **41**, 476 (2015).
- [15] Yu.V. Zhilyaev, D.I. Mikulik, A.V. Nasonov, T.A. Orlova, V.N. Panteleev, N.K. Poletaev, L.M. Fedorov, M.P. Shcheglov. Tech. Phys. Lett., **38**, 399 (2012).
- [16] С.В. Ордин, А.И. Сомсиков. А.с. SU № 1434922 (1 июля 1988 г.).

Редактор А.Н. Смирнов

Local thermoelectric effects in wide-gap semiconductors

S.V. Ordin, Yu.V. Zhilyaev, V.V. Zelenin, V.N. Panteleev

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract In structures on the basis of wide-gap semiconductors the experimental confirmation of emergence of local thermoelectromotive force, found earlier on silicon $p-n$ -junctions, is obtained. Current-voltage and frequency characteristics of asymmetrical potential barrier at the GaN/Mg interface, and $p-i-n$ -structure based on GaAs have been investigated. It is shown that, similarly to wide-gap semiconductors, the contribution of the local thermoelectromotive force determines the current-voltage characteristics and the frequency characteristics of the current-watt performance, in particular Gaussian resonance. The proper account and use of local thermoelectromotive force allowed for cardinal increase in the efficiency of thermoelectric conversion and improvement of the operating parameters of microelectronic elements.