

06.1

Сверхвысокочастотные диоды Шоттки на основе одиночных нитевидных нанокристаллов GaN

© К.Ю. Шугуров¹, А.М. Можаров², Г.А. Сапунов¹, В.В. Фёдоров¹, Э.И. Моисеев³,
С.А. Блохин⁴, А.Г. Кузьменков⁴, И.С. Мухин^{1,5}

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: shugurov17@mail.ru

Поступило в Редакцию 21 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 16 июня 2022 г.

Принято к публикации 17 июня 2022 г.

Изготовлена серия диодов Шоттки на основе одиночных нитевидных нанокристаллов GaN, демонстрирующих электронный тип проводимости. По данным малосигнального частотного анализа (параметр S_{21}) диодных структур при различных напряжениях смещения определены параметры соответствующей эквивалентной электрической схемы. Показано, что частота отсечки созданных диодов достигает 27.5 GHz.

Ключевые слова: GaN, нитевидные нанокристаллы, СВЧ, диод Шоттки.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.15.53127.19229

Сегодня кремниевая электроника в области силовых и сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств практически достигла своих фундаментальных возможностей, определяемых физическими параметрами данного материала [1]. Это стимулирует поиск новой материальной базы, покрывающей постоянно растущие требования, предъявляемые к современным полупроводниковым компонентам.

Нитрид галлия (GaN) является одним из перспективных материалов для электроники благодаря наличию у него ряда важных свойств: широкой запрещенной зоны, электрической, термической, химической и радиационной стойкости. Однако, несмотря на коммерческую доступность ряда компонентов на основе GaN, его активное внедрение и серийный выпуск для гражданского применения на данный момент ограничены экономическими факторами. Стоимость планарной GaN-технологии высока из-за необходимости использования дорогостоящих ростовых подложек и, что более важно, необходимости формирования буферных слоев для компенсации решеточного рассогласования GaN с материалом подложки. Отметим, что высококачественные подложки GaN очень дороги и массово недоступны. Даже при использовании кремниевых подложек из-за технологических сложностей, в первую очередь обусловленных большим решеточным рассогласованием GaN с Si (на уровне 17%), конечная стоимость таких изделий остается весьма высокой.

Ограничения, связанные с рассогласованием параметров кристаллических решеток GaN и Si, могут быть преодолены при переходе от планарных слоев к масси-

вам нитевидных нанокристаллов (ННК, англ. NWs — nanowires). За счет своей геометрии ННК обладают рядом уникальных свойств и преимуществ. Синтезируемые ННК имеют превосходное кристаллическое качество [2]. Возникающие во время роста механические напряжения в ННК эффективно релаксируют на боковой поверхности, поэтому они практически не имеют дефектов даже в случае синтеза на подложках с существенным рассогласованием по параметру решетки [3]. При промышленном исполнении компоненты на базе GaN обычно состоят из многослойных эпитаксиальных структур, в то время как ННК высокого кристаллического качества могут быть синтезированы без использования буферных слоев. Более того, субмикронные поперечные размеры ННК (обычно порядка 100–200 nm) обуславливают сверхмалые величины емкости полупроводникового прибора, что немаловажно для обеспечения быстродействия.

Одним из ключевых элементов СВЧ-электроники является диод Шоттки. Ввиду того что в таких диодах практически отсутствует инжекция неосновных носителей, отсутствует и соответствующая диффузионная емкость. Поэтому они, как правило, отличаются повышенным быстродействием по сравнению с диодами на основе $p-n$ -перехода. Диоды Шоттки находят применение при создании устройств различного назначения, особенно приемников и смесителей частот СВЧ-колебаний.

В литературе представлены работы, посвященные исследованию статических характеристик диодов Шоттки на основе ННК GaN (см., например, [4,5]). В работах [6,7] исследуются динамические характеристики структур на основе одиночных или нескольких ННК

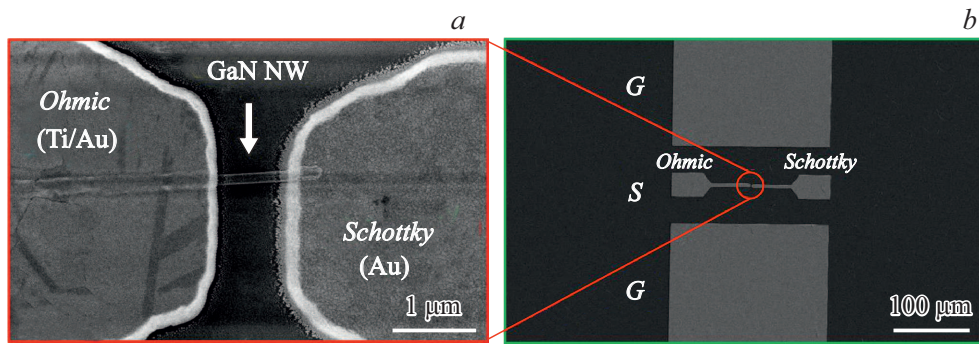


Рис. 1. Типичное СЭМ-изображение изготовленной диодной структуры в микро- (a) и макромасштабе (b).

GaN, однако их частотные возможности не представлены.

Настоящая работа посвящена созданию диодов Шоттки на основе одиночных ННК GaN, а также исследованию их статических и динамических характеристик.

ННК GaN были синтезированы при помощи молекулярно-пучковой эпитаксии на кремниевых подложках по аналогии с работой [8]. Принудительного легирования при росте ННК не проводилось, при этом фоновый уровень легирования составляет порядка 10^{17} cm^{-3} (электронный тип проводимости) [8]. Дизайн диодных структур в рамках данного исследования предполагает отделение ННК от ростовой подложки с последующим переносом на вспомогательную непроводящую подложку-носитель из кварца, а также формирование электрических контактов к ним. Для отделения ННК часть ростового образца помещалась в колбу с изопропиловым спиртом с последующей обработкой в ультразвуковой ванне. Далее при помощи микропипетки взвесь с ННК наносилась на кварцевую пластину и высушивалась под потоком азота. Контактные площадки были выполнены в GSG-конфигурации (ground–signal–ground) [9], необходимой для проведения соответствующих СВЧ-исследований. Для формирования металлических контактов проводились фотолитография, напыление слоев металлов и процедура взрывного удаления (lift-off) остатков фоторезиста. При этом на первом этапе формировались Ti/Au-металлизация G-площадок и омические контакты (Ti/Au) к одним концам лежащих ННК GaN, а на втором — контакты с барьером Шоттки на основе Au к другим концам ННК. На рис. 1, a, b представлены типичные изображения диодной структуры, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Всего в рамках настоящей работы было исследовано восемь диодных структур. Далее будет представлен анализ полученных данных для диода, продемонстрировавшего лучшие частотные характеристики.

На рис. 2, a приведено схематическое изображение экспериментального стенда для оценки частотных свойств диодов на основе ННК GaN. С помощью векторного анализатора цепей (VNA) Keysight Technologies

N5234B был проведен анализ S-параметров (матрица рассеяния многополюсника [10]) в диапазоне частот 0.1–40 GHz. Диоды подключались к векторному анализатору цепей по двухпортовой схеме с помощью СВЧ-зондов в GSG-топологии. В качестве источника напряжения использовался источник-измеритель Keithley 2401. Напряжение смещения на исследуемые диоды подавалось с помощью смесителей SHF BT 45R. Источником сигнала служил порт 1 (P1), а приемником — порт 2 (P2).

На рис. 2, c представлена измеренная вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода на основе одиночного ННК GaN (см. СЭМ-изображение на рис. 1, a, диаметр ННК 160 nm, зазор между контактами 1 μm). Диод демонстрирует характерное выпрямление с напряжением открытия порядка 1 V. Полярность напряжения, соответствующая открытию диода, отвечает электронному типу проводимости ННК. Характеристики диодов будут во многом зависеть от их последовательного сопротивления, которое в свою очередь в случае ННК зависит от их геометрических параметров (диаметр, длина ННК между контактами). Для определения последовательного сопротивления ННК в рамках диодной структуры необходимо приложить существенное прямое смещение, что может привести к деградации диода. Тем не менее для дальнейшего исследования можно ограничиться дифференциальным сопротивлением, которое для данной структуры составляет 76 kΩ (при напряжении +3 V).

Для более детального анализа полученных зависимостей, а также для оценки частоты отсечки диода была рассмотрена эквивалентная схема исследуемых структур (рис. 2, b). Здесь R_j и R_s соответствуют сопротивлению барьера Шоттки и последовательному сопротивлению ННК, C_j — емкость барьера Шоттки, C_{cont} — емкость контактных площадок (между S- и G-полосками), а C_p — шунтирующая паразитная емкость, обусловленная зазором между сигнальными контактными площадками. В настоящей работе не проводилось оптимизации топологии контактных площадок для согласования с характеристическим импедансом линии передачи (50 Ω). Однако результаты малосигнального частотного анализа контактных площадок выявили отсутствие существенных

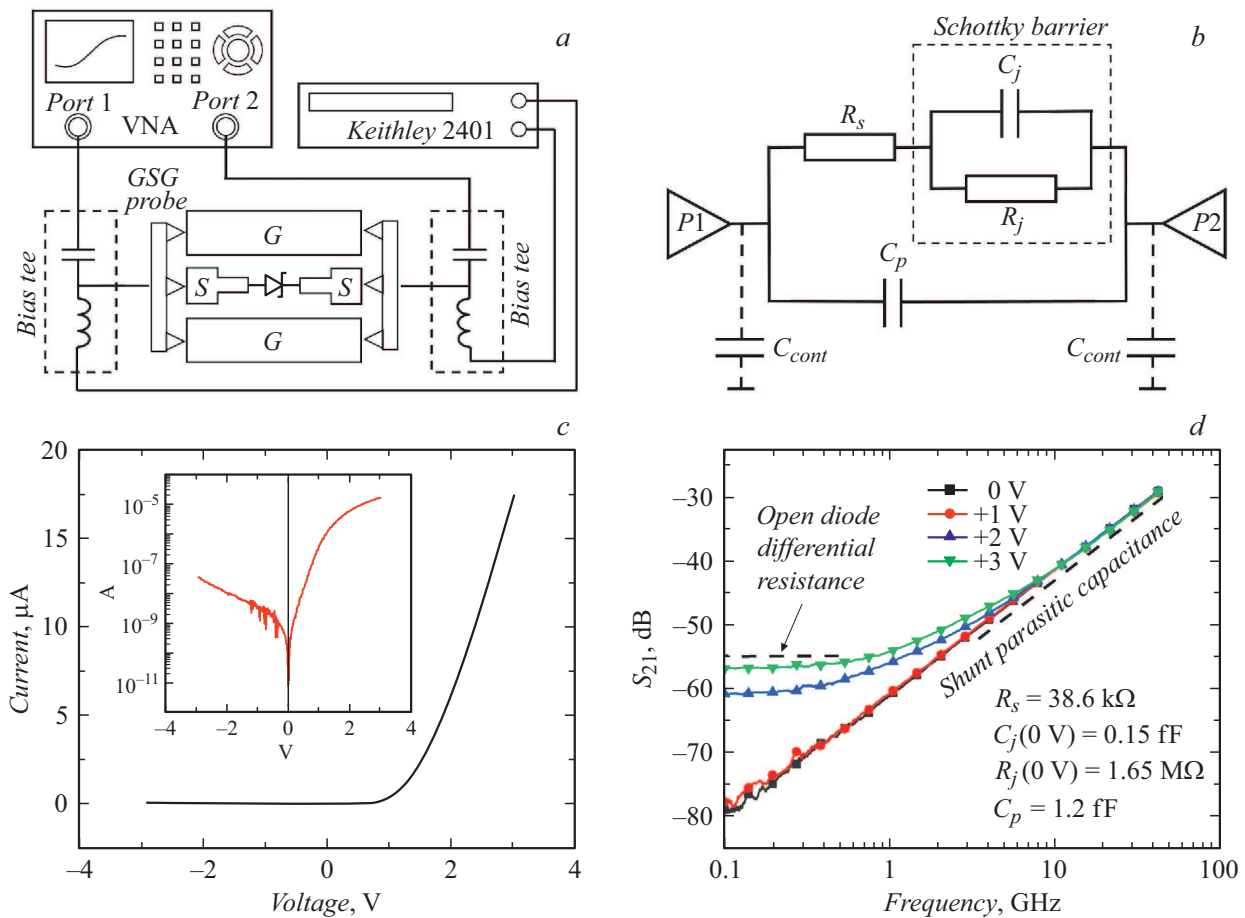


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментального стенда (a), предложенная эквивалентная схема исследуемых диодных структур (b), VAX (c) и кривые S_{21} при различных напряжениях смещения (d) диода на основе ННК GaN.

потерь на прохождение СВЧ-сигнала в рассматриваемом частотном диапазоне (т.е. емкостью C_{cont} контактных площадок в данном случае можно пренебречь).

На рис. 2, d представлены результаты малосигнального частотного анализа в виде параметра $S_{21}(f)$ для одного из диодов на основе одиночного ННК GaN при различных напряжениях смещения. В рассматриваемом диапазоне частот кривые $S_{21}(f)$ принимают вид, характерный для резистивно-емкостной нагрузки. При этом резистивная составляющая начинает проявляться при частотах менее 10 GHz по мере увеличения прямого смещения структуры, когда сопротивление барьера Шоттки резко снижается. В диапазоне 0.1–0.4 GHz для относительно высоких напряжений прямого смещения параметр S_{21} практически не зависит от частоты, что соответствует режиму открытого диода, и сигнал распространяется преимущественно через ННК. Для такого режима можно оценить дифференциальное сопротивление диода ($R_s + R_j$), которое при напряжении прямого смещения +3 V достигает 71 k Ω , что хорошо согласуется с данными, полученными из VAX.

На частотах же свыше 10 GHz величина прямого смещения практически не влияет на форму кривой $S_{21}(f)$,

что вызвано уже доминирующим вкладом шунтирующей паразитной емкости зазора между контактными площадками (C_p) при прохождении СВЧ-сигнала через диод. Частота отсечки диода f_{cutoff} может быть рассчитана согласно следующей формуле [11]:

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi R_s C_j}. \quad (1)$$

Оценка параметров R_s и C_j выполнялась путем аппроксимации экспериментальных зависимостей S_{21} аналитическим выражением следующего вида:

$$S_{21} = \frac{2Z_0}{Z + Z_0}, \quad Z = (R_s + R_j || C_j) || C_p. \quad (2)$$

Здесь Z — импеданс эквивалентной схемы, а Z_0 — характеристический импеданс линии передачи СВЧ-сигнала (в данном случае 50 Ω). Параметры R_j и C_p также варьировались. На рис. 2, d представлены полученные значения параметров эквивалентной схемы для рассматриваемого диода. Частота отсечки в данном случае достигает 27.5 GHz, что лежит в частотном диапазоне работы спутниковых систем связи, а также сетей 5G [12]. Следует также отметить, что барьерная

емкость оказывается в разы меньше, чем шунтирующая паразитная емкость контактных площадок, что требует оптимизации геометрии структуры.

В заключение отметим, что были изготовлены образцы диодов Шоттки на основе одиночных ННК GaN. Исследованы ВАХ диодов. Методом малосигнального частотного анализа изучены частотные зависимости параметра S_{21} в широком диапазоне частот. Проведена аппроксимация экспериментальных данных в рамках предложенной эквивалентной схемы диода на основе ННК GaN. Анализ полученных данных для диода, продемонстрировавшего лучшие частотные характеристики, показал, что частота отсечки составляет 27.5 GHz. Для дальнейшего совершенствования диодов необходимо провести тщательную оптимизацию дизайна структуры.

Финансирование работы

Синтез нитевидных нанокристаллов выполнен при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30004). Постростовая обработка проведена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (СП-4018.2022.3, СП-2169.2021.1), а также Российского фонда фундаментальных исследований (научный проект № 19-38-90026). Исследование частотных свойств осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L.F.S. Alves, R.C.M. Gomes, P. Lefranc, R. De A. Pegado, P.-O. Jeannin, B.A. Luciano, F.V. Rocha, in *2017 Brazilian Power Electron. Conf.* (IEEE, 2017), p. 1. DOI: 10.1109/COBEP.2017.8257396
- [2] R. Calarco, R.J. Meijers, R.K. Debnath, T. Stoica, E. Sutter, H. Lüth, *Nano Lett.*, **7** (8), 2248 (2007). DOI: 10.1021/nl0707398
- [3] A.D. Bolshakov, V.V. Fedorov, K.Y. Shugurov, A.M. Mozharov, G.A. Sapunov, I.V. Shtrom, M.S. Mukhin, A.V. Uvarov, G.E. Cirlin, I.S. Mukhin, *Nanotechnology*, **30** (39), 395602 (2019). DOI: 10.1088/1361-6528/ab2c0c
- [4] G. Sabui, V.Z. Zubialevich, M. White, P. Pampili, P.J. Parbrook, M. McLaren, M. Arredondo-Arechavala, Z.J. Shen, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **64** (5), 2283 (2017). DOI: 10.1109/TED.2017.2679727
- [5] Y. Liao, T. Chen, J. Wang, Y. Ando, W. Cai, X. Yang, H. Watanabe, J. Hirotsu, A. Tanaka, S. Nitta, Y. Honda, K.J. Chen, H. Amano, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60** (7), 070903 (2021). DOI: 10.35848/1347-4065/ac06b5
- [6] C.-J. Chiang, T.M. Wallis, D. Gu, A. Imtiaz, P. Kabos, P.T. Blanchard, K.A. Bertness, N.A. Sanford, K. Kim, D. Filipovic, *J. Appl. Phys.*, **107** (12), 124301 (2010). DOI: 10.1063/1.3428391
- [7] T.M. Wallis, D. Gu, A. Imtiaz, C.S. Smith, C.-J. Chiang, P. Kabos, P.T. Blanchard, N.A. Sanford, K.A. Bertness, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, **10** (4), 832 (2011). DOI: 10.1109/TNANO.2010.2084588
- [8] A.D. Bolshakov, A.M. Mozharov, G.A. Sapunov, I.V. Shtrom, N.V. Sibirev, V.V. Fedorov, E.V. Ubyivovk, M. Tchernycheva, G.E. Cirlin, I.S. Mukhin, *Beilstein J. Nanotechnol.*, **9** (1), 146 (2018). DOI: 10.3762/bjnano.9.17
- [9] L.F. Tiemeijer, R.J. Havens, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **50** (3), 822 (2003). DOI: 10.1109/TED.2003.811396
- [10] D.A. Frickey, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **42** (2), 205 (1994). DOI: 10.1109/22.275248
- [11] Y. Liu, W. Yao, H. Liu, L. Yang, S. Liu, L. Yang, F. Wang, Y. Ren, J. Shen, M. Zhang, Z. Wu, Y. Liu, Q. Wang, X. Wang, B. Zhang, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **133**, 105934 (2021). DOI: 10.1016/j.mssp.2021.105934
- [12] Y. Cho, H.-K. Kim, M. Nekovee, H.-S. Jo, *IEEE Access.*, **8**, 163618 (2020). DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022044