

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.375.4, 621.382.323

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА ПЛАСТИНАХ КРЕМНИЯ С ЭПИТАКСИАЛЬНЫМ СЛОЕМ ВЫСОКООМНОГО КРЕМНИЯ

© 2023 г. И. С. Езубченко^{1,*}, А. А. Андреев¹, М. Я. Черных¹, И. В. Куликов¹,
Д. А. Мамичев¹, Ю. В. Грищенко¹, П. А. Перминов¹, И. А. Черных¹, М. Л. Занавескин¹,
С. Д. Федотов², Е. М. Соколов², В. Н. Стаценко²

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Акционерное общество “Эпиэл”, Москва, Зеленоград, Россия

*E-mail: ezivan9@gmail.com

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 27.09.2023 г.

Принята к публикации 05.10.2023 г.

На AlN/GaN-гетероструктурах на пластинах кремния с эпитаксиально дороженным слоем высокоомного кремния созданы транзисторы с топологической нормой затвора 0.1–0.25 мкм и исследованы их характеристики. Транзисторы характеризуются значением максимального тока насыщения выше 1.1 А/мм и крутизной передаточной характеристики более 350 мСм/мм. Переход MSG/MAG располагается на частотах 20, 37.5 и более 40 ГГц при коэффициенте усиления на частоте 10 ГГц, равном 15.63, 15.92 и 16.55 дБ для транзисторов с длиной затвора 250, 150 и 100 нм соответственно. Потери СВЧ-сигнала на частоте 30 ГГц составили 0.89 дБ/мм.

DOI: 10.56304/S2782375X23030038

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время подложки кремния активно используются для эпитаксии гетероструктур на основе нитрида галлия [1–3]. Основой повышенного интереса к пластинам кремния являются низкая стоимость по сравнению с пластинами карбида кремния, а также наличие пластин большого диаметра вплоть до 300 мм. Отсутствие в России технологии роста высокоомных подложек Si диаметром более 100 мм, получаемых методом бестигельной зонной плавки, значительно ограничивают возможность их применения для роста гетероструктур GaN транзисторов с высокой подвижностью электронов (*high electron mobility transistor*, **HEMT**) под СВЧ-применения. В связи с этим было предложено в качестве альтернативы использовать уникальные сверхвысокоомные эпитаксиальные структуры кремния [4]. Ранее проведенные технологические работы показали возможность применения данного материала для получения GaN HEMT-гетероструктур [5, 6]. Актуальным вопросом являются характеристика гетероструктур и транзисторов, созданных на пластинах со сверхвысокоомной эпитаксиальной структурой кремния, и определение эффективности их использования для создания СВЧ-устройств. Данная работа посвящена исследова-

нию характеристик транзисторов с топологическими нормами 0.1–0.25 мкм на отечественных пластинах, созданных по технологии эпитаксиального доразрабатывания высокоомного кремния.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В работе использована гетероструктура с барьерным слоем AlGaIn толщиной 16 нм, мольной долей алюминия 23% и *in situ*-пассивацией Si₃N₄ толщиной 3 нм, синтезированная на структурах сверхвысокоомного эпитаксиального кремния на подложках марки КДБ-10 диаметром 100 мм. Удельное сопротивление эпитаксиального слоя Si составило 2–5 кОм·см. В целях получения гладкой поверхности эпитаксиального слоя Si при росте на подложке с ориентацией Si(111) ± 0.5° был применен многостадийный метод роста с использованием хлоридных и гидридных кремнийсодержащих газовых реагентов. Создание сверхвысокоомного эпитаксиального слоя кремния и синтез гетероструктуры проводили АО “Эпиэл” (Зеленоград, Россия).

Были созданы двухзатворные транзисторы с периферией затвора 2 × 100 мкм, расстояние исток–сток 3 мкм (рис. 1). Контакты к двумерному электронному газу формировали путем эпитакси-

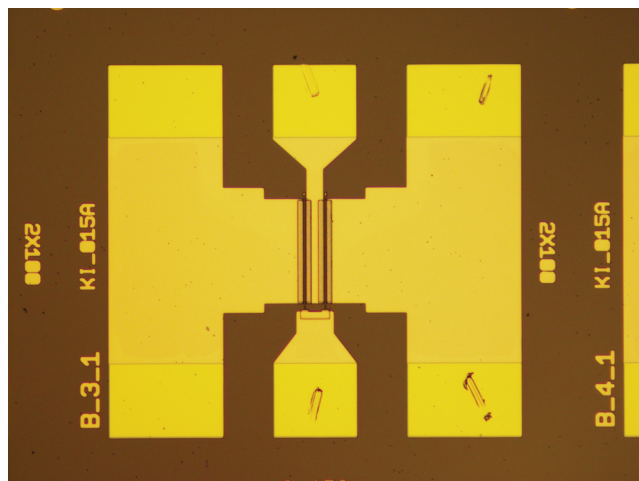


Рис. 1. Изображение транзистора с длиной затвора 100 нм.

ального дорастивания нитрида галлия с контролируемым профилем легирования кремнием [7, 8] с последующей металлизацией. Затворы создавали по технологии отдельно стоящих затворов с использованием трехслойной системы резистов с помощью метода электронно-лучевой литографии. Длина затвора составляла 0.1, 0.15 и 0.25 мкм. Далее методом плазменно-химическое осаждения из паровой фазы получали нитрид кремния толщиной 200 нм.

Характеризацию гетероструктуры и технологического процесса осуществляли при помощи специального параметрического монитора, который включал в себя тесты ван дер Пау для анализа слоевого сопротивления, тесты для анализа контактного сопротивления к двумерному электронному газу методом длинной линии, компланарные линии для анализа потерь СВЧ-сигнала. Параметрический монитор располагался в нескольких частях пластины для определения однородности параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Слоевое сопротивление гетероструктуры составило 460 ± 10 Ом/квadrat, оно несколько вы-

ше типичных значений коммерчески доступных гетероструктур на кремнии (менее 400 Ом/квadrat), что может свидетельствовать о необходимости оптимизации архитектуры эпитаксиальных слоев и корректировки ростовых параметров. Контактное сопротивление составило 0.13 ± 0.03 Ом · мм.

На рис. 2 приведены типичные статические характеристики транзисторов с длиной затвора 100 нм. Максимальный ток насыщения стока составил 1.2 А/мм при $V_{gs} = +2$ В и напряжении на стоке $V_{ds} = +6$ В. Ток насыщения при $V_{gs} = 0$ В составил 0.9 А/мм. Максимальная крутизна транзистора $G_m = 407$ мСм/мм. Напряжение отсечки $V_{отс} = -3.2$ В. Статические характеристики изготовленных транзисторов с различной длиной затвора приведены в табл. 1. Как и ожидалось, с увеличением длины затвора происходит незначительное снижение тока насыщения транзистора и его максимальной крутизны одновременно с повышением напряжений отсечки и пробоя [9]. Высокие значения тока насыщения для созданных транзисторов с разной длиной затвора позволяют ожидать значения выходной мощности на уровне 5 Вт/мм при напряжениях питания 28 В и более [10]. Однако высокое значение слоевого сопротивления приводит к увеличению напряжения насыщения канала двумерного газа, что в свою очередь ведет к уменьшению выходной мощности. Таким образом, для эффективного использования представленных гетероструктур для значений питания 20 В и менее необходимо уменьшение слоевого сопротивления до 300 Ом/квadrat.

Измеренные статические характеристики соответствуют лучшим результатам на карбиде кремния [10, 11], что говорит как о высоком качестве гетероструктур, так и о высоком уровне технологического процесса.

Слабосигнальные характеристики анализировали в частотном диапазоне 1–40 ГГц. На рис. 3 приведены частотные зависимости коэффициента усиления по мощности для транзисторов с различной длиной затвора. Как видно, положение точки перехода максимально стабильного коэффициента усиления по мощности (*maximum stable gain*, *MSG*) в максимально достижимый коэффи-

Таблица 1. Статические характеристики транзисторов с различной длиной затвора

Длина затвора, нм	Максимальный ток стока $I_{\max}$ при $V_{gs} = +2$ В, А/мм	Ток насыщения I_0 при $V_{gs} = 0$ В, А/мм	Напряжение отсечки $V_{отс}$ при $I_{ds} = 1$ мА/мм и $V_{ds} = 5$ В, В	Максимальная крутизна G_m , мСм/мм	Пробивное напряжение V_{br} при $V_{gs} = -6$ В, В	Сопротивление в открытом состоянии, Ом · мм
100	1.2	0.9	–3.2	407	80–90	1.5–1.6
150	1.19	0.87	–2.7	374	100–110	
250	1.16	0.78	–2.5	371	110–120	

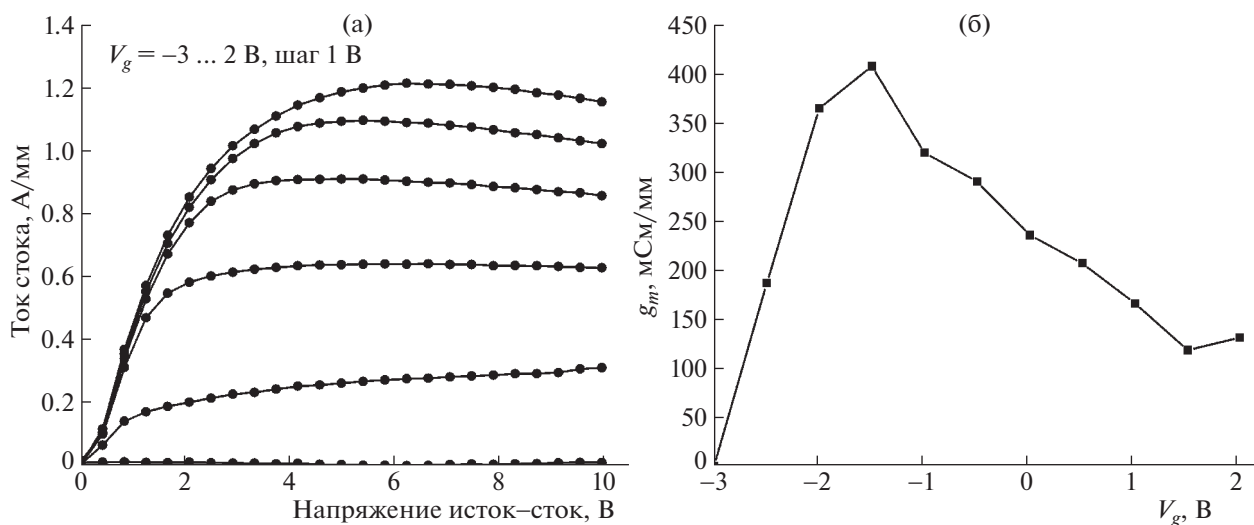


Рис. 2. Выходные статические характеристики транзисторов: а – вольт-амперная характеристика транзистора (напряжение на затворе $V_g = -3 \dots +2$ В с шагом 1 В), б – крутизна транзистора.

коэффициент усиления по мощности (*maximum available gain, MAG*) смещается в низкочастотную область с увеличением длины затвора и находится на 20, 37.5 и более 40 ГГц для транзисторов с длиной затвора 250, 150 и 100 нм соответственно. Коэффициент усиления созданных транзисторов на частоте 10 ГГц равен 15.63, 15.92 и 16.55 дБ для транзисторов с длиной затвора 250, 150 и 100 нм соответственно. Потери СВЧ-сигнала в компланарной линии составили 0.89 дБ/мм на частоте 30 ГГц.

На основе исследования статических и малосигнальных характеристик можно заключить, что созданные на базе гетероструктур на подложках с

высокоомным эпитаксиальным слоем кремния транзисторы могут быть использованы как активные элементы при проектировании и создании СВЧ-устройств в широком диапазоне частот вплоть до 30 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе гетероструктуры нитрида галлия на пластине низкоомного кремния с эпитаксиальным дорожечным высокоомным слоем кремния были созданы транзисторы с длиной затвора 0.1, 0.15 и 0.25 мкм, на которых были изучены статические и малосигнальные характеристики.

Транзисторы характеризовались значением максимального тока насыщения выше 1.1 А/мм и крутизной передаточной характеристики более 350 мСм/мм. Переход MSG/MAG составил 20, 37.5 и более 40 ГГц при коэффициенте усиления на частоте 10 ГГц, равном 15.63, 15.92 и 16.55 дБ для транзисторов с длиной затвора 250, 150 и 100 нм соответственно. Потери СВЧ-сигнала на частоте 30 ГГц составили 0.89 дБ/мм.

Полученные результаты находятся на высоком мировом уровне, имеют высокий потенциал дальнейшего развития, а созданные на базе гетероструктур на подложках с высокоомным эпитаксиальным слоем кремния транзисторы имеют перспективы использования при создании СВЧ-устройств в широком диапазоне частот вплоть до 30 ГГц.

Работа выполнена по государственному заданию Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

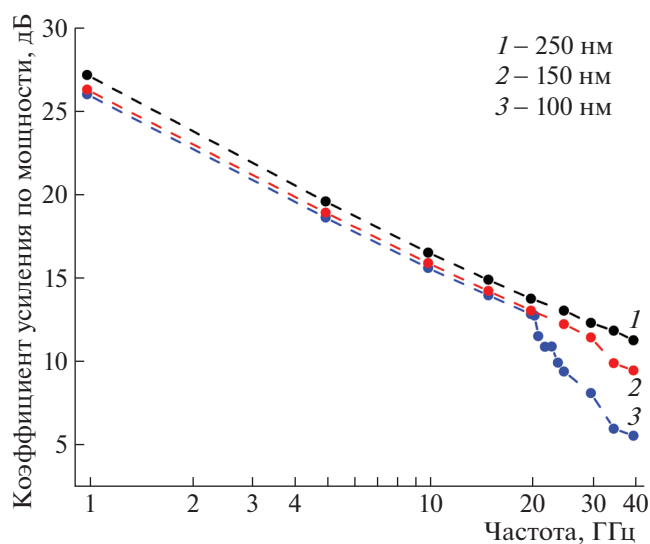


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента усиления по мощности для транзисторов с различной длиной затвора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhong Y., Zhang J., Wu S. et al.* // *Fundam. Res.* 2022. V. 2. P. 462.
<https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.11.028>
2. *Neininger P., Mikulla M., Doring P. et al.* // *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2023. V. 4. P. 100177.
<https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100177>
3. *Then H.W., Dasgupta S., Radosavljevic M. et al.* // *IEEE Int. Electron Devices Meeting Tech. Dig.*, 2019, San Francisco, CA, USA, 07–11 December 2019.
<https://doi.org/10.1109/IEDM19573.2019.8993583>
4. *Волков А.С., Дементьев В.Б., Люблин В.В.* Пат. 2606809 Российская Федерация, МПК H01L21/20. Способ изготовления кремниевой эпитаксиальной структуры. Заявитель и патентообладатель Акционерное общество “Эпиэл”. № 2015142243, заявл. 06.10.2015, опублик. 10.01.2017, Бюл. № 1.
5. *Федотов С.Д., Лундин В.В., Заварин Е.Е. и др.* // *Наноиндустрия*. 2020. Т. 13. № S 5–1 (102). С. 209.
<https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.5s.209.212>
6. *Федотов С.Д., Лундин В.В., Заварин Е.Е. и др.* // *Наноиндустрия*. 2021. Т. 14. № S7–14 (107), С. 197.
<https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.197.200>
7. *Huang T., Liu C., Bergsten J. et al.* // *Proc. 2016 Compound Semiconductor Week (CSW)*. Toyama, Japan. 2016. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ICIPRM.2016.7528722>
8. *Guo H.-Y., Lv Y.-J., Gu G.-D. et al.* // *Chinese Phys. Lett.* 2015. V. 32. № 11. P. 118501.
<https://doi.org/10.1088/0256-307x/32/11/118501>
9. *Saadaoui S., Fathallah O., Maaref H.* // *J. Phys. Chem. Solids*. 2022. V. 161. P. 110418.
<https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2021.110418>
10. *Liu J., Zhu J., Mi M. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2022. V. 120. P. 052101.
<https://doi.org/10.1063/5.0080120>
11. *Harrouche K., Kabouche R., Okada E. et al.* // *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. Los Angeles, CA, USA, 04–06 August 2020.
<https://doi.org/10.1109/IMS30576.2020.9223971>