

06.1;07.2;08;13.1

Подложки с алмазным теплоотводом для эпитаксиального роста GaN

© И.О. Майборода¹, И.А. Черных¹, В.С. Седов², А.С. Алтахов², А.А. Андреев¹,
Ю.В. Грищенко¹, Е.М. Колобкова¹, А.К. Мартыанов², В.И. Конов², М.Л. Занавескин¹

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

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

E-mail: mrlbr@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 16 декабря 2020 г.

Принято к публикации 17 декабря 2020 г.

Изготовлены пластины кремния с теплоотводом из поликристаллического алмаза, в которых слой кремния и алмаза имели толщину 234 нм и 250 мкм соответственно. Теплопроводность алмаза составила $1290 \pm 190 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках кремния с теплоотводом из поликристаллического алмаза выращены нитридные гетероструктуры с двумерным электронным газом. Подвижность электронов в двумерном электронном газе и его слоевое сопротивление составили $1600 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ и $300 \Omega/\square$ соответственно.

Ключевые слова: транзистор с высокой подвижностью электронов, нитридная гетероструктура, нитрид галлия, кремний, алмаз.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50792.18630

Благодаря своим физическим свойствам нитрид галлия (GaN) и транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе GaN высоко востребованы в силовой и сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике [1]. Высокие удельные мощности определяют необходимость эффективного отвода тепла из рабочей области транзисторов. Таким образом, теплопроводность материалов подложки становится фактором, определяющим предельные характеристики СВЧ дискретных транзисторов и монолитных интегральных схем. Поскольку алмаз имеет самую высокую теплопроводность среди диэлектриков, идея использования его для отвода тепла вместо карбида кремния или кремния в нитридных устройствах чрезвычайно привлекательна. Попытки прямого способа осаждения нитридных гетероструктур на алмаз успеха не принесли, поэтому поиск новых альтернативных путей интеграции алмаза в нитридную полупроводниковую технологию актуален до сих пор. Сообщается об экспериментах по сращиванию поверхностей GaN и алмаза посредством бондинга при комнатной температуре [2]. В работе [3] рассматривается возможность отведения тепла с помощью алмазных пленок, сформированных на поверхности контактов транзисторов. При эпитаксиальном росте GaN на алмазных подложках появляется проблема, связанная со значительной разницей между коэффициентами теплового расширения (КТР) GaN и алмаза. После проведения эпитаксии во время охлаждения нитридная пленка на алмазной подложке может треснуть из-за разницы в сжатии нитридной пленки и алмаза, если не предпринять меры по снижению чрезмерной деформации растяжения в нитридной пленке [4].

В настоящей работе представлен способ создания подложек, представляющих собой тонкий слой кремния на поликристаллическом алмазе высокой теплопроводно-

сти, и показано, что подобные подложки обеспечивают качество эпитаксиальных гетероструктур не хуже, чем при росте на стандартных подложках кремния.

Для изготовления кремниевых подложек с алмазным теплоотводом были использованы подложки кремния ориентации (111) на изоляторе толщиной 0.675 мм, в которых толщины кремния и оксида кремния составляли 234 и 433 нм соответственно. Изготовление подложки схематично показано на рис. 1, а.

Поликристаллический алмаз был нанесен методом химического газофазного осаждения в СВЧ-реакторе плазмохимической установки для выращивания алмазов WT-100 (2.45 GHz) производства ООО „Вандер Технолоджис“ [5] в газовой смеси метан–водород (CH_4/H_2) при следующих условиях: общий расход газа 500 sccm, давление газа 75 Torr и СВЧ-мощность 4.5 kW. Первые два часа роста концентрация CH_4/H_2 поддерживалась на уровне 6% для обеспечения хорошей адгезии и высокого качества пленки, а затем повышалась до 10%, чтобы увеличить скорость осаждения. Температура подложки поддерживалась на уровне $840 \pm 20^\circ\text{C}$, измерения осуществлялись с помощью двухлучевого пирометра Williamson 81-35-С. Длительность процесса осаждения составила 72 h. Толщина пленки и скорость роста контролировались *in situ* методом лазерной интерферометрии [6]. Толщина выращенного слоя алмаза составляла 250 мкм. Теплопроводность измерялась лазерным флэш-методом [7] и составила $1290 \pm 190 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, что практически в 3 раза превышает теплопроводность карбида кремния.

Слой кремния утоняли до нужной толщины путем последовательного механического шлифования и плазменного травления в дифториде ксенона (XeF_2).

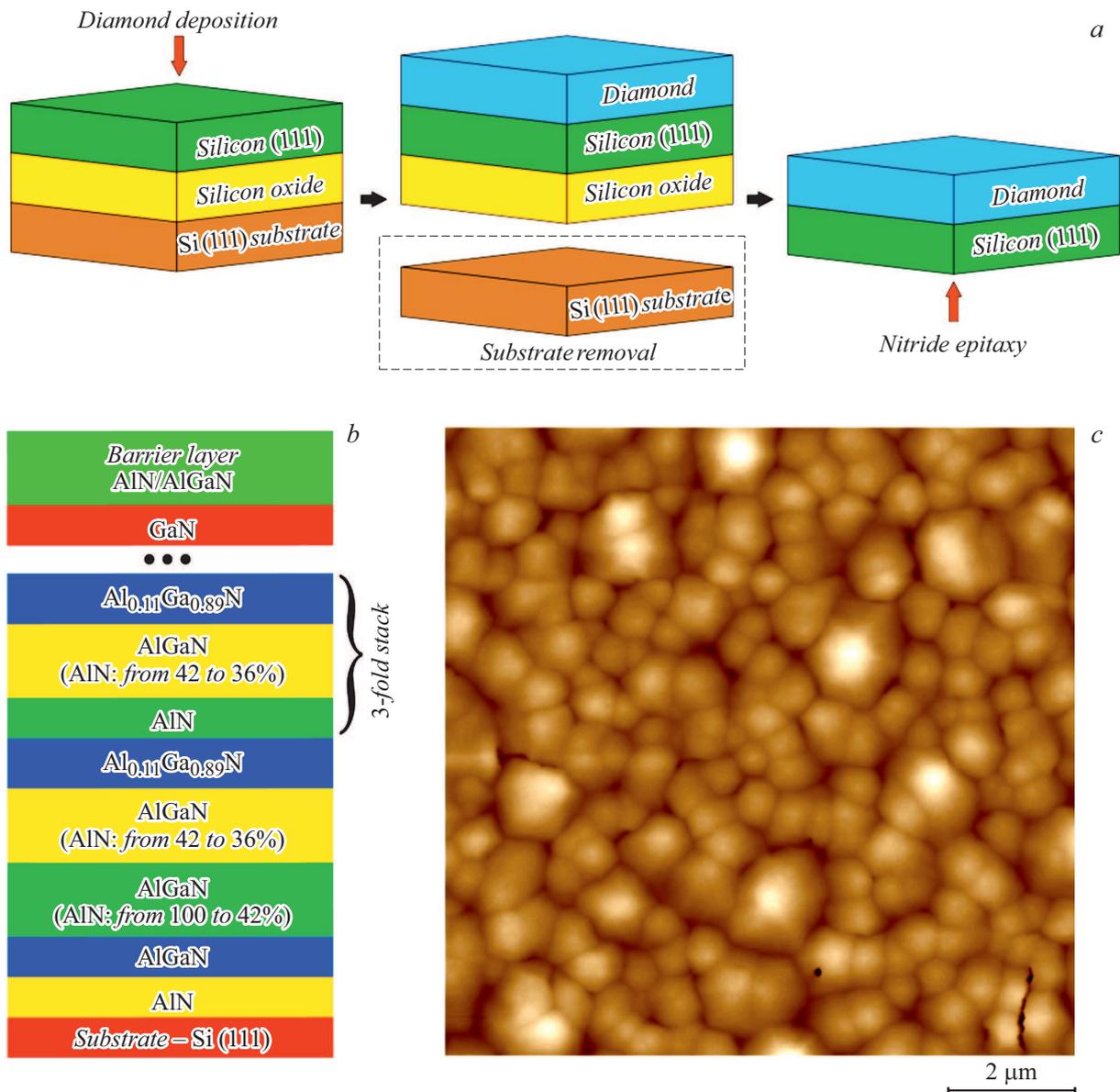


Рис. 1. *a* — изготовление алмазного теплоотвода на подложке кремния; *b* — слои гетероструктуры; *c* — АСМ-изображение поверхности нитридной гетероструктуры на подложке кремния ($10 \times 10 \mu\text{m}$).

Гетероструктуры GaN были выращены в установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) SemiTeq STE3N с аммиачным (NH_3) источником азота. Сначала была выращена гетероструктура на пластине Si (111), затем процесс роста был повторен на подложке кремния с алмазным теплоотводом. Схема структуры показана на рис. 1, *b*. С помощью нитридации в потоке аммиака на поверхности кремния формировался кристаллический нитрид кремния (Si_3N_4). Затем при 600°C были нанесены два монослоя алюминия. Далее при 900°C был нанесен низкотемпературный слой нитрида алюминия (AlN) толщиной 10 nm. При 1200°C формировался буферный слой AlN с добавленным потоком галлия, чтобы уменьшить плотность дефектов и сгладить рельеф [8]. Затем были выращены два последовательных слоя AlGaN с

постепенно меняющимся содержанием Al. В первом градиентном слое мольная доля GaN увеличивалась за счет охлаждения подложки. Во время осаждения второго слоя содержание Al постепенно уменьшалось за счет охлаждения источника алюминия. После ростового процесса во время охлаждения слои кремния, алмаза и нитрида сжимались с разными скоростями из-за разницы в КТР. Для компенсации этой разницы накапливалось сжимающее напряжение с помощью трех слоев AlGaN–AlN–AlGaN, выращенных один за другим. Рост завершался слоем GaN толщиной 300 nm и барьерным слоем AlN/AlGaN общей толщиной 26 nm. Суммарная толщина нитридных слоев составила $1.8 \mu\text{m}$.

Образец на кремниевой подложке не имел трещин. Область деформации пластины не превышала $3 \mu\text{m}$.

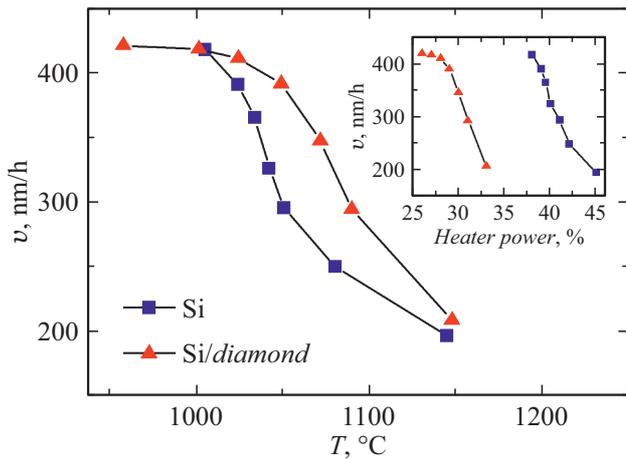


Рис. 2. Зависимость скорости роста AlGaIn от показаний пирометра. На вставке изображена зависимость скорости роста от мощности нагревателя.

Поверхность образца, выращенного на кремнии, была изучена методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактном режиме на сканирующем зондовом микроскопе NTEGRA Aura (NT-MDT). Полученная поверхность (рис. 1, *c*) состояла из ступенчатых пирамид, характерных для аммиачной МЛЭ. Среднеквадратичная шероховатость поверхности составляла 2.3 nm. Структуры содержали двумерный электронный газ с подвижностью носителей $1400 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ и слоевым сопротивлением $300 \text{ } \Omega/\square$. Электрофизические измерения описаны в работе [9]. Плотность тока насыщения достигала 0.95 A/mm (расстояние между контактами $4 \text{ } \mu\text{m}$).

Поскольку при применении МЛЭ образцы нагреваются излучением без прямого контакта, температура

подложек из разных материалов при одинаковой мощности нагревателя может различаться на сотни градусов. Для определения температурного соответствия подложек кремния и кремния с алмазным теплоотводом была проведена калибровка путем выращивания AlGaIn в условиях десорбции галлия на подложках кремния и кремния с алмазным теплоотводом. В условиях избыточного давления аммиака скорость роста AlGaIn в интервале температур от 800 до 1200°C зависит только от температуры подложки [8]. На рис. 2 представлены зависимости скорости роста от температуры подложек, измеренные инфракрасным пирометром. На вставке к рис. 2 показаны зависимости скорости роста AlGaIn от мощности нагревателя для обоих типов подложек. Видно, что мощность, необходимая для поддержания одинаковой температуры на разных подложках, различается на 10% мощности нагревателя. Показано, что разница в фактических температурах подложек кремния и кремния с алмазным теплоотводом достигает 50°C при тех же показаниях оптического пирометра.

Согласно результатам описанной калибровки, рост гетероструктуры на подложке кремния с теплоотводом из поликристаллического алмаза проводился при мощностях нагревателя, смещенных вниз на 8% относительно значений, используемых на кремниевых подложках. Гетероструктура была выращена на площади $14 \times 14 \text{ mm}$, трещин на полученной гетероструктуре обнаружено не было. Следовательно, сжимающие напряжения, накопленные при осаждении эпитаксиальных слоев, оказались достаточными для компенсации растягивающих напряжений, возникающих из-за разницы КТР алмаза, кремния и нитридов при охлаждении. Метод АСМ показал (рис. 3, *a*), что пленка имеет рельеф, аналогичный рельефу пленок на пластине монокристаллического кремния (рис. 1, *c*). Среднеквадратичная шероховатость

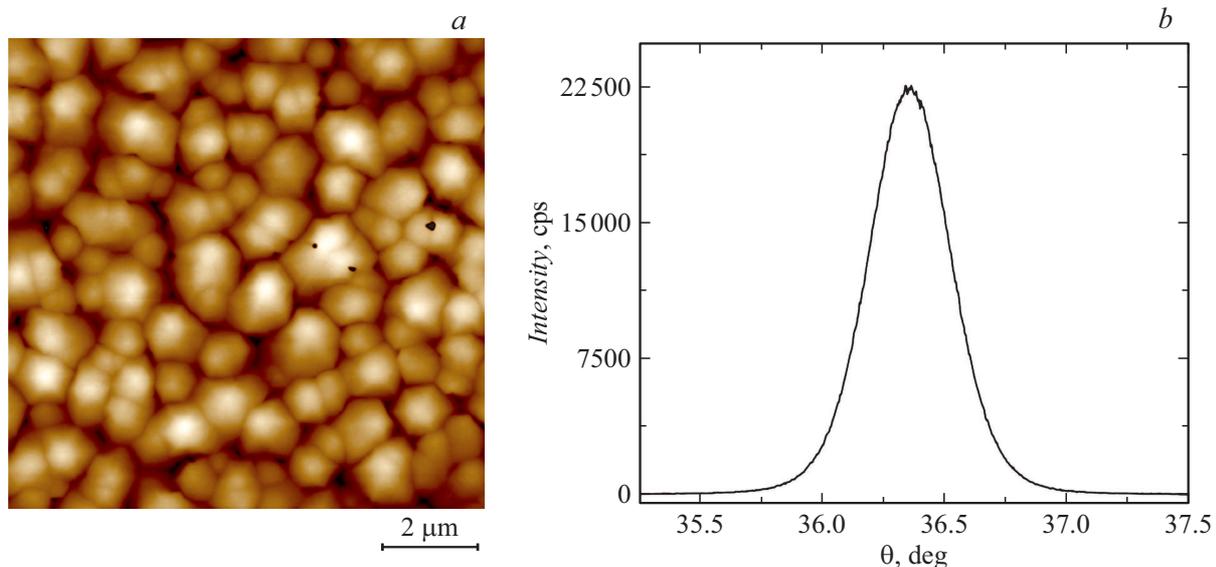


Рис. 3. *a* — АСМ-изображение поверхности нитридной гетероструктуры на подложке кремния с алмазным теплоотводом ($10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}$); *b* — кривая качания дифракции рентгеновских лучей для рефлекса GaN 0002.

изображенного участка равна 1.8 nm. Данные рентгеновской дифракции были получены с использованием дифрактометра Rigaku SmartLab ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, длина волны 1.54 Å). Кривая качания дифракции рентгеновских лучей около отражения GaN 0002 показана на рис. 3, б. Ширина дифракционной кривой качания (FWHM) составила 0.4°. Подвижность носителей в проводящем канале гетероструктуры и его слоиное сопротивление составляли $1600 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ и $300 \Omega/\square$ соответственно.

Итак, в работе были изготовлены подложки из поликристаллического алмаза с тонкой пленкой монокристаллического кремния размером $14 \times 14 \text{ mm}$. Толщина кремния составила 234 nm, слой алмаза имел толщину $250 \mu\text{m}$ и теплопроводность $1290 \pm 190 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, что в несколько раз выше теплопроводности карбида кремния. На данной подложке получена нитридная гетероструктура с двумерным электронным газом. Ширина дифракционной кривой качания для рефлекса GaN 0002 составила 0.4°. Подвижность электронов в двумерном электронном газе и его слоиное сопротивление составили $1600 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ и $300 \Omega/\square$ соответственно. Таким образом, гетероструктуры на кремниевом-алмазных подложках не уступают гетероструктурам на подложках кремния. Представленная технология формирования подложек кремния на алмазе является перспективной для электронных устройств с высоким удельным тепловыделением.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Husna Hamza, D. Nirmal, *Int. J. Electron. Commun.*, **116**, 153040 (2020). DOI: 10.1016/j.aeeu.2019.153040
- [2] F. Mu, R. He, T. Suga, *Scripta Mater.*, **150**, 148 (2018). DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.03.016
- [3] D. Meyer, T.I. Feygelson, T.J. Anderson, J.A. Roussos, M.J.Tadger, B.P. Downey, D.S. Katzer, B.B. Pate, M.G. Ancona, A.D. Koehler, K.D. Hobart, C.R. Eddy, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **35** (10), 1013 (2014). DOI: 10.1109/LED.2014.2345631
- [4] H. Tang, J.-M. Baribeau, G.C. Aers, J. Fraser, S. Rolfe, J.A. Bardwell, *J. Cryst. Growth*, **323** (1), 413 (2011). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2010.11.063
- [5] V.G. Ralchenko, A.A. Smolin, V.I. Konov, K.F. Sergeichev, I.A. Sychoy, I.I. Vlasov, V.V. Migulin, S.V. Voronina, A.V. Khomich, *Diamond Relat. Mater.*, **6** (2-4), 417 (1997). DOI: 10.1016/S0925-9635(96)00619-X
- [6] A.A. Smolin, V.G. Ralchenko, S.M. Pimenov, T.V. Kononenko, *Appl. Phys. Lett.*, **62** (26), 3449 (1993). DOI: 10.1063/1.109045
- [7] A.V. Sukhadolau, E.V. Ivakin, V.G. Ralchenko, A.V. Khomich, A.V. Vlasov, A.F. Popovich, *Diamond Relat. Mater.*, **14** (3), 589 (2005). DOI: 10.1016/j.diamond.2004.12.002
- [8] I.O. Maiboroda, A.A. Knizhnik, Yu.V. Grishchenko, I.S. Ezubchenko, M.L. Zhaneskin, O.A. Kondratev, M.Yu. Presniakov, B.V. Potapkin, V.A. Ilyin, *J. Appl. Phys.*, **122** (10), 105305 (2017). DOI: 10.1063/1.5002070
- [9] L.L. Lev, I.O. Maiboroda, M.-A. Husanu, E.S. Grichuk, N.K. Chumakov, I.S. Ezubchenko, I.A. Chernykh, X. Wang, B. Tobler, T. Schmitt, M.L. Zhaneskin, V.G. Valeev, V.N. Strocov, *Nature Commun.*, **9** (1), 2653 (2018). DOI: 10.1038/s41467-018-04354-x