

УСТРОЙСТВА И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ
НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 539.23, 621.382.323

НИТРИДНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И ТРАНЗИСТОРЫ С ВЫСОКОЙ
ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ НА СОСТАВНЫХ ПОДЛОЖКАХ
КРЕМНИЙ–ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ АЛМАЗ

© 2020 г. М. Я. Черных^{1,*}, И. С. Езубченко¹, И. О. Майборода¹, И. А. Черных¹,
Е. М. Колобкова¹, П. А. Перминов¹, В. С. Седов², А. С. Алтахов², А. А. Андреев¹,
Ю. В. Грищенко¹, А. К. Мартьянов², 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: garaeva-maria@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.09.2020 г.

После доработки 02.09.2020 г.

Принята к публикации 02.10.2020 г.

Представлен новый тип подложек для роста нитридных гетероструктур, состоящих из слоя кремния толщиной 125 нм и поликристаллического алмаза толщиной 290 мкм. Показана возможность эпитаксиального роста нитридных гетероструктур на подложках кремний–поликристаллический алмаз с характеристиками на уровне гетероструктур на подложках кремния. На тестовых транзисторах продемонстрированы: ток насыщения – более 1 А/мм и пробивное напряжение – более 90 В. Достигнутые результаты открывают возможности для появления нового класса подложек кремний–поликристаллический алмаз и создания на их основе мощных нитрид-галлиевых транзисторов с недостижимыми до этого характеристиками.

DOI: 10.1134/S1992722320060072

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим физическим свойствам нитрид галлия и транзисторы с высокой подвижностью электронов на его основе высоко востребованы в силовой и сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике [1]. Работа на высоких мощностях приводит к существенному разогреву рабочей зоны транзистора, что резко сокращает время наработки на отказ и накладывает жесткие ограничения на выходную мощность единичных транзисторов. Проблема отвода тепла для мощных СВЧ-транзисторов на сегодня является наиболее актуальной. Так как алмаз имеет самую высокую теплопроводность среди диэлектриков, идея использования его для отвода тепла в нитридных устройствах весьма привлекательна. На данный момент развиваются различные подходы к формированию теплоотвода из алмаза, к которым можно отнести бондинг GaN и алмазных пластин [2], а также формирование алмазных пленок на поверхности нитридной гетероструктуры или с обратной стороны [3]. Каждый из предлагаемых подходов обладает существенными технологическими ограничениями, связанными с необходимостью использования адгезионных слоев с низкой теплопроводностью, полировки сращиваемых пластин до атомарно гладкого уровня, а

также с деградацией гетероструктур и уже готовых устройств в процессе наращивания алмаза при высоких температурах в агрессивной среде водорода.

В работе представлен альтернативный способ создания теплоотвода на основе алмаза, заключающийся в формировании уникальных составных подложек поликристаллического алмаза с тонким слоем монокристаллического кремния. Показано, что эти подложки пригодны для эпитаксиального роста нитридных пленок без трещин и последующего формирования транзисторов с высокой подвижностью электронов на их основе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для изготовления подложек кремний–поликристаллический алмаз использовали подложки кремния на изоляторе толщиной 0.675 мм, в которых толщины тонкого функционального слоя кремния (111) и оксида кремния составляли 125 и 315 нм соответственно.

Поликристаллический алмаз толщиной 290 мкм был сформирован на обратной стороне тонкого функционального слоя кремния методом химического осаждения из газовой фазы в СВЧ-разряде (2.45 ГГц) на установке ARDIS-100

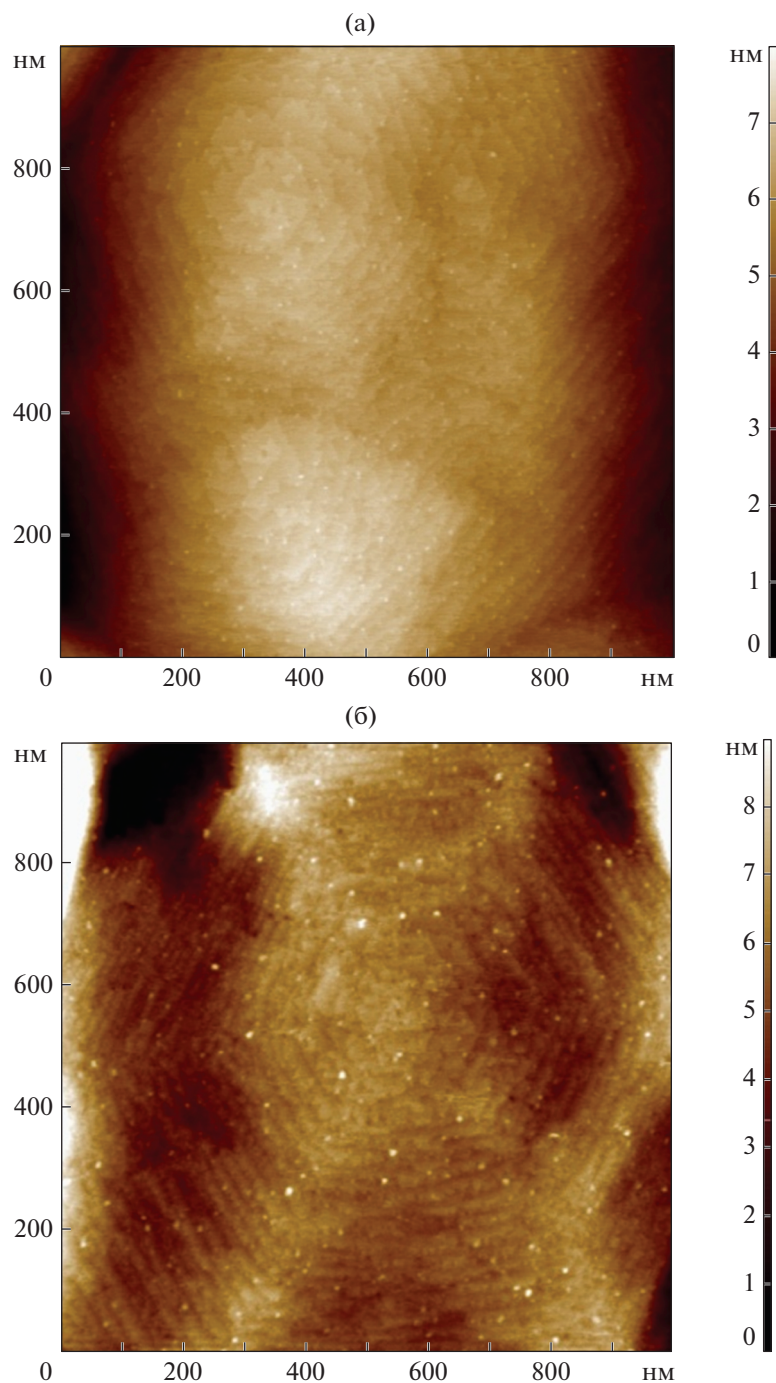


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности нитридных гетероструктур, выращенных на подложках кремния (а), кремний–поликристаллический алмаз (б).

(ООО “Оптосистемы”). Формирование пленки проводили в газовой смеси метан–водород (CH₄/H₂). Общий расход газа составлял 500 см³,

давление 75 мм рт.ст. и СВЧ-мощность 4.5 кВт. Температуру подложки поддерживали при 840°С. Длительность процесса составила 72 ч.

Таблица 1. Электрофизические характеристики ДЭГ

Образец	Концентрация носителей, 10 ¹³ см ⁻²	Подвижность, см ² /В с	Слоевое сопротивление ДЭГ, Ом/□
<i>A</i>	1.50	1400	300
<i>B</i>	1.14	1670	327

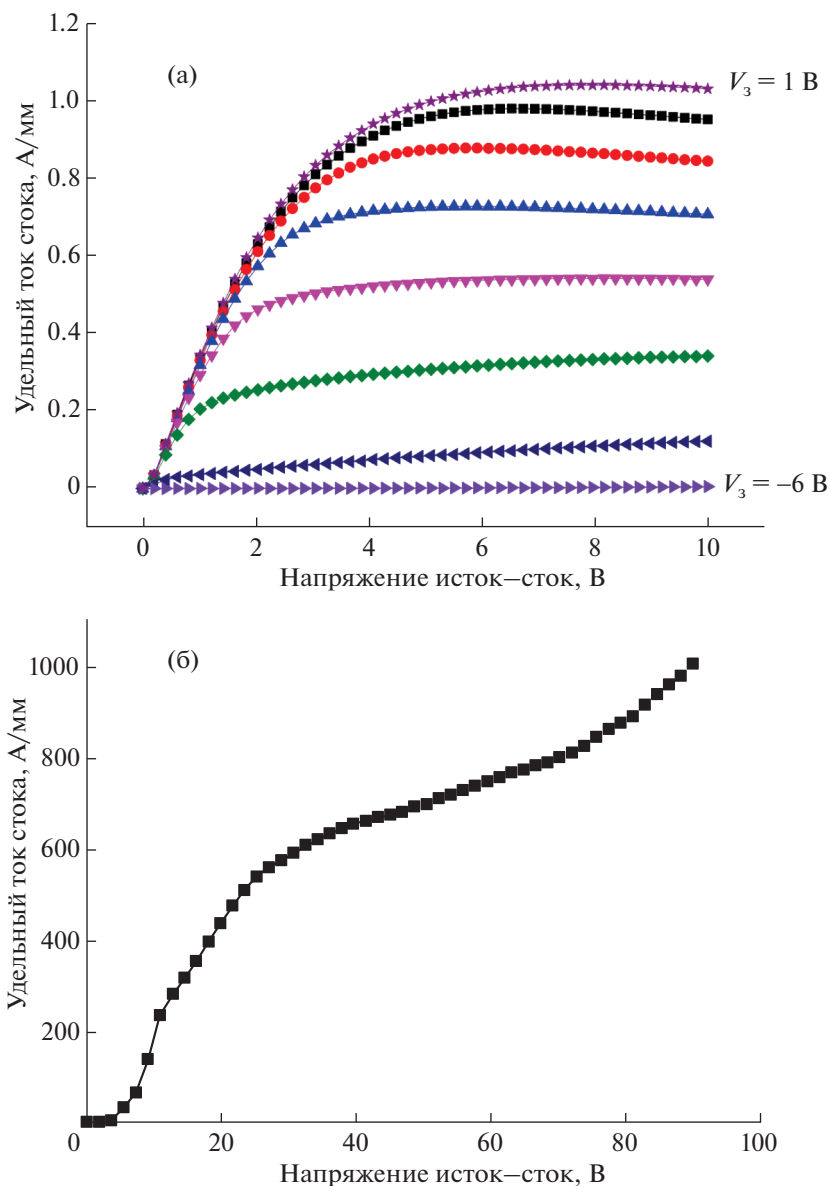


Рис. 2. Статические характеристики тестовых транзисторов на подложке кремний–поликристаллический алмаз: а – вольт-амперная характеристика тестового транзистора. Шаг по напряжению затвора – 1 В; б – зависимость тока стока от напряжения сток–исток при $V_3 = -8$ В.

В процессе подготовки подложек к эпитаксии слой толстого кремния и оксида кремния удаляли путем последовательного механического шлифования и химического травления в дифториде ксенона. Теплопроводность составной подложки кремний–поликристаллический алмаз после удаления толстых слоев кремния и оксида кремния, измеренная лазерным флэш-методом, составила 872 Вт/м К.

Гетероструктуры на основе нитрида галлия выращены в установке аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) фирмы SemiTeq. Было выращено два образца гетероструктур: на под-

ложке монокристаллического Si (111) (образец А) и на составной подложке кремний–поликристаллический алмаз (образец В). Архитектуры обеих гетероструктур идентичны. На начальной стадии роста на поверхности кремния формировали кристаллический Si_3N_4 путем нитридации в потоке аммиака [4]. Далее выращивали зародышевый слой низкотемпературного нитрида алюминия AlN (940°C, 10 нм). Слой высокотемпературного AlN формировали в режиме десорбции галлия [5] для снижения плотности дефектов и сглаживания рельефа (1130°C, 100 нм). Далее формировали буфер общей толщиной ~1.5 мкм, содержащий слой AlGaIn с различной долей Al, обеспечивающий

эффективное накопление сжимающих напряжений. Затем формировали канальный GaN (840°C, 300 нм) и барьерный AlN/AlGaIn (840°C, 26 нм) слой.

Поверхность образцов изучали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе NTEGRA Aura (NT-MDT) в полуконтактном режиме.

Электрофизические свойства двумерного электронного газа (ДЭГ) исследовали четырехзондовым методом Ван дер Пау на установке Hall system 9700A (Lake Shore Cryotronics). Измерения статических параметров проводили на зондовой станции Cascade PM5 (Cascade Microtech) с помощью двухканального источника-измерителя 2636 В (Keithley) при комнатной температуре на постоянном токе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование нитридных пленок на рассогласованных по параметрам решеток и коэффициентам теплового расширения подложек представляет собой сложную технологическую задачу [6]. Выбранная архитектура гетероструктуры обеспечила накопление необходимых механических напряжений, в результате чего оба образца характеризовались отсутствием трещин на поверхности.

АСМ-исследование образцов показало, что поверхность сформированных пленок является атомарно гладкой со ступенчатой структурой, характерной для МЛЭ-образцов (рис. 1). Среднеквадратичная шероховатость поверхности составила 2.3 и 1.5 нм для образцов *A* и *B* соответственно.

Результаты измерения электрофизических параметров ДЭГ представлены в табл. 1. Структуры характеризуются низким слоевым сопротивлением и высокой подвижностью носителей на уровне мировых значений [7, 8]. Таким образом, сформированные нитридные гетероструктуры на составных подложках кремний–поликристаллический алмаз и на подложках кремния обладают схожими характеристиками.

На образце *B* были сформированы тестовые транзисторы с длиной и шириной затвора 0.45 и 840 мкм соответственно. Маршрут создания транзисторов описан в [9]. Расстояние сток–исток составило 4 мкм. Измеренные статические характеристики транзисторов представлены на рис. 2. Максимальный удельный ток насыщения транзисторов при напряжении на затворе $V_3 = +1$ В составил более 1 А/мм, при этом крутизна транзистора g_m составила 220 мС/мм при $V_3 = -4$ В. Остаточный удельный ток стока при напряжении сток–исток $V_{\text{си}} = 90$ В и $V_3 = -8$ В составил менее 1 мА/мм, что свидетельствует о хороших изоляционных свойствах сформированных гетероструктур.

Таким образом, показана возможность формирования нитридных гетероструктур с высокими электрофизическими параметрами ДЭГ на составных подложках кремний–поликристаллический алмаз. Отметим, что изучение эффективности теплоотвода для транзисторов, созданных на составных подложках кремний–поликристаллический алмаз, и его влияние на рабочие характеристики транзисторов являются предметом дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые изготовлены составные подложки кремний–поликристаллический алмаз с тонким слоем кремния без применения адгезионных слоев и без использования процесса бондинга пластин. Показано, что электрофизические характеристики двумерного электронного газа нитридных гетероструктур на подложках кремний–поликристаллический алмаз и на пластинах монокристаллического кремния сопоставимы. продемонстрирована возможность процессирования подложек кремний–поликристаллический алмаз в технологическом маршруте, применяемом для создания нитрид-галлиевых транзисторов на пластинах кремния. Созданы тестовые транзисторы с максимальным током насыщения более 1 А/мм и пробивным напряжением более 90 В, их удельные характеристики соответствуют мировому уровню. Достигнутые результаты могут стать первым шагом в появлении нового класса подложек для роста нитридных гетероструктур и создания на их основе СВЧ-транзисторов с улучшенными характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” (приказ от 02.07.2020 № 1055).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Husna H.K., Nirmal D. // Int. J. Electron. Commun. 2020. V. 116. P. 153040.
2. Chao P.-C., Chu K., Creamer C. et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2015. V. 62. № 11. P. 3658.
3. Meyer D., Feygelson T.I., Anderson T.J. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2014. V. 35. № 10. P. 1013.
4. Louarn A.L., Vejian S., Semond F., Massies J. // J. Crystal Growth. 2009. V. 311. P. 3278.
5. Mayboroda I.O., Knizhnik A.A., Grishchenko Yu.V. et al. // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. № 10. P. 105305.
6. Cheng J., Yang X., Sang L. et al. // Sci. Rep. 2016. № 6. P. 23020.
7. Xu X., Zhong J., So H. et al. // AIP Advances. 2016. V. 6. P. 115016.
8. Poblenz C., Corrion A.L., Recht F. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2007. V. 28. № 11. P. 945.
9. Андреев А.А., Грищенко Ю.В., Езубченко И.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 4. С. 52.