

**В.И. Егоркин¹, В.Е. Земляков¹, В.И. Гармаш¹,
Ю.Н. Свешников², А.А. Арендаренко², И.Н.Цыпленков²**

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

² ЗАО «Элма- Малахит»

Полевой транзистор с затвором Шоттки на гетерогструктурах GaN на Si.

Представлены первые результаты разработки и исследования полевых транзисторов с затвором Шоттки на гетероструктурах нитрида галлия, выращенных на кремниевой подложке ориентацией (111). Тестовые транзисторы изготовлены по технологии формирования транзисторов на основе нитрида галлия на сапфире при длине затвора 0,8 – 1 мкм.

Ключевые слова: нитрид галлия, кремниевая подложка, полевой транзистор с затвором Шоттки.

HEMT транзисторы на основе гетероструктуры AlGaN/GaN получили в последнее время значительное развитие и внедрение в самые широкие области техники: это и СВЧ и КВЧ и высоковольтная силовая электроника. Одним из самых важных на данный период сдерживающих факторов широкого внедрения является трудность с подложкой для роста указанных выше гетероструктур. Из известных решений- это сапфир, SiC, AlN, Si, алмаз, наиболее приемлемым по физическим свойствам является AlN и SiC, но они отличаются сложностью изготовления и соответственно стоимостью. Сапфир менее дорог, но по требуемым характеристикам, а именно теплопроводности ($\lambda = 0,35$ Вт/см·К), что крайне необходимо для мощных приборов, он совершенно не подходит. Наиболее привлекательным в последние годы становится материал Si (111). Главная трудность при использовании кремниевых подложек – получение в ходе эпитаксии качественного переходного слоя GaN-Si (111). Она обусловлена сильным различием коэффициента теплового расширения и параметров решетки этих двух материалов. Тем не менее, фирмами Японии, Китая, США, Германии и Франции активно и успешно исследуются возможности применения кремниевой подложки. Так, компания Nitronex (США) запатентовала технологию SIGANTIC, позволяющую выращивать на пластине Si (111) высококачественные эпитаксиальные структуры AlGaN/GaN. Совместно с фирмой Rockwell Collins ею создан AlGaN/GaN-транзистор на Si (111)- подложке с Рвых более 120 Вт на частоте 2 ГГц при $K_p = 11,2$ дБ и КПД более 39% . На кремниевой подложке фирмой Daimler Chrysler создан AlGaN/GaN ГПТШ с удельной мощностью 7 Вт/мм на частоте 10 ГГц [1].

На базе лаборатории электронной компонентной базы в МИЭТ были изготовлены макетные образцы полевых транзисторов с затвором Шоттки. Структуру AlGaN/GaN на Si предоставила ОАО «Элма -Малахит» г. Зеленоград. Для получения гетероструктур использовался МОС-гидридный метод. В качестве источников элементов 3 группы использовались триметилгаллий (ТМГ) и триметилалюминий (ТМА), источника азота – аммиак. Процессы проводились в водородно-азотной среде при давлении в реакторе 60-100 мм рт. ст. В качестве подложек применяли пластины высокоомного ($\rho > 10^4$ Ом.см) кремния с ориентацией (111).

Как известно, основная проблема при росте нитридных гетероструктур на подложках кремния состоит в том, что нитрид галлия и кремний имеют очень большие различия в величинах параметра решетки (~17%) и коэффициентов термического расширения (КТР Si на 50% меньше, чем у AlN и GaN). Это приводит к формированию в эпитаксиальной структуре и на стадии роста, и при охлаждении до комнатной температуры сильных растягивающих напряжений, обуславливающих значительный прогиб гетероструктур. Эта же причина может приводить к растрескиванию эпитаксиальных слоев.

Для преодоления этой проблемы используются различные технологические приемы, однако, практически всегда, начальным этапом процесса получения гетероструктуры является рост слоя AlN, а последующая область структуры формируется таким образом, чтобы в процессе роста создать напряжения сжатия, в той или иной степени компенсирующие растягивающие напряжения, возникающие при охлаждении [2].

В нашем случае после выращивания слоя AlN толщиной 200 нм формировалась переходная область в виде трехслойной композиции слоев AlGaN переменной толщины и химического состава общей толщиной 450 нм с последующим ростом 1,5 мкм нитрида галлия. Затем на поверхности слоя GaN выращивался барьерный слой $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$ толщиной 20 нм, в результате чего формировалась структура с двумерным электронным газом, имеющим плотность носителей заряда $(1,1-1,4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью электронов $(1-1,5) \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В.с}$. Полученные гетероструктуры имели зеркальную поверхность, свободную от трещин практически по всей области структуры диаметром 2", и характеризовались относительно небольшим для структур такого рода прогибом (не более 30 мкм), рис.1.

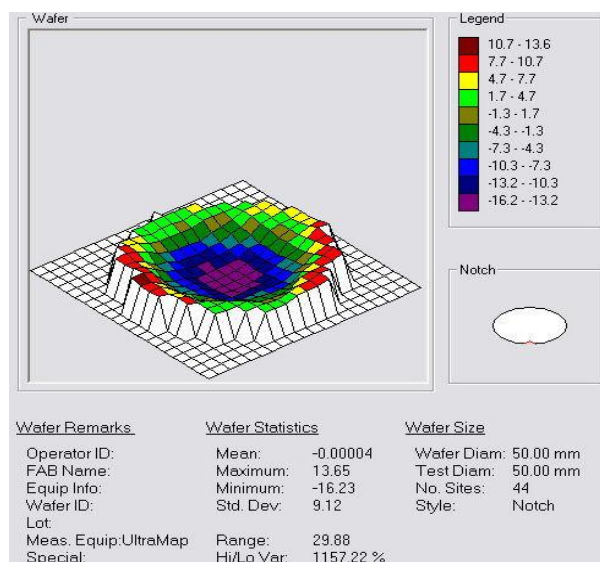


Рис. 1 Профиль рабочей поверхности гетероструктуры AlGaN/GaN на подложке кремния (параметр «Range» соответствует величине прогиба) .

В дальнейшем на полученной структуре методом плазмохимического травления в Si содержащей плазме были сформированы мезы глубиной 0,1-0,02 мкм. Далее наносился вакуумным испарением состав металлов Ti-Al-Ni-Au толщинами 200-1000-300-400 нм,

проводилось вжигание омических контактов при температуре 720 С. Толщины напыляемых металлов подбирались таким образом, чтобы морфология имела слабовыраженный вид «апельсиновой корки» и соответственно резкий край по границе контакта. Далее формировался затвор Ni-Al-Ti толщиной соответственно 100-400-100 нм. Вся структура пассивировалась плазменным Si₃N₄ толщиной 0,5 мкм. Фотография затвора с омическими контактами представлена на рисунке 2.

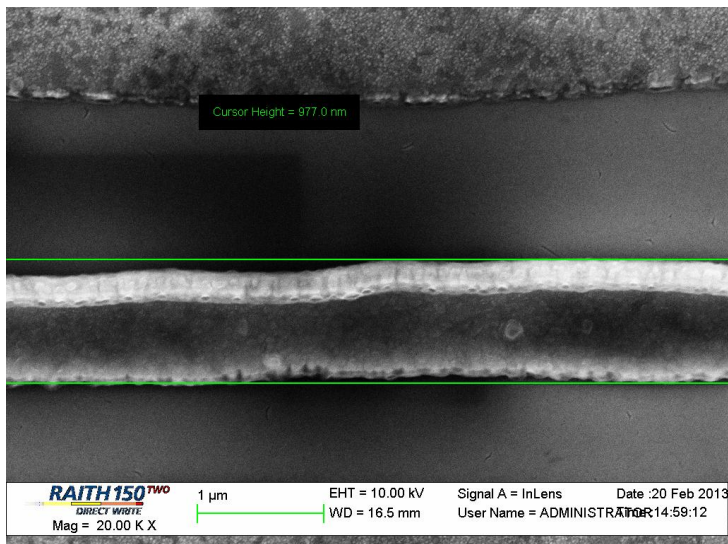


Рисунок 2. Затвор транзистора.

На тестовых образцах были проведены измерения статических вольт- амперных характеристик транзисторов. После нанесения пассивирующего диэлектрика ВАХ диода значительно улучшилась, что видно на рисунке 3.



Рисунок 3. ВАХ транзисторов до и после нанесения пассивирующего Si₃N₄.

Плотность тока в измеренных транзисторах составила 800 мА/мм, пробивное напряжение составило порядка 100 В, что видно из ВАХ на рисунке 4. Тестовый транзистор изготовлен с длиной затвора 0,8 мкм, шириной 100 мкм.

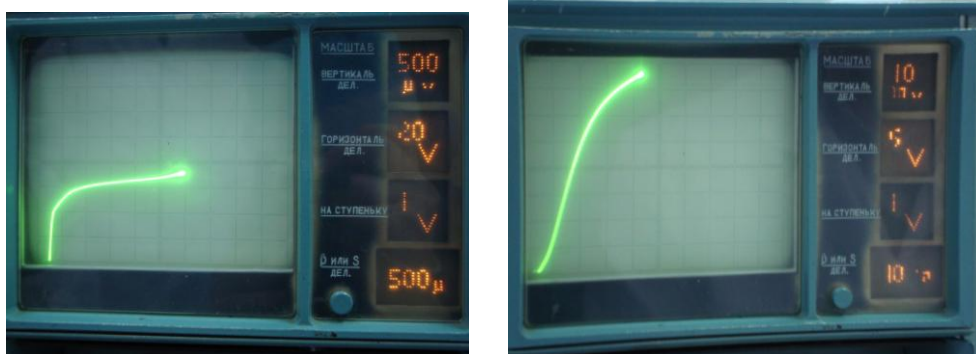


Рисунок 4. Токи утечки при обратном смещении затвор-сток и ток насыщения сток-исток ПТШ GaN на Si.

Таким образом изготовлены впервые в России гетероструктуры нитрида галлия на кремнии и изготовлены макетные образцы транзисторов. Конечно это являются первыми образцами и необходимо провести дальнейшее исследование их СВЧ параметров, температурные и прочие исследования.

Библиографический список

1. Dumka D.C., Lee C., Tserng H.Q. et al. AlGaIn/GaN HEMTs on Si Substrate with 7 W/mm output power density at 10 GHz. – Electron. Lett., 2004, v.40, N16, p.1023–1024.
2. H.P.D. Schenk, E.Frayssinet, A. Bavard et al. “Growth of thick, continuous GaN layer on 4-in. Si substrate by metalorganic chemical vapor deposition”, J.Cryst.Growth, v.314, iss.1, p.85-91, 2011.