

**Цацульников А.Ф.¹, Сахаров А.В.², Лундин В.В.²,
Заварин Е.Е.², Закгейм Д.А.², Усов С.О.¹**

¹ИТЦ Микроэлектроники РАН

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

AlGaInN гетероструктуры с легированными изолирующими буферными слоями для транзисторов с высокой подвижностью электронов

GaN/AlN/AlGaIn и GaN/AlN/InAlN гетероструктуры с двумерным электронным газом выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках сапфира и карбида кремния. Исследованы гетероструктуры с буферными слоями GaN, легированными углеродом и железом, и показано, что применение буферных слоев GaN:Fe позволяет получить высокое кристаллическое совершенство и планарную поверхность для любых типов гетероструктур, что приводит к увеличению подвижности электронов в канале.

Ключевые слова: нитрид галлия, транзистор, гетероструктура, газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений.

Основной проблемой при создании InGaAlN транзисторов является отсутствие подложек GaN (по сравнению с транзисторами на основе GaAs и InP), что приводит к необходимости использовать сложные методы роста и создавать буферные слои с высокой плотностью дислокаций для компенсации рассогласования в параметрах решетки используемой подложки и растущего материала. Обычно, для снижения плотности дислокаций и повышения качества материала, используются режимы роста, приводящие к нарушению планарности поверхности (т.н. трехмерный рост) с последующей планаризацией. Данная фаза зачастую приводит к образованию проводящего слоя и, соответственно, утечек сток-исток, что существенно снижает рабочие характеристики транзисторов.

Для создания изолирующих буферных слоев на данный момент используются три основных подхода:

- 1) целенаправленное использование материала с высокой плотностью дислокаций, полученного путем оптимизации начальных условий роста [1,2] (при этом отсутствие утечек сопровождается снижением рабочих характеристик транзистора [3]).
- 2) использование самокомпенсации материала углеродом и точечными дефектами за счет роста буферного слоя GaN в неоптимальных условиях (обычно это сниженная температура и малые потоки аммиака)
- 3) использование преднамеренного легирования GaN глубокими примесями – углеродом или железом

Последний подход обеспечивает максимальную технологическую гибкость при создании гетероструктур и должен обеспечивать максимальное качество материала, но он недостаточно изучен на данный момент.

Достаточно хорошо проблема с легированием буферного слоя GaN углеродом и железом описана в работе [4]. Использование как одной, так и другой примеси позволяет

получить изолирующие буферные слои с минимальным уровнем утечек в транзисторных структурах, но такое легирование может приводить к проблеме падения эффективности работы транзистора на высоких частотах, известной как коллапс тока. На данный момент существует не очень большое количество публикаций [5-7] в которых описываются преимущества и недостатки одного или другого типа легирования. Единственное, что достаточно достоверно установлено, это то, что слишком высокий уровень легирования приводит к существенному падению параметров транзисторов. Оптимальные уровни и профили легирования для создания высококачественных приборов в открытой литературе не приводятся. Ведущие производители транзисторов, такие как Wolfspeed и Qorvo в своих публикациях просто упоминают, что используют легированные буферные слои GaN, при этом упоминается как легирование железом, так и углеродом, без уточнения каких-либо деталей.

В данной работе приведены результаты исследований по сравнению GaN/AlN/AlGaN и GaN/AlN/InAlN транзисторных гетероструктур, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках сапфира и карбида кремния, с различными буферными слоями GaN, легированными примесями углерода и железа.

Для роста на подложках сапфира ранее было показано, что преднамеренное легирование GaN углеродом позволяет получить высокоомные слои GaN с высоким кристаллическим совершенством, но введение углерода на начальном этапе роста при использовании трехмерного роста недопустимо. Оно затрудняет коалесценцию начальных зародышей, существенно снижая кристаллическое совершенство и повышая паразитную проводимость эпитаксиальных слоев. Легирование углеродом после полной планаризации поверхности эпитаксиального слоя GaN позволяет получить структурно-совершенные атомно-гладкие слои GaN:C с концентрацией углерода $\sim 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При толщине легированного углеродом слоя 4 $\mu\text{м}$ напряжение пробоя составляет $\sim 500 \text{ В}$. В случае подложек SiC при использовании тонкого AlN зародышевого слоя рост носит двухмерный характер и легирование углеродом буферного слоя GaN на начальном этапе возможно. Были выращены транзисторные GaN/AlN/AlGaN структуры на подложках SiC с использованием буферных слоев GaN:C, которые показали подвижность более $1500 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{сек}$ при концентрации носителей $1.2\text{-}1.3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Таким образом, легирование углеродом не ухудшает электрофизические параметры транзисторных структур.

Легирование железом буферных слоев GaN может проводиться при росте на любых подложках, но оно имеет основной недостаток, который выражается в сильной диффузии, которая может приводить к проникновению атомов железа в область канала. В случае неоптимальных условий роста это также может приводить к деградации морфологии эпитаксиальных слоев, снижению кристаллического совершенства и ухудшению электрофизических параметров транзисторных структур. При исследовании роста на подложках сапфира первые 2 $\mu\text{м}$ буферного слоя GaN легировались железом, за 1.5 $\mu\text{м}$ до канала поток железа выключался, чтобы предотвратить его проникновение в область канала. Предварительные эксперименты показали, что при толщине нелегированного GaN менее 1.5 $\mu\text{м}$ наблюдается снижение подвижности, а при дальнейшем ее уменьшении – и концентрации носителей в канале. При этом, несмотря на наличие формально нелегированного слоя GaN, ток утечки в структурах со стравленным барьерным слоем составлял $< 2 \text{ нА}$ при напряжении 100 В (расстояние между контактами 2.5 мм, диаметр 400 $\mu\text{м}$). В транзисторных структурах далее выращивались барьерные слои AlN ($\sim 1 \text{ нм}$) и AlGaN или InAlN. Было показано, что буферный слой GaN:Fe имеет высокое кристаллическое совершенство и обеспечивает планарные интерфейсы гетероструктуры. Для транзисторных гетероструктур GaN/AlN/AlGaN подвижность электронов при комнатной температуре составляла $2000 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{сек}$ при концентрации $1.1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Также были исследованы гетероструктуры для НЕМТ транзисторов на основе InAlN/GaN, которые позволяют достичь рекордных параметров приборов [8], но являются технологически более сложными в изготовлении. Было обнаружено сильное влияние типа буферного слоя на свойства канала в таких структурах. На рисунке 1 приведены значения слоевого сопротивления и подвижности электронов для InAlN/GaN структур в зависимости от состава барьерного слоя.

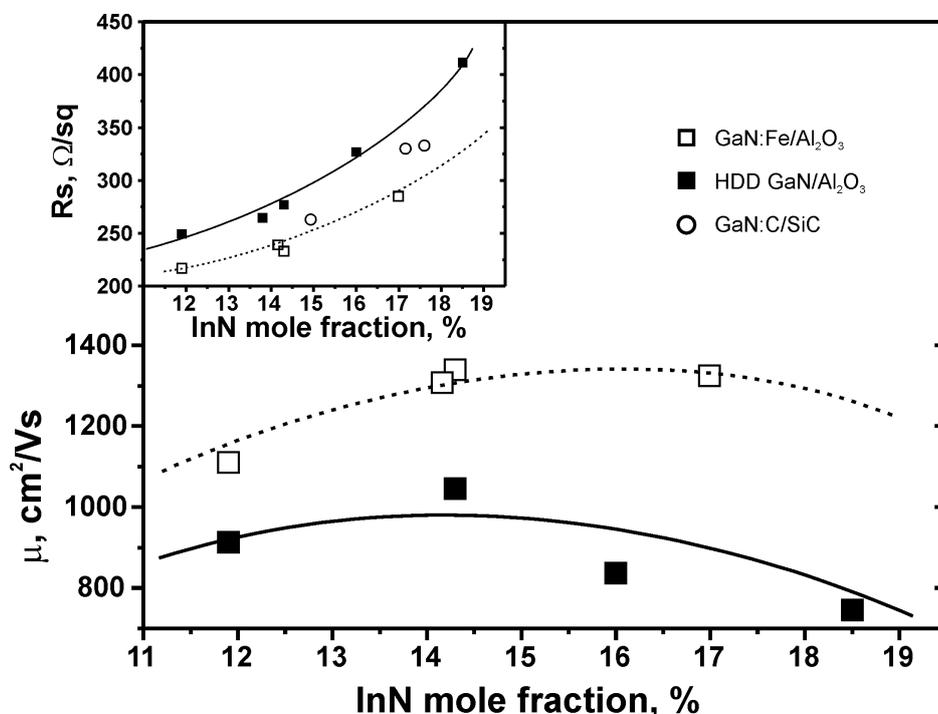


Рис. 1. Зависимость подвижности электронов при комнатной температуре от содержания индия для InAlN/GaNHEMT структур, выращенных на различных буферных слоях. На вставке приведена зависимость слоевого сопротивления от содержания индия.

Видно, что использование буферных слоев GaN:Fe приводит к увеличению подвижности на 25-50%, причем эффект более выражен при более высоком содержании индия в барьерном слое. Известно, что чем выше содержание индия в InAlN, тем более склонен этот материал к формированию локальных неоднородностей состава. Можно предположить, что дислокации и особенности морфологии интерфейса GaN/AlN/InAlN не только прямо снижают подвижность носителей, но и ухудшают однородность InAlN, что дополнительно снижает подвижность.

На вставке в рис. 1 показана зависимость слоевого сопротивления от состава буферных слоев для той же серии структур. Дополнительно, показаны данные для аналогичных структур на SiC подложках с буферным слоем GaN:C. Видно, что выращенные на сапфировых подложках структуры с буферным слоем GaN:Fe имеют даже меньшее слоевое сопротивление, чем выращенные на SiC подложках.

Было проведено сравнение электрофизических параметров транзисторных гетероструктур GaN/AlN/AlGaIn, выращенных с использованием изолирующего буферного слоя с преднамеренно повышенной плотностью краевых дислокаций [9] и буферного слоя, легированного железом. Использование слоя GaN:Fe позволило увеличить подвижность электронов в канале с 1000 $\text{cm}^2/\text{V}\times\text{сек}$ до 1300 $\text{cm}^2/\text{V}\times\text{сек}$.

Таким образом, было установлено, что легирование буферных слоев GaN углеродом на начальном этапе эпитаксиального роста GaN на сапфировых подложках при использовании трехмерного зародышевого слоя GaN приводит к деградации структурного

совершенства эпитаксиального слоя. Легирование углеродом после полной планаризации поверхности эпитаксиального слоя GaN позволяет получить структурно-совершенные атомно-гладкие слои GaN:C. Легирование буферных слоев GaN углеродом в случае использования подложек SiC и AlN буферного слоя не приводит к деградации свойств транзисторных гетероструктур. В отличие от углерода, железо может использоваться при росте любых типов транзисторных гетероструктур, но следует учитывать эффекты связанные с его диффузией.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о субсидии № 14.578.21.0240 от 26.09.2017 , уникальный код проекта:RFMEFI57817X0240). Для исследований использовалось оборудование федерального ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях», поддержанного Минобрнауки России (Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0018).

Библиографический список

1. Weimann N.G., Eastman L.F., Doppalapudi Dh., Ng H.M., Moustakas T.D. J. Appl. Phys. 1998. V. 83 (7). P. 3656.
2. Hubbard S.M., Zhao G, Pavlidis D., Sutton W., Cho E. J. Cryst. Growth. 2005.V. 284 (3-4). P. 297.
3. J. Kotani, A. Yamada, T. Ishiguro, S. Tomabechi, and N. Nakamura, Appl. Phys. Lett. 108, 152109 (2016)
4. M. J. Uren, J. Moreke, and M. Kuball, Buffer Design to Minimize Current Collapse in GaN/AlGaN HFETs. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, Vol. 59 (12), p.3327, (2012) DOI 10.1109/TED.2012.2216535
5. M. J. Urenye et al, Control of short-channel effects in GaN/AlGaN HFETs, in Proc. Eur.Microw. Integr. Circuits Conf., 2006, pp. 65–68.
6. E. Bahat-Treidel, et al AlGaIn/GaN/GaN:C back-barrier HFETs with breakdown voltage of over 1 kV and low $R(\text{ON}) \times A$, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 57, no. 11, pp. 3050–3058, Nov. 2010. DOI 10.1109/TED.2010.2069566.
7. V. Desmaris et al Comparison of the DC and microwave performance of AlGaIn/GaN HEMTs grown on SiC by MOCVD with Fe-doped or unintentionally doped GaN buffer layers,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 53, no. 9, pp. 2413–2417, Sep. 2006. DOI 10.1109/TED.2006.880825.
8. Y. Yue, Z. Hu, J. Guo, B. Sensale-Rodriguez, G. Li, R. Wang, F. Faria, T. Fang, B. Song, X. Gao, Sh.Guo, T. Kosel, G. Snider, P. Fay, D. Jena, and H. Xing, IEEE Electron Dev. Lett. 33 (7) 988 (2012).
9. С.О. Усов, А.В. Сахаров, А.Ф. Цацульников, Е.Е. Заварин, А.Е. Николаев, М.А. Яговкина, В.Е. Земляков, В.И. Егоркин, В.М. Устинов, Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 4 (243), 47 (2016).