

07

Селективный рост невжигаемых омических контактов к двумерному электронному газу в транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе гетеропереходов GaN/AlGaN методом молекулярно-пучковой эпитаксии

© И.О. Майборода, А.А. Андреев, П.А. Перминов,
Ю.В. Федоров, М.Л. Занавескин

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Москва
E-mail: mrlbr@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2013 г.

Исследованы особенности создания невжигаемых омических контактов к двумерному проводящему каналу транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур AlGaN/(AlN)/GaN путем осаждения сильнолегированного n^+ GaN через маску SiO₂ методом аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Разработанная технология позволяет получать удельные сопротивления контактов к двумерному газу до $0.11 \Omega \cdot \text{mm}$ на различных типах нитридных гетероструктур „Ga-face“, что в несколько раз меньше сопротивления традиционных вжигаемых омических контактов.

Одним из основных препятствий расширения области применения HEMT на гетероструктурах (Al, Ga, In)N в более высокочастотные диапазоны, а также создания на их основе аналоговых и цифровых монолитных интегральных схем с высокой степенью интеграции для аппаратуры связи и радиолокации, в том числе с экстремальными условиями эксплуатации, является плохая морфология и высокое удельное сопротивление (более $0.4 \Omega \cdot \text{mm}$) традиционных вжигаемых при $T > 820^\circ\text{C}$ омических контактов к двумерному проводящему каналу

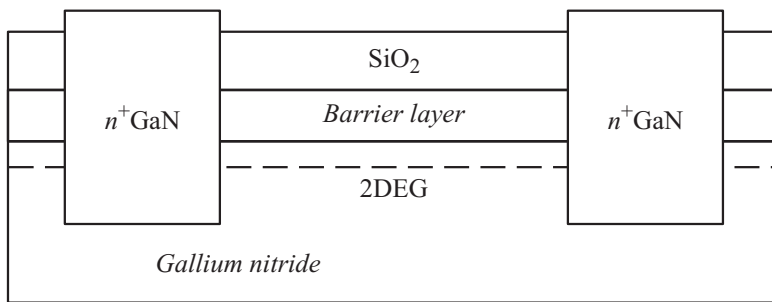


Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктуры с невжигаемым омическим контактом.

гетероструктур, особенно с повышенным содержанием Al в барьерном слое.

Альтернативой является метод создания невжигаемых контактов. Суть концепции невжигаемых селективно выращенных омических контактов поясняет рис. 1. На поверхности гетероструктуры через маску SiO₂ производится вытравливание материала на глубину ниже залегания проводящего канала, показанного пунктирной линией, затем в образовавшиеся „окна“ осаждается n⁺GaN. Благодаря введению примеси Si происходит вырождение полупроводящего GaN, который должен находиться в непосредственном контакте с областью двумерного газа электронов (2DEG). Формирование контакта завершается металлизацией поверхности n⁺GaN.

Доразшиваемые контакты имеют ряд преимуществ перед вжигаемыми. В первую очередь, доразшивание производится путем гомоэпитаксии, что обеспечивает хорошую адгезию осаждаемого материала. Нитрид галлия и маска SiO₂ обладают хорошей температурной стойкостью, что обеспечивает сохранение изначальной формы контакта и позволяет точнее контролировать геометрию изготавливаемых транзисторов. В последние годы были опубликованы сообщения о получении удельного сопротивления омических контактов до 0.4 Ω · mm для „Ga-face“ НЕМТ [1] и до 0.09 Ω · mm [2], а затем до 0.025 Ω · mm [3] для „N-face“ НЕМТ. Кроме того, сообщается о создании невжигаемых доразшиваемых контактов к структурам НЕМТ без вытравливания „окон“ под осаждение n⁺GaN [4], а также с применением селективного травления

части барьерного слоя AlGaN, которое не затрагивает слой GaN [5]. Стоит упомянуть, что невжигаемые омические контакты могут быть созданы и другими методами, например ионной имплантацией [6] или лазерным отжигом [7].

В данной работе проведено исследование особенностей процесса осаждения n^+ GaN для создания омического контакта к проводящему каналу в нитридных гетероструктурах, а также выработана технология осаждения, обеспечивающая минимальное сопротивление контактов.

Эксперименты по изготовлению невжигаемых омических контактов проводились на гетероструктурах типа $Al_{0.4}Ga_{0.6}N/AlN/GaN$ с барьерным слоем AlGaN толщиной 10 nm. Технология их изготовления заключалась в следующем. После меза-изоляции приборов путем плазмохимического вытравливания верхних активных слоев на глубину до 80 nm в смеси $BCl_3 + Ar$, на пластину наносился слой SiO_2 толщиной 150 nm плазмохимическим осаждением в смеси $N_2O + SiH_4$ при температуре 300°C. Далее фотолитографическим методом был сформирован топологический рисунок для травления „окон“ в диэлектрике под контакты. Травление диэлектрической маски SiO_2 проводилось плазмохимическим методом в смеси SF_6 и кислорода. Затем, уже через маску SiO_2 , производилось вытравливание барьерных слоев AlGaN/AlN и заглабление в GaN плазмохимическим травлением в смеси BCl_3 и аргона. Осаждение сильнолегированного n^+ GaN проходило в установке аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии при температурах от 700 до 850°C. В качестве источника атомов кремния использовалась эффузионная ячейка Кнудсена. Контроль концентрации легирующей примеси осуществлялся заданием соотношения потоков Ga и Si. Контактные площадки были сформированы путем повторной фотолитографии и термического напыления металлов Ti/Pd/Au поверх n^+ GaN. После их изготовления производилось измерение ВАХ и удельных параметров омических контактов на специальных тестовых топологических структурах.

Для установления оптимальной концентрации легирующей примеси была изготовлена серия образцов с концентрациями Si в n^+ GaN, равными $2.5 \cdot 10^{20}$, $7.7 \cdot 10^{19}$ и $5.1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Минимальное достигнутое сопротивление составило $0.11 \Omega \cdot \text{mm}$ при концентрации Si $5.1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Контакты с концентрациями Si в n^+ GaN, равными $7.7 \cdot 10^{19}$ и $2.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, имели большее сопротивление.

При исследовании осажденного n^+ GaN с концентрацией Si $2.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ до напыления металлизации было обнаружено, что сопротивление между 2 измерительными зондами, приведенными в соприкосновение с поверхностью n^+ GaN, не зависело от расстояния между ними. Данное наблюдение говорит о том, что протекание электрического тока по поверхности n^+ GaN происходило в режиме перколяции, что свидетельствует о сильной его неоднородности. После обработки раствором плавиковой кислоты HF измеряемое сопротивление пленки n^+ GaN резко возросло, а на ее поверхности проявился развитый рельеф. Судя по всему, при введении больших концентраций кремния его атомы перестают равномерно растворяться в нитриде галлия, что приводит к образованию неоднородностей в объеме n^+ GaN и снижению его проводимости.

В ходе экспериментов по созданию дорасчищаемых контактов была установлена интересная особенность. При температурах подложки в процессе осаждения n^+ GaN более 780°C нитрид галлия не осаждался на поверхности диэлектрической маски (рис. 2). Вместе с тем толщина выращенного в „окнах“ n^+ GaN оказывалась примерно на 80% больше, чем следовало из заданных параметров роста. Можно заключить, что часть материала из источников, попадавшая на поверхность диэлектрика, мигрировала в область контактов, что приводило к увеличению суммарной толщины осажденного в „окнах“ слоя n^+ GaN. При снижении температуры подложки до 700°C на поверхности диэлектрика образовывалась сплошная пленка GaN (рис. 2). При этом ухудшается проводимость контактов, а пленка Ga затрудняет последующее удаление маски SiO_2 . Таким образом, кинетика процесса осаждения GaN на SiO_2 кардинально меняет свой характер между температурами подложки 700 и 780°C . Кроме того, снижение температуры подложки при дорасчищении n^+ GaN негативно сказывается на качестве омических контактов.

Разработанная технология невжигаемых омических контактов была использована при изготовлении СВЧ приборов на гетероструктурах типа AlGaIn/AlN/GaN с барьерным слоем AlGaIn толщиной 10, 15 и 27 nm при содержании Al 40, 32 и 29% соответственно, а также на гетероструктурах AlN/GaN с толщиной AlN 3.5 nm. На всех перечисленных типах гетероструктур были получены контакты с удельным сопротивлением менее $0.2 \Omega \cdot \text{mm}$ без изменения технологических режимов. Это привело к снижению напряжения насыщения тока стока транзисторов при $U_{gs} = 0$ с типичных значений 4–5 V до 2–2.5 V и увеличению

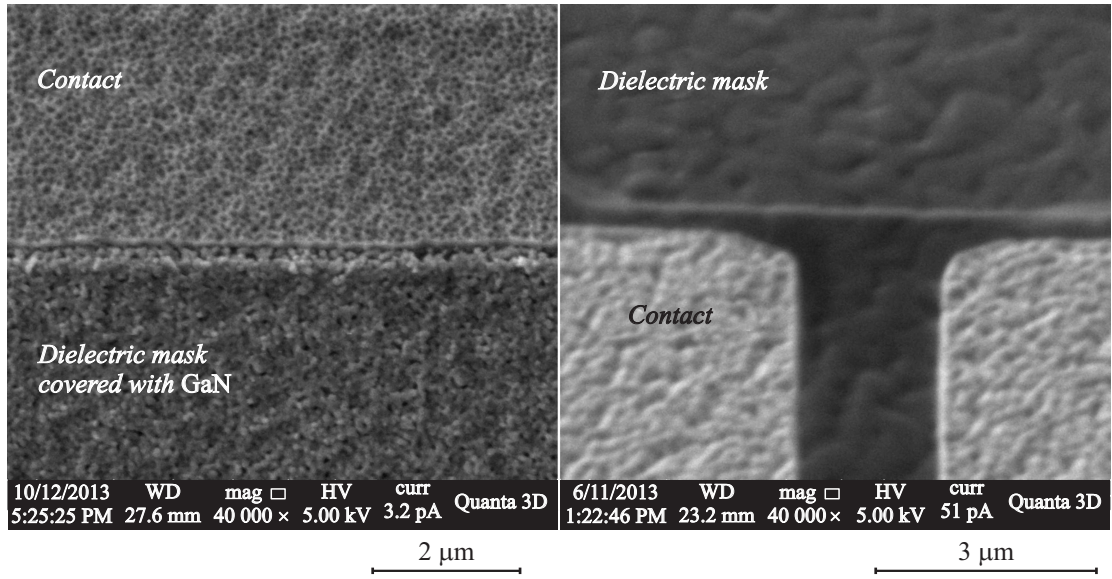


Рис. 2. n^+ GaN, дорощенный через диэлектрическую маску при температуре подложки 750°C (слева) и 850°C (справа). Изображения получены с помощью сканирующего электронного микроскопа.

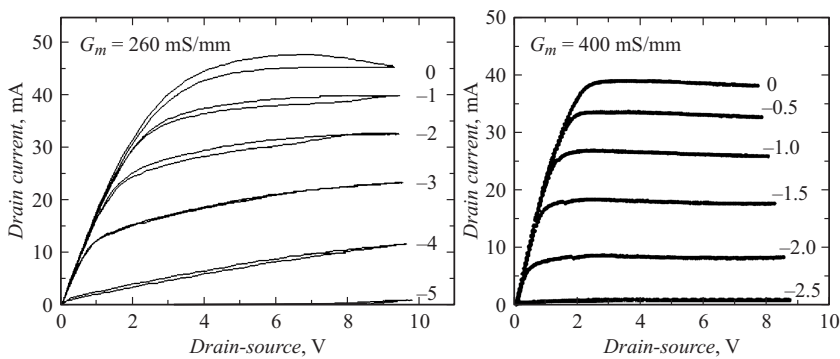


Рис. 3. ВАХ транзисторов с вжигаемыми контактами с сопротивлением $0.6 \Omega \cdot \text{mm}$ (a) и невжигаемыми омическими контактами с сопротивлением $0.15 \Omega \cdot \text{mm}$ (b).

крутизны транзистора G_m с 260 до 400 мS/мм (рис. 3), что создало возможность использования приборов на их основе при пониженных напряжениях питания и с более высокой эффективностью.

Таким образом, на основе проведенных исследований разработана технология создания невжигаемых омических контактов к двумерному газу в структурах НЕМТ на основе гетеропереходов GaN/AlGaN путем селективного осаждения n^+ GaN через маску SiO методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии. Установлено, что при определенных температурах подложки можно добиться высокой селективности осаждения n^+ GaN и предотвратить образование пленки n^+ GaN поверх маски SiO. Получены омические контакты к двумерному электронному газу в различных структурах НЕМТ с сопротивлением менее $0.2 \Omega \cdot \text{mm}$.

Список литературы

- [1] Guo J., Cao Y., Lian C., Zimmermann T., Li G., Verma J., Gao X., Guo S., Saunier P., Wistey M., Jena D., Xing H. (Grace) // Phys. Status Solidi. A. 2011. V. 208. N 7. P. 1617–1619.
- [2] Denninghoff D.J., Dasgupta S., Lu J., Keller S., Mishra U.K. // IEEE Electron Device Letters. 2012. V. 33. N 6. P. 785–787.

- [3] *Nidhi Dasgupta S., Lu J., Speck S., James S., Mishra U.K.* // IEEE Electron Device Letters. 2012. V. 33. N 6. P. 794–796.
- [4] *Zheng Z., Seo H., Liang Pang L., Kim K.* // Phys. Status Solidi. A. 2011. V. 208. N 4. P. 951–954.
- [5] *Pang L., Krein P., Kim K., Lee J.-H., Kim K.* // Phys. Status Solidi. A. 2014. V. 211. N 1. P. 180–183.
- [6] *Recht F., McCarthy L., Ragan S., Chakraborty A., Poblencz C., Corrion A., Speck J.S., Mishra U.K.* // IEEE Electron Device Letters. 2006. V. 24. N 4. P. 205–207.
- [7] *Kim S.J., Jeong T., Kim. T.G.* // IEEE Electron Device Letters. 2012. V. 34. N 3. P. 372–374.