

4. Oganov A.R. Modern Methods of Crystal Structure Prediction / A.R. Oganov, Schön J.C., Jansen M., Woodley S.M., Tipton W.W., Hennig R.G.// Berlin: Wiley-VCH – 2010. – pp. 223-231.

5. Исупов В.А. Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом и дипольные стекла // Изв. Ан СССР. Сер. физ. – 1990. – т.54, № 6. – С. 1131-1134.

6. Ролов, Б.Н. Физика размытых фазовых переходов /Б.Н. Ролов, В.Э. Юркевич// Изд.: Ростовский университет, 1983. 320с.

**А. Д. Юник** (БГУИР, Минск)

Науч. рук. **Я. А. Соловьёв**, канд. техн. наук, доцент

## **СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ НОРМАЛЬНО-ЗАКРЫТЫХ GaN/AlGaN ТРАНЗИСТОРОВ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ**

В настоящее время одной из наиболее важных социальных проблем в мире является неуклонный рост энергопотребления. Кремниевая (Si) технология, которая более пяти десятилетий являлась доминирующей при создании элементной базы для всех электронных устройств, начинает не справляться с возрастающими требованиями. В этой связи одним из наиболее перспективных направлений развития силовой электроники является реализация устройств на основе широкозонных полупроводников. Особый интерес здесь представляют нитриды элементов третьей группы таблицы Менделеева (GaN, AlN, InN-III-нитридов и др.), обладающие целым рядом уникальных свойств.

Одним из наиболее ярких на данный момент представителей изделий данного класса является транзистор с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ). Благодаря своим превосходным свойствам, GaN/AlGaN-транзисторы оказались способны с легкостью заменить мощные кремниевые полевые транзисторы в компактных импульсных источниках питания, DC/DC-преобразователях, разумных сетях электропитания, электроприводах и др.

Целью настоящей работы является решение задачи выбора способа формирования нормально-закрытых ТВПЭ (формирования затвора транзисторов данного типа), а также выбора типовой гетероструктуры для нормально-закрытых ТВПЭ на основе GaN/AlGaN.

Как известно, транзисторы (ТВПЭ) на основе гетероструктур GaN/AlGaN по своей природе являются нормально-открытыми (или нормально-включенными) устройствами. Тем не менее, в большинстве случаев для применений в силовой электронике требуется нормально-закрытый (нормально-выключенный) вариант исполнения транзистора.

Одним из первых предложенных способов формирования нормально-закрытого ТВПЭ был т.н. “recessed gate”, который заключается в локальном уменьшении толщины (затраве) барьерного слоя AlGaN под затвором. Начиная с определенной толщины барьерного AlGaN уровень Ферми на границе раздела GaN/AlGaN будет находиться ниже зоны проводимости AlGaN, что соответствует истощению канала (который в данном случае обычно называют двумерным электронным газом или 2DEG) и возникновению положительного порогового напряжения ( $V_{th}$ ) [1, 2].

Другим ранним подходом был с т.н. “fluorine gate”, заключающийся во введении отрицательно заряженных ионов фтора в область под затвором транзистора, что, как и в первом случае, приводит к истощению двумерного электронного газа [3]. Кроме того, введение ионов фтора приводит к изгибу зоны проводимости AlGaN, что, в свою очередь, вызывает увеличение высоты барьера металл/AlGaN и уменьшению тока утечки затвора [4].

Однако, данные методы оказались не самыми востребованными за счет плохой воспроизводимости процесса плазменного травления барьерного слоя AlGaN под затвором, что приводило к нестабильности уровней порогового напряжения ( $V_{th}$ ), в особенности при повышении уровня рабочих температур.

На смену ранним вариантам реализации нормально-закрытого ТВПЭ пришло более “элегантное” технологическое решение, которое заключалось в последовательном соединении нормально-закрытого кремниевого МОП-транзистора с нормально-открытым высоковольтным ТВПЭ (т.е. в таком приборе выходное напряжение (сток-исток) МОП-транзистора определяет входное напряжение (затвор-исток) ТВПЭ). Однако, данная “каскадная” схема также имеет свои недостатки: последовательное соединение вносит паразитные эффекты, влияющие на производительность при переключении транзистора, а температурные режимы работы устройства будут ограничены тепловыми свойствами кремниевого МОП-транзистора.

На данный момент одним из самых оптимальных вариантов получения нормально-закрытого ТВПЭ (и метода формирования затвора)

является так называемый ТВПЭ с затвором p-типа (p-GaN gate). Как показано на рисунке 1, в данном методе в процессе роста гетероструктуры на поверхности барьерного слоя AlGaN (или AlN+AlGaN) дополнительно формируется тонкий (2-3 нм) слой нитрида галлия легированный магнием (p-GaN), который впоследствии будет располагаться только в областях под затвором и перекрывать канал двумерного электронного газа при подаче положительного потенциала на затвор. Уже первые полученные таким методом транзисторы имели уровни порогового напряжения ( $V_{th}$ ) порядка 1 В, а пробивное напряжение ( $V_b$ ) достигало рекордных 800 В [5].

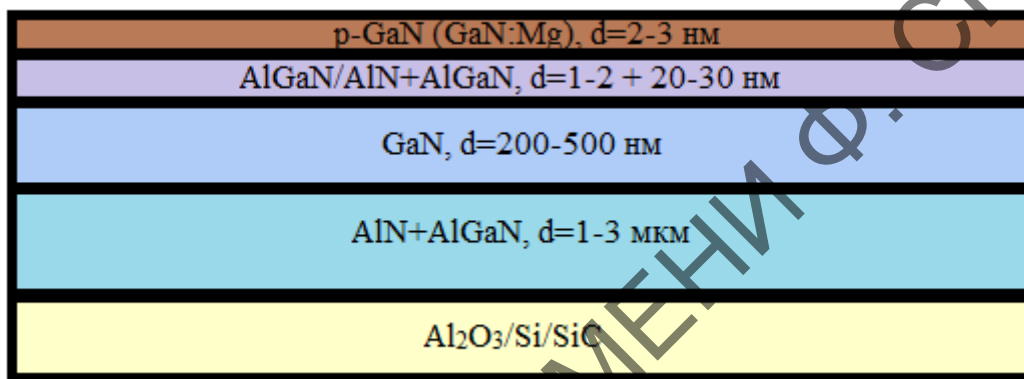


Рисунок 1 – Типовая гетероструктура для формирования нормально-закрытого ТВПЭ с затвором p-типа

Таким образом, представленные в настоящей статье способ формирования затвора (p-GaN gate) и типовая гетероструктура на основе GaN/AlGaN позволяют решить задачу формирования нормально-закрытых ТВПЭ. Стоит отметить, что подобная реализация нормально-закрытых ТВПЭ на данный момент является единственным коммерчески доступным и широко используемым решением.

### Литература

1. Saito, W.; Takada, Y.; Kuraguchi, M.; Tsuda, K.; Omura, I. Recessed-gate structure approach toward normally off high-Voltage AlGaIn/GaN HEMT for power electronics applications // IEEE Electron Device Lett. – 2006. – 53. – 356–362.
2. Kumar, V.; Kuliev, A.; Tanaka, T.; Otoki, Y.; Adesida, I. High transconductance enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrate // Electron. Lett. – 2003. – 39. – 1758–1760.
3. Cai, Y.; Zhou, Y.; Lau, K.M.; Chen, K.J. Control of Threshold Voltage of AlGaIn/GaN HEMTs by Fluoride-Based Plasma Treatment: From

Depletion Mode to Enhancement Mode // IEEE Electron Device Lett. – 2006. – 53. – 2207–2215.

4. Chen, K.J.; Zhou, C. Enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMT and MIS-HEMT technology // Phys. Status Solidi A. – 2011. – 208. – 434–438.

5. Uemoto, Y.; Hikita, M.; Ueno, H.; Matsuo, H.; Ishida, H.; Yanagihara, M.; Ueda, T.; Tanaka, T.; Ueda, D. Gate Injection Transistor (GIT) – A Normally-Off AlGaIn/GaN Power Transistor Using Conductivity Modulation // IEEE Trans. Electron Devices. – 2007. – 54. – 3393–3399.

**П. С. Яночкин, А. С. Русыкин** (ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель)  
Науч. рук. **В. Е. Гайшун**, канд. физ.-мат. наук, доцент

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ $ZrO_2-Ti$ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЦЕРИЕМ**

Нанотехнологии прочно укрепились в различных сферах деятельности человека и развиваются стремительными темпами. Перспективным направлением в этой отрасли является синтез тонкопленочных покрытий, которые могут применяться в таких областях науки и техники, как оптика, оптоэлектроника, наноэлектроника и др. В последние годы среди всех возможных способов синтеза тонких пленок все более широкое распространение получает золь-гель метод [1], который привлекателен как возможностью синтезировать покрытия требуемого качества, так и своей экономичностью, так как процесс формирования покрытий данным методом является менее энергозатратным по сравнению с другими технологиями и не требует наличия сложного и дорогостоящего оборудования [2].

В ходе работы были сформированы золь-гель пленки на основе  $ZrO_2-Ti^{3+}$ , солегированные наночастицами серебра и ионами церия. Формирование данных покрытий на подложке было выполнено методом центрифугирования с последующей термообработкой при температуре 500 °С. Были измерены толщина и коэффициенты преломления полученных покрытий. Состав пленок и результаты измерения представлены в таблице 1.

Полученные данные иллюстрируют, что введение наночастиц серебра и ионов церия практически не оказывает влияния на толщину формируемых покрытий. Добавление ионов церия приводит к увеличению коэффициента преломления получаемых покрытий на (3-5) % для всех исследуемых матриц.