

## СТРУКТУРА GAN-ТРАНЗИСТОРОВ

*Бондарев А.А.*

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
филиал «Минский радиотехнический колледж»,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Василевская Н.И. – преподаватель высшей категории дисциплин  
общепрофессионального и специального циклов*

**Аннотация.** Предоставленные материалы направлены на изучение структуры современного решения высокоэффективных транзисторов GaN структуры и его сравнение с технологией MOSFET.

**Ключевые слова:** транзистор, GaN, структура, сравнение, MOSFET.

Сегодня у разработчиков есть богатый выбор силовых GaN-транзисторов от различных производителей. Более того, преимущества нитрид-галлиевых ключей уже успели оценить по достоинству – это позволило внедрить их в широкий спектр приложений. Сейчас GaN-транзисторы используют в промышленности – в источниках питания и системах управления электродвигателями; в коммерческом оборудовании и в автомобильной технике с жесткими условиями эксплуатации.

Материал представляет собой анализ потенциала силовых GaN-устройств и важность использования драйверов для GaN-ключей, сравнение характеристик нитрид-галлиевых транзисторов и MOSFET, а также кратко рассматриваются методы уменьшения влияния шумов, возникающих в цепи затвора. Стоит отметить также, что GaN-ключи успешно применяют для построения ВЧ-передатчиков и усилителей мощности, но рассмотрение этих случаев выходит за рамки данной статьи.

Зачем вообще понадобились GaN-транзисторы?

Кремниевые МОП-транзисторы долгое время являлись основой силовых устройств с мощностью в диапазоне от десятков до сотен и даже тысяч ватт. По мере развития технологий параметры кремниевых ключей постоянно улучшались: снижалось сопротивление открытого канала RDS (ON), увеличивалось рабочее напряжение, повышалась скорость переключения, минимизировались габаритные размеры и др. В настоящее время технологии производства практически достигли пика своего совершенства, и параметры кремниевых МОП-транзисторов оказались близки к теоретическому пределу, определяемому фундаментальными физическими ограничениями кремния.

Нитрид галлия отличается от кремния повышенной подвижностью электронов и увеличенной электрической прочностью. Это означает, что при заданных значениях сопротивления и пробивного напряжения GaN-транзистор будет иметь меньшие размеры по сравнению с кремниевым аналогом (рисунок 1). GaN-ключи также обладают чрезвычайно высокой скоростью переключений и минимальным временем обратного восстановления, что является важным условием для уменьшения потерь и повышения эффективности. GaN-транзисторы с рейтингом напряжения 600/ 650 В широко представлены на рынке и являются идеальным выбором для широкого спектра приложений, впрочем, как и первое поколение GaN-ключей с рейтингом напряжений 100 В.

Двойной электронный слой (ДЭС) сформирован на границе гетероструктуры, которая состоит из двух эпитаксиальных слоев AlGaIn/ GaN и обеспечивает высокую плотность заряда и подвижность носителей. Нормально замкнутый GaN-ключ не проводит ток при нулевом напряжении «затвор-сток» (левый рисунок). Если напряжение «затвор-сток» превышает пороговое значение, транзистор открывается (рисунки справа и по центру).

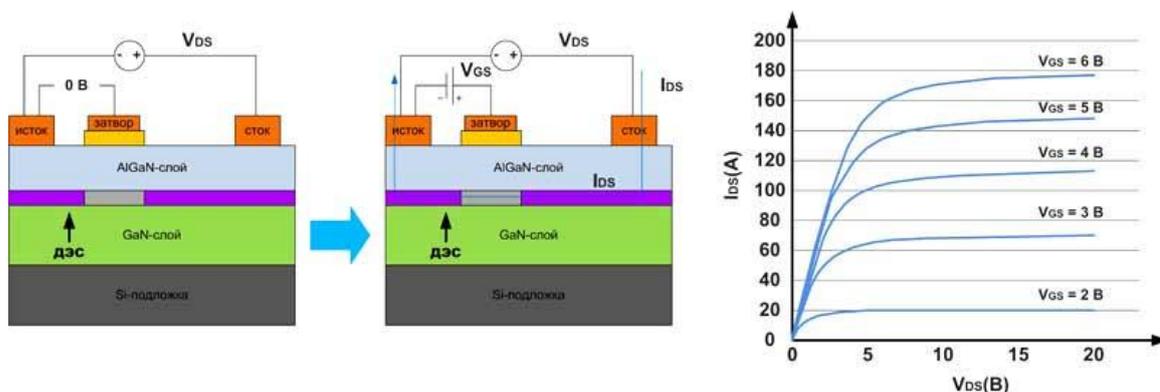


Рисунок 1 – GaN-транзистор выполнен на кремниевой подложке

GaN-транзисторы делятся на два типа:

– нормально открытые GaN-транзисторы, работающие в режиме обеднения. Такие ключи находятся в проводящем состоянии при отсутствии напряжения на затворе. Для их отключения требуется подача отрицательного затворного напряжения (относительно стока и истока);

– нормально закрытые GaN-транзисторы с улучшенной структурой (enhancement mode), работающие в режиме обогащения. Нормально замкнутый GaN-ключ не проводит ток при нулевом напряжении «затвор-сток». Если напряжение «затвор-сток» превышает пороговое значение, транзистор открывается.

Разница между перечисленными типами транзисторов заключается не только в нормально закрытом или нормально открытом состоянии. Для ключей, работающих в режиме истощения (нормально открытые), существуют проблемы с начальной подачей питания. Чтобы предотвратить сквозной ток, например, в полумостовой схеме, необходимо перед подачей напряжения силовой шины предварительно выключить транзисторы, для чего требуется сформировать на их затворах отрицательные напряжения. Для устранения этого очевидного недостатка нормально открытых GaN-транзисторов используют каскадную схему включения: в одном корпусе с нитрид-галлиевым ключом помещают дополнительный низковольтный кремниевый ключ. Совсем по-другому обстоит дело с нормально замкнутыми GaN-транзисторами, которые при нулевом напряжении на затворе по умолчанию не проводят ток и не создают проблем при начальном запуске.

Кремниевые МОП-транзисторы и GaN-ключи имеют сходства и различия.

Хотя значения параметров GaN-транзисторов отличаются от значений кремниевых MOSFET, перечни общих характеристик у них практически совпадают. Как и у традиционных МОП-транзисторов, у GaN-ключей есть выводы стока, истока и затвора, а наиболее важными параметрами остаются сопротивление открытого канала и рабочее напряжение.

Кроме того, GaN-транзисторы с улучшенной структурой (enhancement mode), как и кремниевые MOSFET, являются нормально закрытыми ключами, управляемыми напряжением (не током!). При этом они также обладают паразитной входной емкостью, которую требуется заряжать и разряжать при переключениях. Параметры заряда/ разряда (в частности, скорость нарастания и форма сигналов) являются важными факторами, определяющими эффективность работы ключей.

Базовая структура GaN-транзистора: простота и сложность в одном флаконе.

Рассмотрим самую простую традиционную ячейку GaN-транзистора (рисунок 3а) [1]. На кремниевой подложке выращивается защитный слой AlN. На нем формируется гетероструктура GaN/AlGaN. Далее создаются защитный диэлектрический слой и электроды.

GaN и AlGaN имеют полярную природу. По этой причине уже в процессе роста на их границе происходит спонтанная поляризация с образованием поверхностных зарядов. Кроме того, GaN обладает выраженными пьезоэлектрическими свойствами. Под действием деформации и механических напряжений он дополнительно поляризуется. Так как решетки GaN и

AlGaN имеют рассогласование, то такие напряжения неизбежно возникают на границе их раздела.



Рисунок 3 – Традиционная ячейка а) GaN-транзистора и б) eGaN® FET производства EPC

В результате процессы поляризации вызывают формирование заряда в виде двухмерной плоскости (двухмерный электронный газ, 2DEG) [2].

Если на электроды стока и истока такой базовой ячейки подать напряжение, то начнет протекать ток, даже если напряжение на затворе равно нулю. Таким образом данный прибор является нормально открытым.

Чтобы прекратить протекание тока на затвор, необходимо подать отрицательное напряжение относительно истока (рисунок 3а).

Вполне очевидно, что такой транзистор весьма неудобен в использовании. Во-первых, чтобы избежать выгорания схемы, необходимо до включения основного питания обеспечить выключение транзистора. А во-вторых — необходимо иметь дополнительный источник отрицательного напряжения.

На этом проблемы с «простой» ячейкой не заканчиваются. Дело в том, что представленная структура имеет чрезвычайно упрощенный вид. На самом деле она гораздо сложнее.

Для эффективного отвода тепла от слоя GaN необходимо наличие подложки, а все стандартные материалы (Si, SiC, сапфир) имеют рассогласование кристаллических решеток с GaN. Чтобы снизить механические напряженности, вводят дополнительные согласующие слои. Аналогично добавляются и слои между другими разнородными материалами ячейки. В результате структура оказывается сложной.

Дополнительные проблемы вносит тот факт, что готовых решений не существует и необходимо проводить затратные исследования для выявления оптимальных материалов, толщины слоев и так далее.

В настоящий момент нитрид-галлиевые транзисторы стали не просто реальностью, а настоящей альтернативой для кремниевых MOSFET. К услугам разработчиков - широкий выбор GaN-ключей, инструментов отладки и моделирования, специализированных драйверов, реальных примеров использования и т.д. Это касается как крупных, так и мелких производителей. GaN-транзисторы обеспечивают параметры эффективности и производительности, превосходящие те, что могут предложить существующие и даже анонсируемые кремниевые MOSFET.

### Список литературы

1. <https://www.compel.ru/lib/71931>
2. <https://www.terraelectronica.ru/news/5471>