

УДК

Конструкция многослойной LDD-области в новом поколении СВЧ LDMOS-транзисторов АО «НИИЭТ»

П.В. Пролубников, Р.П. Алексеев, П.Л. Куршев, А.Н. Цоцорин, И.В. Семейкин

АО «НИИЭТ», г. Воронеж

Аннотация: в данной работе приводятся аспекты создания многослойной LDD-области в новом поколении СВЧ LDMOS-транзисторов КП9171А и КП9171БС, основной областью применения которых являются усилители мощности передатчиков телевизионного сигнала. Приведены отличия в удельных электрических параметрах LDMOS-транзисторов предыдущего и нового поколения. На основе полученного научно-технического задела уже сейчас проводится расширение номенклатуры выпускаемых изделий и проводится усовершенствование уже имеющихся приборов.

Ключевые слова: СВЧ LDMOS-транзистор, DVB-T / DVB-T2, LDD-область, полевой электрод

1. Введение

До настоящего времени в Российской Федерации не было освоённых в серийном производстве СВЧ транзисторов, которые в сочетании с высокими значениями коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия позволяют удовлетворить специфические требования работы в передатчике сигнала стандартов DVB-T / DVB-T2. В связи с чем, в качестве активного элемента в усилителях мощности передатчиков телевизионного сигнала использовались транзисторы зарубежного производства [1].

В соответствии с государственной программой «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности, а также постановлением Правительства РФ от 24.07.2021 г. № 1252 АО «НИИЭТ» была проведена работа по разработке и освоению производства двух типоминималов мощных линейных СВЧ LDMOS-транзисторов (Lateral Diffused Metal Oxide Semiconductor) с улучшенной энергоэффективностью для передатчиков цифрового эфирного телевидения, основной целью которой являлось полное импортозамещение иностранных транзисторов в передатчиках телевизионного сигнала.

На момент начала работ в АО «НИИЭТ» имелся большой опыт создания различных СВЧ транзисторов, но с целью удовлетворения специфических требований работы в передатчике сигнала стандартов DVB-T / DVB-T2 потребовалось провести обширные исследования и работы, направленные на модернизацию имеющегося научно-технического задела по СВЧ LDMOS-транзисторам. Были проведены работы по усовершенствованию топологии транзисторных кристаллов (получены два свидетельства о регистрации топологии интегральной микросхемы и два патента [2, 3]), кроме того была модернизирована конструкция и технология производства СВЧ LDMOS-транзисторов.

Одним из ключевых изменений в конструкции транзисторного кристалла является создание многослойной дрейфовой области стока (LDD – Light Doped Drain).

2. Тенденции изменений LDD-области СВЧ LDMOS-транзисторного кристалла

В традиционном исполнении LDD-область или слабелегированная область стока представляет собой равномерную диффузионную n^- -область со сниженной концентрацией, которая формируется с помощью имплантации и последующей

разгонки фосфора между сильнолегированной диффузионной n^+ -областью стока и областью затвора элементарной ячейки LDMOS-транзистора. В первую очередь внедрение LDD-области призвано снизить критическую напряженность электрического поля вблизи стока и соответственно повысить напряжение пробоя сток-исток ($U_{СИ\ проб}$) транзисторной структуры. При этом внедрение традиционной LDD-области имеет ряд своих недостатков, к которым в первую очередь относится увеличение сопротивления сток-исток в открытом состоянии ($R_{СИ\ отк}$). Это происходит за счёт того, что на пути протекания тока появляется область малой концентрации и как следствие большего сопротивления. Традиционная конструкция LDMOS-транзисторной структуры представлена на рисунке 1.

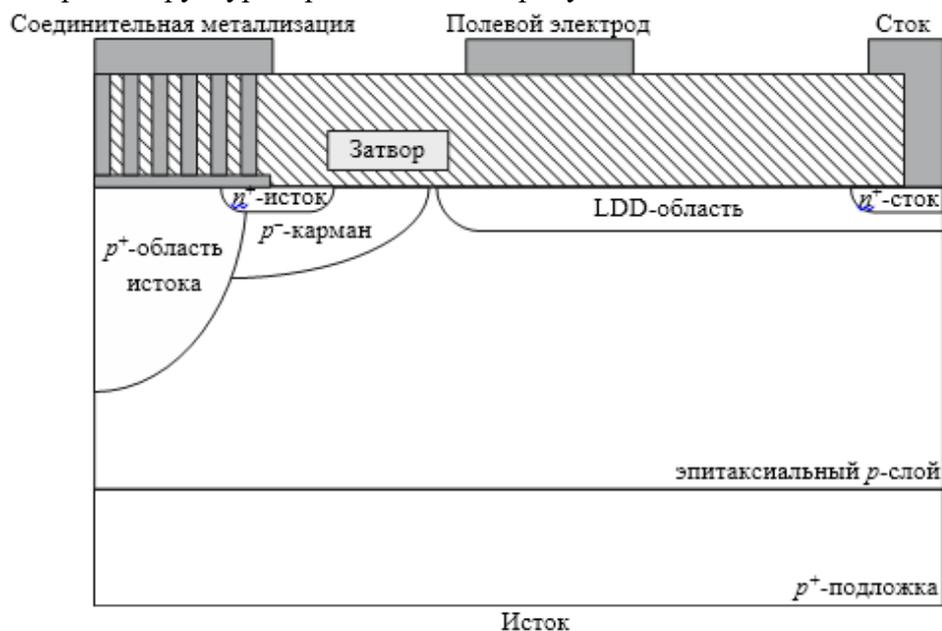


Рисунок 1. Традиционная конструкция LDMOS-транзисторной структуры.

В результате развития LDMOS-транзисторов и накопления знаний по протекающим в них физическим процессам появились более сложные структуры с отрицательным и положительным градиентом концентрации примеси в LDD-области. Первые представляют собой классическую LDD-область, прилегающий к затвору участок которой подвергается дополнительному ионному легированию – так называемый HDD-участок (High Doped Drain) (рисунок 2а) [4, 5]. При подборе соответствующей конструкции полевого электрода, подобная структура позволяет по сравнению с равномерно легированной LDD-областью снизить $R_{СИ\ отк}$ без потерь в межэлектродных ёмкостях и пробивном напряжении. Основным недостатком данной конструкции является повышение напряженности электрического поля вблизи затвора ввиду размещения у его края относительно высоколегированной ступени дрейфовой области стока (HDD-участка). Данное обстоятельство повышает инжекцию горячих носителей заряда в диэлектрический слой вблизи затвора во время работы СВЧ транзистора, что негативно сказывается на надежности прибора. Также высокая напряженность электрического поля вблизи затвора увеличивает риск пробоя паразитного биполярного транзистора, что ведет к катастрофическому отказу прибора. С учетом того, что работа транзистора на сигнале стандарта DVB-T / DVB-T2 представляет собой практически непрерывный режим, использование данной конструкции LDD-области в новом поколении СВЧ LDMOS-транзисторов сможет улучшить удельные электрические параметры, но будет способствовать снижению воспроизводимости и надёжности транзистора в целом.

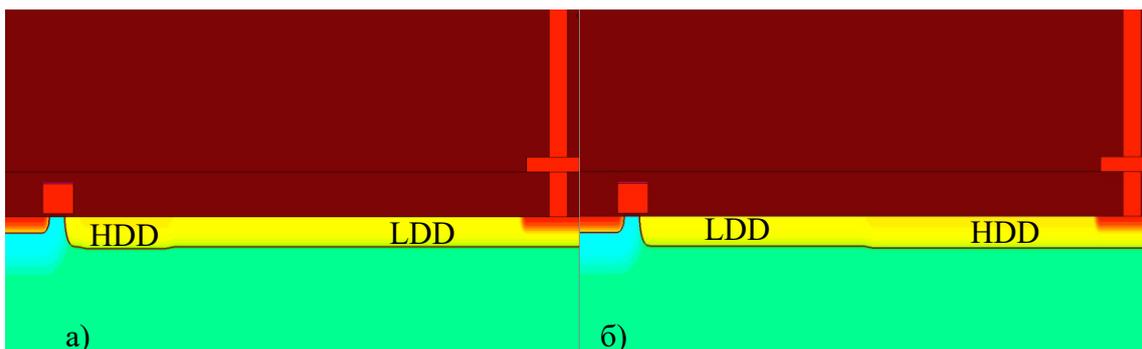


Рисунок 2. Структура двухслойной LDD-области: *a* – с отрицательным градиентом концентрации примеси; *б* – с положительным градиентом концентрации примеси.

Другим вариантом формирования слаболегированной области является LDD-область с положительным градиентом концентрации примеси [6]. В простейшем двухслойном случае представляет собой инвертированную LDD-область с отрицательным градиентом: более высоколегированный участок располагается ближе к n^+ -стоку, слаболегированный – ближе к затвору (рисунок 2б). LDD-область с положительным градиентом концентрации примеси позволяет существенно снизить выходную ёмкость, а также увеличить $U_{СИ\ проб}$. Принципиальным при этом является то, что уровень легирования слаболегированного участка должен быть ниже, чем в случае простой равномерно легированной LDD-области. Вследствие чего достигается хорошая надежность прибора, но при этом повышается сопротивление сток-исток в открытом состоянии и как следствие снижается удельный максимальный ток и выходная мощность.

3. Конструкция многослойной LDD-области СВЧ LDMOS-транзисторов нового поколения АО «НИИЭТ»

В процессе создания нового поколения СВЧ LDMOS-транзисторов была разработана и запатентована многослойная LDD-область, сочетающая в себе свойства области, как и с отрицательным, так и с положительным градиентом концентрации примеси [3]. Данная конструкция подразумевает создание высоколегированного HDD-участка на протяжении всего перекрытия LDD-области системой полевых электродов. Формирование дрейфовых областей стока происходит из нескольких слоев (в несколько стадий), благодаря чему дрейфовая область стока характеризуется немонотонным распределением примеси как в продольном, так и в поперечном направлении. Ближайший к затвору участок дрейфовых областей стока (участок 1, рисунок 3) характеризуется наименьшей глубиной и средним суммарным по глубине количеством атомов примеси. Участок, расположенный в середине дрейфовой области стока (участок 2, рисунок 3) характеризуется средней глубиной и наименьшим суммарным по глубине количеством атомов примеси. Участок, расположенный под n^+ -областью стока и вблизи нее (участок 3, рисунок 3) характеризуется наибольшей глубиной и наибольшим суммарным по глубине количеством атомов примеси. Кроме того, в каждом из этих участков дрейфовых областей стока локальный максимум распределения примеси располагается не вблизи поверхности, а на некоторой глубине.

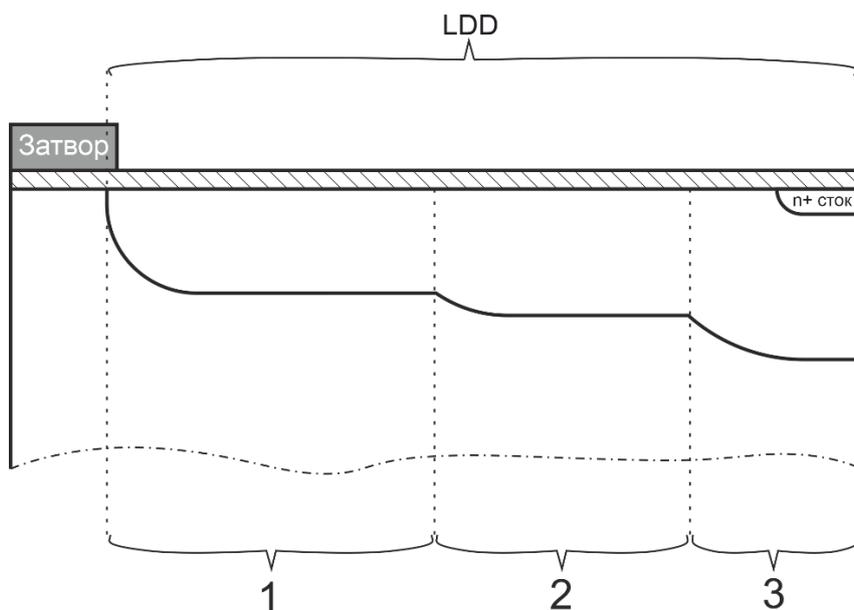


Рисунок 3. Структура запатентованной LDD-области.

Создание участка 1 в дрейфовой области стока с наименьшей глубиной и средним суммарным по глубине количеством атомов примеси относительно других участков позволяет повысить дозу легирования относительно равномерно легированной дрейфовой области стока. Данный участок является наиболее важным с точки зрения процессов инжекции носителей заряда из канала и растекания тока в участке дрейфовой области. Благодаря участку 1 получается достичь высокого значения удельного тока стока и низкого значения удельного сопротивления сток-исток в открытом состоянии СВЧ LDMOS-транзистора.

Создание участка 2 в дрейфовой области стока со средней глубиной и наименьшим суммарным по глубине количеством атомов примеси относительно других участков дрейфовой области позволяет скомпенсировать повышение дозы легирования в участке 1 и обеспечить тот же уровень напряженности пробоя сток-исток, что и в равномерно легированной дрейфовой области стока в традиционном LDMOS-транзисторе (рисунок 1). Кроме того, большая глубина данного участка позволяет скомпенсировать увеличение сопротивления, вызванное относительно небольшим суммарным по глубине количеством атомов примеси.

Создание участка 3 в дрейфовой области стока с наибольшей глубиной и наибольшим суммарным по глубине количеством атомов примеси относительно других участков позволяет перенести область пробоя сток-исток LDMOS-структуры из горизонтального направления (область канала, где находится паразитный биполярный транзистор) в вертикальное (область стока), благодаря чему минимизируется риск пробоя паразитного биполярного транзистора.

Расположение максимума концентрации примеси по глубине LDD-области не вблизи поверхности, а на некоторой глубине, позволяет снизить плотность тока вблизи поверхности структуры, где напряженности электрического поля особенно высока, благодаря чему скомпенсировать повышение напряженности электрического поля в участке 1, вызванное повышением дозы легирования, и снизить уровень инжекции горячих носителей заряда [7].

Необходимо отметить, что внедрение описанной многослойной LDD-области подразумевает создание высокоэффективного многоуровневого полевого электрода [8].

Сравнение удельных электрических параметров традиционной LDMOS-транзисторной структуры с равномерной LDD и LDMOS-транзисторной структуры с

многослойной LDD-областью представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение удельных электрических параметров LDMOS-транзисторных структур с различными LDD-областями

Электрический параметр (удельный на 1 мм длины затвора)	Многослойная LDD	Равномерная LDD
Ток стока насыщения, А	0,234	0,195
Сопротивления сток-исток в открытом состоянии, Ом	19,31	24,27
Емкость сток-исток при напряжении сток-исток 50 В, пФ	0,188	0,174
Емкость сток-затвор при напряжении сток-исток 50 В, фФ	2,09	2,48
Емкость затвор-исток при напряжении сток-исток 50 В, пФ	0,540	0,543
Напряжение пробоя сток-исток, В	121,2	119,4

Как видно из таблицы 1 все вышеперечисленные технико-технологические аспекты создания LDD-области позволяют одновременно достичь низкого уровня инжекции горячих носителей заряда, минимизировать риск пробоя паразитного биполярного транзистора, а также достичь высокого значения удельного тока стока и низкого значения удельного сопротивления сток-исток в открытом состоянии. Таким образом данная конструкция LDD-области направлена на улучшение электрических параметров и надежности СВЧ LDMOS-транзистора. Кроме того, благодаря полученным научно-техническим результатам АО «НИИЭТ» уже сейчас проводится расширение номенклатуры выпускаемых изделий и проводится усовершенствование уже имеющихся приборов.

Все исследования и работы выполнены в рамках ОКР с использованием программы субсидирования в соответствии с **постановлением Правительства РФ от 24 июля 2021 года № 1252.**

Список литературы

1. Алексеев Р.П и др. LDMOS: новые разработки АО «НИИЭТ» // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2023. – № 2 (00223) – С. 92–96.
2. Куршев П.Л. и др. Конструкция дискретного СВЧ LDMOS-транзисторного кристалла с усовершенствованной экранирующей шиной истока: пат. 2819579 РФ – 2024.
3. Куршев П.Л. и др. Способ изготовления СВЧ LDMOS-транзисторных кристаллов с многослойной дрейфовой областью стока: пат. 2819581 РФ – 2024.
4. Theeuwens S. J. C. H. et al. Electric device comprising an LDMOS transistor: пат. 7521768 США – 2009.
5. Алексеев Р.П. и др. Приборно-технологическое проектирование LDMOS-транзисторов с отрицательным градиентом примеси LDD-области // Физико-математическое моделирование систем: межвузовский сборник научных трудов. –2018. – вып. – С. 3-8.
6. Алексеев Р.П. и др. Приборно-технологическое моделирование LDMOS-транзисторов с нелинейным распределением примеси LDD-области // Радиолокация, навигация, связь: 24-я Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж. – 2018. – С. 257–264.
7. Алексеев Р.П., Пролубников П.В., Мальцев В.В. Инжекция горячих носителей заряда в СВЧ LDMOS-транзисторах // СВЧ-электроника. – 2024. – № 1 – С. 12–14.
8. Алексеев Р.П., Куршев П.Л., Цоцорин А.Н. Влияние многослойного полевого электрода на степень выраженности эффекта квазинасыщения вольтамперных характеристик мощных сверхвысокочастотных латеральных транзисторов // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56. – № 11. – С. 1088–1092.