

Тиристор со статической индукцией с повышенным быстродействием

Юрий Максименко, Виктория Грабежова (ООО «Дизайн-центр биомикроэлектронных технологий "Вега"»),
Александр Гордеев (ООО «АГАТ»)

Рассматривается конструкция кристалла тиристора со статической индукцией с повышенным быстродействием. Повышение быстродействия достигается за счёт отключения от области затвора его пассивных частей, расположенных под площадками катода, затвора и периферийных областей, а также за счёт исключения инжекции из анода дырок под этими областями путём введения стопора n^+ -областей. Дальнейшее уменьшение области затвора и, соответственно, повышение быстродействия обеспечивается за счёт уменьшения шага структуры кристалла в четыре раза. Уменьшение шага структуры кристалла достигается использованием новой технологической схемы формирования структуры кристалла, объединяющей Trench-технологии и технологию самосовмещения истока и затвора. Замена n^+ -областей катода на изотипный гетеропереход позволит проводить глубокую модуляцию высокоомной области анода основными носителями, что, в свою очередь, позволит увеличить рабочее напряжение тиристора до 10 кВ и выше и уменьшить сопротивление прибора в открытом состоянии на несколько порядков.

Введение

Сегодня с быстрым развитием электрифицированных отраслей, таких как электротранспорт, самолётостроение, средства электропитания и т.д., очень актуальным становится создание эффективных силовых ключей. Ключевые высоковольтные тиристоры из-за наличия на пути протекания тока трёх p - n -переходов и низкого быстродействия не отвечают современным требованиям по статическим и динамическим потерям. Зарубежные полу-

проводниковые компании при построении высоковольтных ключей активно переходят на широкозонные материалы (SiC). В России из-за отсутствия технологий по созданию широкозонных материалов SiC работы по созданию таких приборов находятся на начальных этапах.

Транзисторы со статической индукцией (СИТ) с планарным затвором с доработанной конструкцией способны работать на частотах до 10 МГц при рабочих напряжениях 500–1200 В [1].

В этом диапазоне рабочих напряжений они имеют очень низкое сопротивление канала и высокое быстродействие. Дальнейшее повышение рабочего напряжения требует увеличения ширины высокоомной области стока. Это приводит к существенному росту сопротивления канала и снижению быстродействия, так как модуляция канала неосновными носителями – дырками из затвора, из-за их низкой подвижности, на большую глубину происходит медленно и неэффективно. Поэтому при рабочих напряжениях выше 1500 В наиболее эффективно применять тиристоры.

Тиристор – это прибор, у которого низкоомная подложка имеет p^+ -область. В открытом состоянии прибора из подложки в канал впрыскиваются неосновные носители и эффективно модулируют его.

Первые управляемые тиристоры появились в 1955 г., когда стало возможным получение кремния высокой чистоты. Они имели четырёхслойную структуру и получили название «тиристор». Он включался подачей импульса на электрод управления при положительном напряжении между анодом и катодом. Выключение тиристора обеспечивается снижением протекающего через него прямого тока до нуля. Это требует дополнительно большого количества элементов, что увеличивает стоимость и массо-габариты [2].

Следующее развитие тиристор получил в 1960 г., когда в США был разработан прибор, способный запирается с помощью управляемого электрода, и получил название Gate Turn Off (GTO) – выключаемый тиристор. Выключаемый тиристор – полностью управляемый полупроводниковый прибор. Включение и выключение происходит путём подачи положительного и отрицательного, соответственно, импульса на электрод управления. На рис. 1 приведены условное обозначение (а) и структурная схема (б) выключаемого тиристора [2].

В середине 90-х годов был разработан новый вид тиристоры Gate

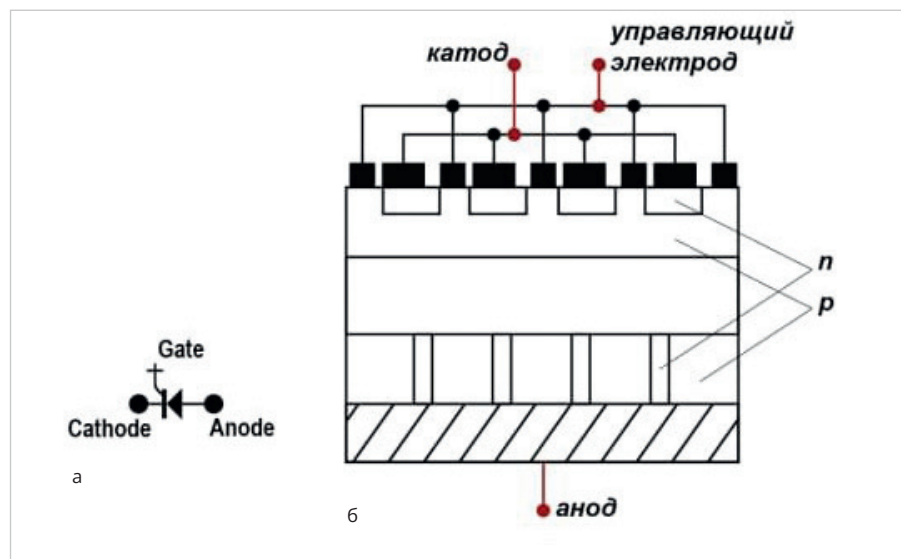


Рис. 1. Выключаемый тиристор: а) условное обозначение; б) структурная схема

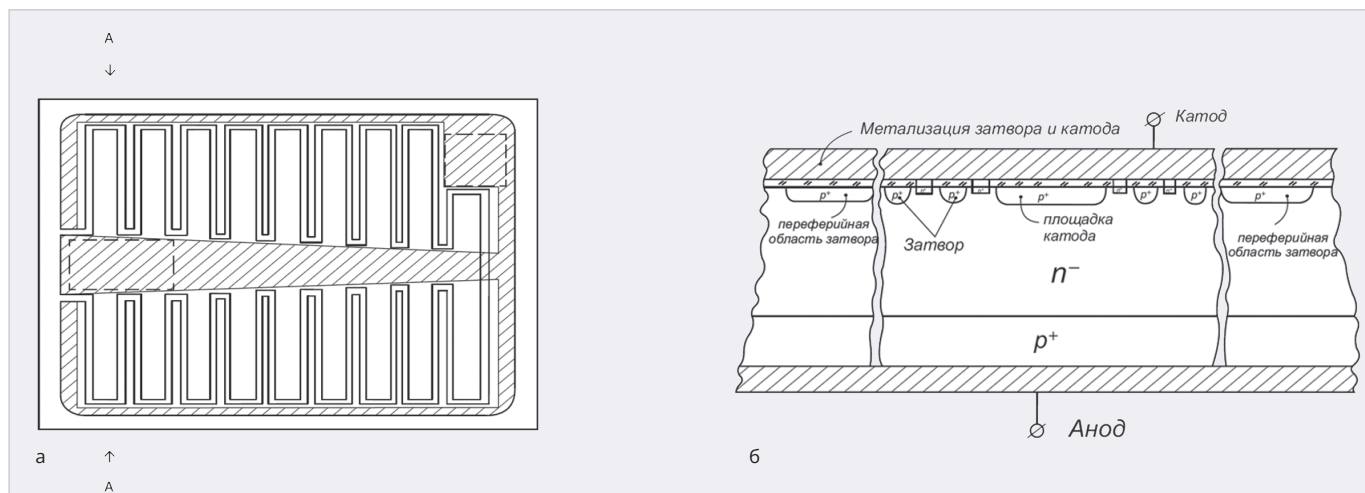


Рис. 2. Кристалл ТЭУ: а) вид сверху (заштрихованные области – паразитные области катода, затвора и периферии); б) разрез сверху вниз через площадку катода (А–А)

Commutated Thyristor (GCT). Он является дальнейшим усовершенствованием GTO и лишён его недостатков. Далее развитие тиристоров пошло по пути создания жёсткого управления – создание драйверов, совмещённых с пластинами охлаждения (англ. Integrated Gate – Commutated Thyristor (IGCT)) [3].

Быстрое развитие в начале 90-х годов технологии силовых транзисторов привело к появлению нового класса приборов – биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors). Основными преимуществами IGBT являются высокое значение рабочей частоты (20...30 кГц), КПД, простота в управлении. В последние годы IGBT потеснили тиристоры GTO в устройствах мощностью 1 МВт и напряжением до 3,5 кВ.

Первый тиристор со статической индукцией (ТЭУ) был изобретён И. Нишизаваой в 1975 году [4]. Он, как и первые СИТ, имел заглублённый затвор. Заглублённый затвор имеет недостаток – большое сопротивление. Это ограничивает высокочастотные свойства прибора и не позволяет вводить прибор в биполярный режим работы. В 1982 году Й. Накамура предложил конструкцию ТЭУ с планарным затвором [5], свободную от этого недостатка. Однако обе эти конструкции обладают ещё одним негативным свойством: у них в открытом состоянии инжекция неосновных носителей из области затвора происходит по всей площади затвора и на периферии. При выключении тиристора неосновные носители в канале выводятся гораздо быстрее, чем на периферии и под площадками катода и затвора (рис. 2).

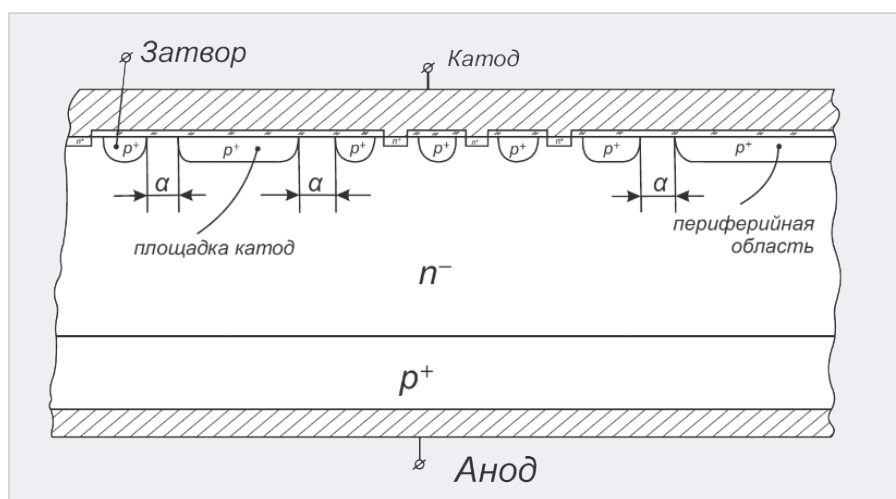


Рис. 3. Разрез кристалла ТЭУ с отключёнными паразитными областями

Это приводит к затягиванию выключения и ограничивает быстродействие.

Тиристоры с электростатическим управлением имеют преимущество по остаточному напряжению перед биполярными тиристорами и приборами IGBT, так как на пути протекания тока имеют один p-n-переход, а не три, и, соответственно, падение напряжения на них в открытом состоянии меньше. Также они более скоростные, потому что удаление неосновных носителей происходит через затвор. В IGBT, после закрытия входного МОП-транзистора, цепь эмиттер-коллектор прерывается, и неосновные носители медленно рекомбинируют в базовой области, что затягивает выключение.

Автором данной работы предложена конструкция ТЭУ, свободная от недостатков конструкций, описанных в [4, 5]. Для исключения «паразитной» инжекции дырок из затвора под площадками катода, затвора и периферийных областей последние отключают-

ся от области затвора высокоомной n^- -областью стока (рис. 3). Причём расстояние a между затвором и областями под площадками и периферией должно быть как можно больше, но не более значения, при котором происходит преждевременный поверхностный лавинный пробой. Отключение этих областей от затвора имеет ещё один положительный момент – уменьшается ёмкость затвора. При увеличении напряжения на тиристоре происходит смыкание ОПЗ этих областей и подключение к ёмкости затвора ёмкостей отключённых областей, поэтому a должно быть как можно больше. Правда, их подключение происходит через высокоомный резистор, и увеличение ёмкости затвора незначительно.

Для исключения «паразитной» инжекции дырок из анода между n^- и p^+ -областями анода в местах под площадками и на периферии формируется стопорный слой n^+ (рис. 4). Этот слой не даёт инжекции дырок в этих местах.

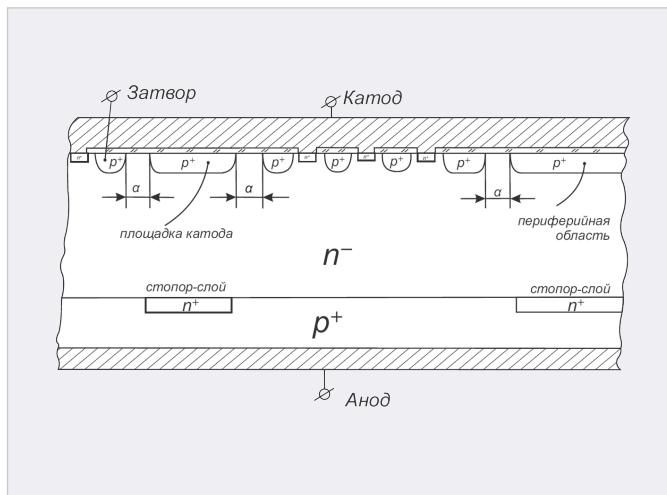


Рис. 4. Разрез кристалла ТЭУ со «стопор»-областью

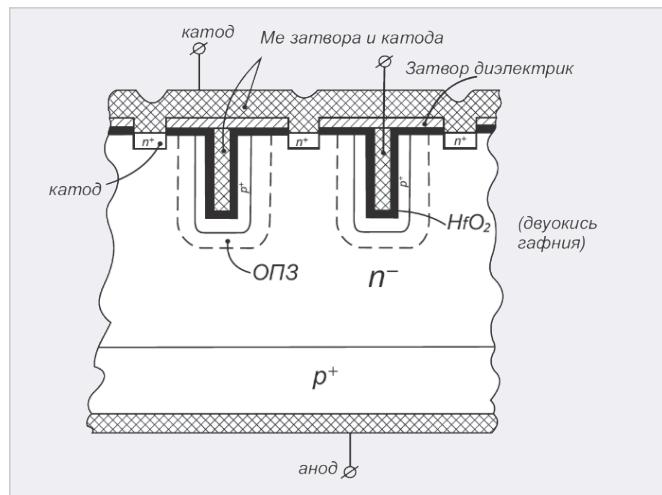


Рис. 5. Разрез кристалла ТЭУ с МОП полевым управлением [7]

В современных тиристорах между n^- и p^+ -областями есть стопорный слой, но он формируется для ограничения ОПЗ и повышения, соответственно, максимального рабочего напряжения. Концентрация примеси в нём невысокая, что не препятствует инжекции дырок из p^+ -области в n^- -область.

Время переключения тиристора зависит от величины эффективной ёмкости затвора ($C_{вх\ эф}$), которая определяется уравнением:

$$C_{вх\ эф} = C_{зи} + C_{зс} (1 + M^*) + C_{зк} + C_{зпл}, \quad (1)$$

где M^* – коэффициент усиления;
 $C_{зк}$ – ёмкость, определяемая неосновными носителями в канале;
 $C_{зпл}$ – ёмкость, определяемая неосновными носителями под площадками и на периферии.

В линейном приближении $T_{пер} = 2,2C_{вх\ эф} (R_r + R_з)$, где $T_{пер}$ – время переключения; R_r – выходное сопротивление генератора запускающих импульсов; $R_з$ – сопротивление области затвора транзистора.

Точный расчёт $C_{зк}$ и $C_{зпл}$ не представляется возможным, но очевидно, что неосновные носители, определяющие их величину в канале и под площадками катода, затвора и на периферии, рассасываются по разным законам: в канале они вытягиваются полем и рекомбинируют с электронами, летящими из катода; под площадками и на периферии – медленно дрейфуют к затвору.

Ясно, что $C_{зпл}$ больше всех остальных, и её устранение существенно повышает быстродействие тиристора. Кроме того, отключение «паразитных» областей уменьшит $C_{зи}$ и $C_{зс}$ почти в два раза. Сегодня ТЭУ с такой конструкцией ещё не изготовлены, но ожида-

ется, что при её реализации уменьшение $T_{пер}$ будет более чем на порядок.

Замена n^+ -областей катода на isotипный гетеропереход позволит проводить глубокую модуляцию высокоомной области анода основными носителями, что, в свою очередь, позволит увеличить рабочее напряжение тиристора до 10 кВт и выше и снизить сопротивление канала в открытом состоянии на несколько порядков, увеличить быстродействие. Это, в свою очередь, позволит снимать больший ток с единицы площади кристалла.

Данная конструкция ТЭУ является одной из лучших, выполненных на Si. Для её реализации можно использовать хорошо отработанную технологию, описанную в [6]. Однако наиболее интересные конструкции ТЭУ будут на GaAs, так как этот материал имеет подвижность электронов почти в восемь раз выше, и ширина запрещённой зоны больше. Это позволяет создавать более высоковольтные приборы с более высокой скоростью переключения.

Авторами данной работы предложена конструкция для создания ТЭУ на GaAs по технологии Trench на принципе максвелловского «сшивания» пограничных сред [7]. Схематичный разрез кристалла показан на рис. 5.

Тиристор представляет собой ТЭУ с МОП полевым управлением. Подзатворный окисел должен быть выполнен из диэлектрических материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ox} \gg \epsilon_{GaAs}$, т.е. из комбинаций окислов металлов, таких как Ti, Ta, Hf, Cd и др., с обязательным буферным нанослоем (< 10 нм) широкозонного изолятора. Это не позволит переходить грань плотности поверх-

ностных зарядов состояний N_{ss} больше чем $3...5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. В конструкции, приведённой на рис. 5, применён диэлектрик из двуокиси гафния.

Из соотношения Масквелла

$$\epsilon_1 \epsilon_0 E_1 = \epsilon_2 \epsilon_0 E_2 \quad (3)$$

следует, что соотношение выделяемого падения напряжения на p-n-переходе и в оксиде гафния определяется как $U_{p-n} = (\epsilon_{HfO2} \cdot U_{HfO2} \cdot W_{p-n}) / (\epsilon_{Si} \cdot d_{HfO2})$; (4)
 $K = U_{p-n} / U_{HfO2} = (\epsilon_{HfO2} \cdot W_{p-n}) / (\epsilon_{Si} \cdot d_{HfO2})$, (5)
 т.е. $K \approx 200 \sim 250$. Это говорит о том, что всё приложенное напряжение к затвору будет переходить на p-n-переход.

Плотность заряда инверсного канала несравнимо более высокая, чем в кремниевых JGT и карбид-кремниевых MOSFET, а подвижность электронов в канале, или, точнее говоря, дрейфовая скорость пролёта электронов в i-GaAs-MOSFET, в 20 раз превышает кремниевый дрейф и тем более карбид-кремниевую скорость пролёта. Что же касается «проходных» и «выходных» RC-цепочек, то и здесь преимущество будет за GaAs вследствие того, что выходная ёмкость при нуле смещения как минимум в 30 и в 10 раз меньше, чем в SiC- и Si-MOSFET соответственно (мощность динамических потерь при перезарядке/переключении управляющего драйвера). Сопротивление открытого канала у GaAs-ТЭУ ($R_k \text{ GaAs}$) меньше, чем в $R_k \text{ SiC-MOSFET}$, так как идёт мощная инжекция носителей из анода.

Катод можно делать как n^+ -область либо гетероинжекционным. На рис. 6 и рис. 7 показаны зонные энергетические диаграммы активной истоковой области кремниевого и арсенид-галлиевого ТЭУ с гетероистоком. Принципы работы обеих конструкций одинаковы, а именно: при подаче положительных

потенциалов относительно катода на анодную и затворную активные области происходит инжекция дырочных носителей заряда в зону канала катод-анод с одновременной термоэмиссионной (на начальной стадии) и инжекционной поставкой электронов в канал катод-анод для создания нейтральной проводящей электронно-дырочной плазмы (ЭДП) в n-канале, вследствие чего его проводимость возрастёт на порядки. Но имеются и существенные отличия.

1. На зонной диаграмме видно, что из-за наличия гетеропереходного n^+ -эпитаксиального слоя резко снижается барьерный потенциал ϕ_{p-n} затвор-катод, а это означает резкое снижение динамических потерь при подаче импульсного тока прямого смещения через затвор-канал, что повысит КПД коммутации ТЭУ.

2. Катод выполнен в виде изотипного гетероперехода n^+ -AlGaAs – n-GaAs, который представляет собой униполярно-инжекционный диодный переход, т.е. n-канальная область, в принципе, даже при отсутствии инжекции на p^+ -n-переходе затвор-канал, может модулироваться достаточно плотной инжекцией электронов из гетерослоя с уровнем энергии от 1,6 до 1,8 эВ, с диффузионной длиной электронов L_n до 30...60 мкм, что на 0,17...0,37 выше, чем в n-канальной области, и к тому же с большой глубиной модуляции проводимости в канале $\sigma = qn\mu_n$, где q – заряд электрона, n – концентрация инжектированных носителей заряда, μ_n – подвижность электронов.

3. В связи с тем, что соотношение $\mu_{n-GaAs}/\mu_{n-Si} \approx 6,6$, а в кремниевом канале (без инжекции дырок из затвора) при полевом воздействии катод-анод доминирует термоэмиссионный механизм, который хорошо раскрыт в монографиях по диодам Шоттки, или, иными словами, протекание тока в кремниевом n^+ -n- p^+ -канале будет представлять собой не что иное, как перенос тока в слаботочном стабилиторе с насыщением тока вследствие насыщения подвижности электронов. В отличие от кремниевое n^+ -n-типа катода, в нашем случае из катода n^+ -AlGaAs/n-GaAs будет наблюдаться мощная инжекция электронов изотипного перехода в n-типа канал. Образуется высокоплотная электронно-дырочная плазма (ЭДП).

Электронно-дырочная плазма в GaAs канале очень подвижна из-за высокой

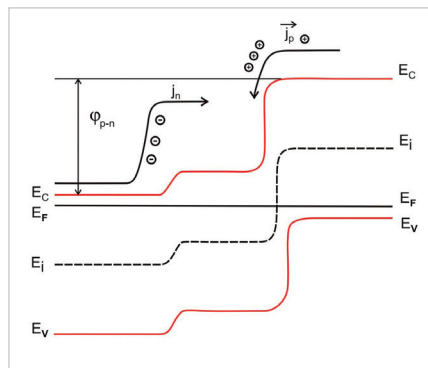


Рис. 6. Зонная энергетическая диаграмма системы n^+ -Si – n-Si – p^+ -Si катодной области кремниевого ТЭУ

амбиполярной подвижности электронно-дырочных носителей заряда.

При подаче запирающего напряжения ($U_g < 0$ В) на p^+ -затвор будет происходить процесс релаксации ЭДП-заряда с дифференцированным вытеканием дырок в затворную область, электронов – в анодную область, а также с процессами рекомбинации носителей заряда (зона/зона); зона – рекомбинационные центры в запрещённой энергетической зоне. Например, на атомах кремния, являющегося катализатором LPE (Liquid-Phase Epitaxy) – жидкофазного эпитаксиального процесса.

При запертом (отрицательном) напряжении на затворе после релаксации ЭДП в истоковой области между затворами p^+ -типа возникает область пространственного заряда, блокирующая протекание тока в канале между гетероистоком n^+ -AlGaAs/n-GaAs и GaAs p^+ -анодом.

Конкретный пример исполнения AlGaAs/GaAs ТЭУ состоит в следующем.

На p^+ -GaAs монокристаллической подложке после химико-динамической полировки (ХДП) пластины, в частности, на установке Logitech в реакторе кварцевой трубы с заданным градиентом температуры в пределах 750...900°C, из расплава GaAs (источник атомов As) и Ga выращивается эпитаксиальный слой GaAs n-типа проводимости.

Концентрация доноров N_D контролируется уровнем лигатуры атомов Si, Te или Sn. В частности, как правило, N_D регулируется в пределах 1014...1015 см⁻³, с толщинами эпитаксиального слоя от 10 до 50 мкм, что соответствует диапазону электропрочности p-n-перехода (затвор-сток) в пре-

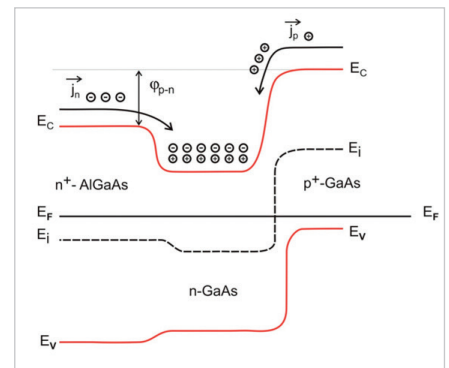


Рис. 7. Зонная энергетическая диаграмма системы n^+ -AlGaAs – n-GaAs – p^+ -GaAs катодной области GaAs ТЭУ

делах максимальных напряжений пробоя $U_{проб.СИ} = 200...800$ В.

Затворная p^+ -область создаётся методом диффузии атомов Zn (из насыщенного цинком графита) в среде водорода через маску из плёнок Si₃N₄ толщиной от 0,3 мкм (нитрида кремния с усилением в некоторых случаях дополнительным оксидным слоем кремния SiO₂, осаждённого газозофазным методом, толщиной от 0,5 мкм).

Расстояние L_n (ширина канала под катодом) между p^+ -затворными областями при проектировании полосковой топологии катода и затвора транзистора выбирается из условия:

$$L_n = > 2 \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 \phi_T}{q N_D}}, \quad (6)$$

где ϕ_T – собственный потенциал p^+ -n-перехода, который рассчитывается по формуле:

$$\phi_T = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{N_D}, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура по Кельвину; N_D – концентрация донорной примеси в n-типа канале; N_A – концентрация акцепторной примеси в p^+ -типа затворе (справочно: при $T = 25^\circ\text{C}$ значение $\frac{kT}{q} = 0,026$ эВ).

Исходя из вышеприведённых формул, n-типа канал под гетерофазным катодом при $U_{зи} > 0$ В открыт и является проводящей областью; при $U_{зи} \ll 0$ область канала под гетероистоком становится не проводящей для потока электронов, а изотипной. n^+ -AlGaAs/n-GaAs переход будет закрыт для инжекции электронов.

Эпитаксиальный AlGaAs слой толщиной 1...3 мкм выращивается либо LPE, либо MOCVD-методом, легируется атомами теллура или олова с уровнем концентрации примеси выше, чем 10¹⁸ см⁻³.

Для снижения прямых потерь напряжения на омических контактах на

Таблица 1. Характеристики современных мощных силовых ключей

Тип прибора	Преимущества	Недостатки	Области применения
Традиционный тиристор (SCR)	Самые низкие потери во включённом состоянии. Самая высокая перегрузочная способность. Высокая надёжность. Легко соединяются параллельно и последовательно	Не способен к принудительному запираению по управляющему электроду. Низкая рабочая частота	Привод постоянного тока, мощные источники питания; плавление и нагрев; статические компенсаторы; ключи переменного тока
GTO	Способность к управляемому запираению. Сравнительно высокая перегрузочная способность. Возможность последовательного соединения. Рабочие частоты до 250 Гц при напряжении до 4 кВ	Высокие потери во включённом состоянии. Очень большие потери в системе управления. Сложные системы управления и подачи энергии на потенциал. Большие потери на переключение	Электропривод; статические компенсаторы; реактивные мощности; системы бесперебойного питания; индукционный нагрев
IGCT	Способность к управляемому запираению. Перегрузочная способность та же, что и у GTO. Низкие потери во включённом состоянии на переключение. Рабочая частота – до единиц кГц. Встроенный блок управления (драйвер). Возможность последовательного соединения	Не выявлены из-за отсутствия опыта эксплуатации	Мощные источники питания; электропривод
IGBT	Способность к управляемому запираению. Самая высокая рабочая частота (до 10 кГц). Простая неэнергоёмкая система управления. Встроенный драйвер	Очень высокие потери во включённом состоянии	Электропривод; системы бесперебойного питания; статические компенсаторы и активные фильтры; ключевые источники питания
DEC-Si (ДЭУ)	Способность к управляемому запираению. Высокая рабочая частота (до 100 кГц). Простая неэнергоёмкая система управления. Встроенный драйвер	Очень низкие статические и динамические потери	Электропривод; системы бесперебойного питания; статические компенсаторы и активные фильтры; ключевые источники питания
HMOSJFET	Способность к управляемому запираению. Высокая рабочая частота (до 1 МГц). Простая неэнергоёмкая система управления. Встроенный драйвер	Очень низкие статические и динамические потери	Электропривод; системы бесперебойного питания; статические компенсаторы и активные фильтры; ключевые источники питания

поверхности n^+ -AlGaAs может быть нанесён дополнительный LPE или MOCVD эпитаксиальный n^+ -GaAs слой в пределах 1...3 мкм с более высокой концентрацией донорной примеси, чем в n^+ -GaAs слое, с туннельно-дрейфовым переносом заряда электронов из n^+ -GaAs слоя в n^+ -AlGaAs слой. Омические контакты выполняются на основе системы AuGe (80 нм) / Ni (100 нм) / Au (> 2000 нм).

Травление меза-области проводится в две стадии (в магнитомешалке):

- 1) глубокое травление в серно-перекисном растворе в соотношении 1:1;
- 2) полирующее травление в серно-перекисном растворе с более слабой концентрацией серной кислоты в соотношении 1:3.

На финишной стадии поверхность эпитаксиального слоя n-типа проводимости пассивируется ALD-покрытием, в нашем случае наноплёнкой Al_2O_3 или AlN, TiO_2 , Hf_2O_3 толщиной 2...15 нм с последующим нанесением на неё фотоимида, например, производства “Fujii” (Япония), толщиной до 15 мкм с ультрафиолетовой полимеризации

ей после фотогравировки (фотолитографии).

Контроль параметров кристалла производится на зондовой установке с подогревом кристалла на контактном столике до +250...+300°C.

Данный тиристор, вероятно, следует принимать во внимание в качестве абсолютного конкурента Si-IGBT-, SiC-MOSFET- и Si-MOSFET-транзисторам. Фактически это новое семейство ещё неизвестных на мировом рынке GaAs полевых тиристоров с изолированным затвором, которые можно будет обозначить следующим образом: гетероинжекционный полевой тиристор со статической индукцией, имеющий комбинированное гетеро-MOS/p-n-управление проводимостью канала, или HMOSJFET (где H – гетероинжекционный, MOS – МОП-затвор, J – p-n-затвор, FET – полевой тиристор с управляющим p-n-переходом). В зависимости от параметров (толщины, концентрации свободных носителей) n^+ -AlGaAs-, n-GaAs-, in-GaAs-, n^- -GaAs-слоёв вольт-амперные характеристики нового тиристора будут или триод-

ного, или пентодного типа, т.е. иметь либо нормально открытый канал, либо нормально закрытый. Входные ёмкости HMOSJFET-структур (эквивалент выходной мощности управляющего драйвера) практически на три порядка (в 1000 раз) меньше, чем входные C_{gs} у SiC- или Si-MOSFET, чем и объясняется их быстродействие. Триодная структура GaAs полевого тиристора вследствие мощной электронной инжекции гетероизотипного катода (n^+ -AlGaAs / n-GaAs / i-GaAs) по плотности тока будет выше, чем Si-IGBT. По сути, триодная структура – электронный прототип Si-IGBT приборов с той лишь разницей, что частота коммутации таких тиристоров будет находиться в мегагерцевом диапазоне, а на пути протекания тока только один переход.

Данную конструкцию ТЭУ можно выполнять и Si, используя объединение технологий Trench и [6]. Себестоимость такого прибора будет гораздо ниже, чем на основе GaAs, но по статическим и динамическим параметрам он будет превосходить приборы типа Si-IGBT и MOSFETы.

В 2020 году фирма Cree наладила производство серийных МОП-транзисторов на карбиде кремния (SiC), которые из-за широкозонности материала показывают рекордные значения по сопротивлению канала в открытом состоянии (R_k) и максимальному рабочему напряжению по сравнению с обычными МОП-транзисторами и могли бы составить конкуренцию ТЭУ. Однако из-за низкой подвижности электронов ($900 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), а в канале и того меньше – $200\text{...}300 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, у Si – $1450 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), они могут работать на частоте не выше 150 кГц. Также они проигрывают ТЭУ и по R_k . В ТЭУ плотность электронно-дырочной плазмы на несколько порядков выше, чем в МОП-транзисторах на SiC. Кроме того, они имеют такие недостатки, как высокая себестоимость (SiC по твердости не уступает алмазу и имеет высокую дефектность кристаллической решётки), низкая стабильность, высокая вероятность включения паразитного диода и сложность в управлении из-за низкой зависимости ширины ОПЗ от приложенного напряжения.

ТЭУ существенно отличается от обычных тиристоров. Обычные тири-

сторы имеют четырёхслойную структуру, а ТЭУ – двухслойную, как диод, поэтому его правильнее называть диодом с электростатическим управлением (ДЭУ). В табл. 1 приведены характеристики мощных силовых высоковольтных современных ключей.

Заключение

Авторами данной статьи разработаны новые конструктивно-технологические приёмы построения высоковольтных тиристоров со статической индукцией (ТЭУ) на Si и GaAs, которые позволяют создать приборы с параметрами, превосходящими лучшие зарубежные тиристоры и приборы на SiC во всём диапазоне рабочих напряжений. В связи с тем, что у ТЭУ на пути протекания тока только один p-n-переход, авторы предлагают их называть диодами с электростатическим управлением (ДЭУ).

Литература

1. Максименко Ю.Н. Транзистор со статической индукцией КП926 с повышенным быстродействием // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 3 (266).

2. Рогачев К.Д. Современные силовые запираемые тиристоры // Рынок микроэлектроники. 2015.
3. Ржеусская А.Д., Корнюшко О.А. Устройство и применение запираемых тиристоров // Актуальные проблемы энергетики. 2016.
4. Nishizawa I., Nonaka T., Mochida Y. Static induction transistor logic // Proc. 1979 Int. Conf. Solid State Device (Tokyo) lap, I. Appl. Phys. Suppl. 19.01.1980. P. 279–282.
5. Normally-off type high speed SI-thyristor / Y. Nakamura, H. Tadano, S. Sagiyama et al. // International Electron Devices Meet. San-Fransisco, Calif. 1982. P. 480–483.
6. Авторское свидетельство № 1215546 СССР, МКИ Н01 21/18. Способ изготовления полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом и вертикальным каналом: № 3052227 : заявл. 22.06.1982 : зарег. в Госреестре изобретений СССР 01.11.1985 / Ю.Н. Максименко, С.Н. Корнилова, Н.М. Жуковский.
7. Максименко Ю.Н. Мощные полупроводниковые приборы со статической индукцией: монография. Новосибирск: PVN, 2022.



innodisk

Industrial
SATADOM-MV
3ME4 Series

SATADOM — ИДЕАЛЬНОЕ ЗАГРУЗОЧНОЕ РЕШЕНИЕ

Компактные твердотельные накопители с интерфейсом SATA III с высокой скоростью передачи данных

PROSOFT®

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU



Реклама