

Исследование влияния топологии полосковой мезаструктуры на основные параметры низковольтного GaAs-тиристора

© К.С. Жидяев, А.Б. Чигинева, Н.В. Байдусь, И.В. Самарцев, А.В. Кудрин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022 Нижний Новгород, Россия

E-mail: zhidyayev@nifti.unn.ru

Поступила в Редакцию 14 марта 2024 г.

В окончательной редакции 19 марта 2024 г.

Принята к публикации 19 апреля 2024 г.

Изготовлен и экспериментально исследован GaAs-тиристор с полосковой геометрией мез. Показано, что изменение топологии сильно легированного p -эмиттера и анодного омического контакта приводит к повышению величины и уменьшению разброса напряжения переключения образцов, а также к снижению основного тока в закрытом состоянии.

Ключевые слова: тиристоры, мезаструктура, арсенид галлия, напряжение переключения, основной ток в закрытом состоянии.

DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58407.6148

1. Введение

Известной проблемой всех полупроводниковых приборов на основе арсенида галлия, в том числе и тиристоров, является негативное влияние на их характеристики поверхностных состояний, имеющих высокую плотность как на поверхности пластин, так и на боковых поверхностях мезаструктур [1]. Технология изготовления малогабаритных низковольтных тиристоров, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, включает формирование мез разной топологии путем травления эпитаксиальных слоев [2–6]. Следует заметить, что блокирующая способность таких приборов может значительно снижаться из-за наличия заряда поверхностных состояний по периметру p – n -переходов, выходящих на боковую поверхность мезы. Этот заряд способен приводить к образованию инверсного слоя на поверхности высокоомной области либо к возникновению электрического поля на поверхности, превышающего по величине поле в объеме, вследствие чего поверхностный пробой происходит при более низком напряжении [1,7,8].

При проведении исследований GaAs тиристорных мезаструктур круглой и полосковой геометрии [6,9] нами было отмечено, что без дополнительных обработок мез наблюдается значительный разброс по величине напряжения переключения разных образцов в партии, а также постепенная деградация характеристик при многократных переключениях. В работе [9] для обработки боковой поверхности GaAs-мез круглой геометрии диаметром до 4 мм нами были предложены различные методы (химическое сульфидирование и профилирование мез), которые способствовали повышению величины и стабильности напряжения переключения образцов. Настоящая работа является продолжением этих исследований и посвящена изучению GaAs тиристорных мезаструктур полосковой геометрии. Рассмотрено влияние топологии

сильно легированного p -эмиттера и анодного омического контакта на величину напряжения переключения и основного тока в закрытом состоянии.

2. Исследуемые образцы и методика эксперимента

Тиристорная p – n – p – n -структура выращивалась на подложке n^+ -GaAs (100) методом МОС-гидридной эпитаксии. Концентрация легирующей примеси эмиттерных областей n - и p -типа толщиной 0.55 и 0.30 мкм соответственно составляла $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Базовые области n^0 -типа (1.9 мкм) и p^0 -типа (2.2 мкм) легировались до уровня $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. На основе выращенной структуры были сформированы конструкции тиристоров путем вытравливания мез полосковой геометрии глубиной ~ 0.5 мкм и шириной 360 мкм. Анодный и управляющий омические контакты к p -эмиттеру и n^0 -базе формировались на основе AuGe в виде полосок шириной 300 мкм. Катодный контакт также был выполнен на основе AuGe и наносился на подложку n^+ -GaAs сплошным слоем. Пластина с изготовленной структурой раскальвалась на линейки с длиной мезаполосков ~ 1 мм.

Следует отметить, что в описанной топологии тиристоров (тип 1) все слои эпитаксиальной структуры, включая металлические полоски омических контактов, выходили на сколотые грани линеек тиристоров (рис. 1, *a*). На некоторых линейках полоски омических контактов были укорочены путем удаления в иодистом травителе областей, примыкавших к сколотым граням (по ~ 200 мкм с каждой стороны). Топология полученных тиристоров (тип 2) показана на рис. 1, *b*. На других линейках помимо омического контакта стравливались расположенные ниже части слоя p -эмиттера, примыкающие к сколотым граням линеек (по ~ 150 мкм с каждой стороны). Травление p -эмиттера выполнялось

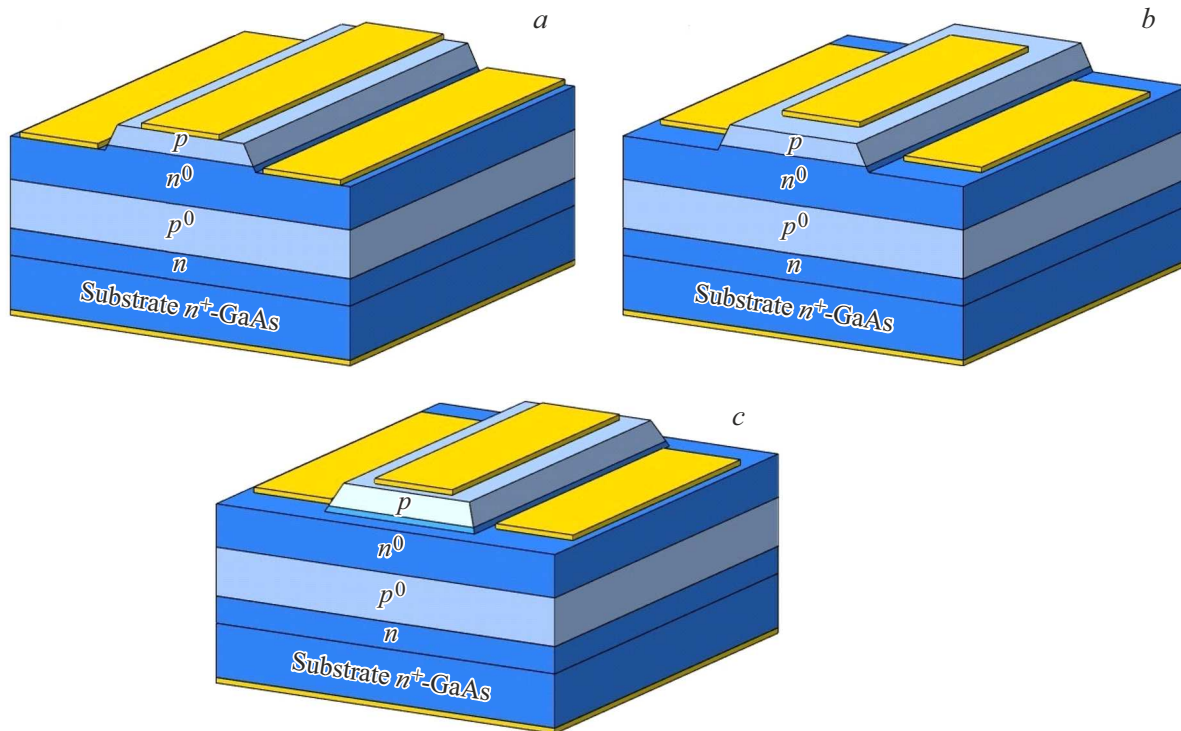


Рис. 1. Схематическое изображение топологии тиристорных GaAs-мезоструктур: *a* — тип 1, *b* — тип 2, *c* — тип 3.

на глубину ~ 0.5 мкм, таким образом удалялась часть n^0 -базового слоя глубиной ~ 0.2 мкм. Топология этих тиристоров (тип 3) приведена на рис. 1, *c*.

В работе исследовались линейки образцов с исходной топологией типов 1, 2 и 3, а также линейки типа 1, последовательно подвергавшиеся дополнительной обработке для получения на них топологии типов 2 и 3. Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) тиристоров без управляющего сигнала в режимах источника напряжения и источника тока. Из полученных зависимостей определялись напряжение переключения (U_{bo}) и основной ток в закрытом состоянии тиристора (I_o).

3. Результаты и обсуждение

Первоначально были изготовлены и исследованы линейки тиристорных мезоструктур с топологией всех трех типов, для которых на рис. 2 приведены типичные ВАХ в режиме источника тока. Все типы структур обладают вольт-амперными характеристиками *S*-образного вида, что обусловлено переключением тиристоров из закрытого (высокоомного) состояния в открытое (низкоомное).

Для более точного определения напряжения переключения образцов все дальнейшие измерения ВАХ производились в режиме источника напряжения. Экспериментальные значения U_{bo} и I_o тиристоров с разным типом топологии приведены в табл. 1. Видно, что для тиристоров с топологией типа 1 величина U_{bo} отличается в 3 раза для образцов в одной линейке. Уменьшение

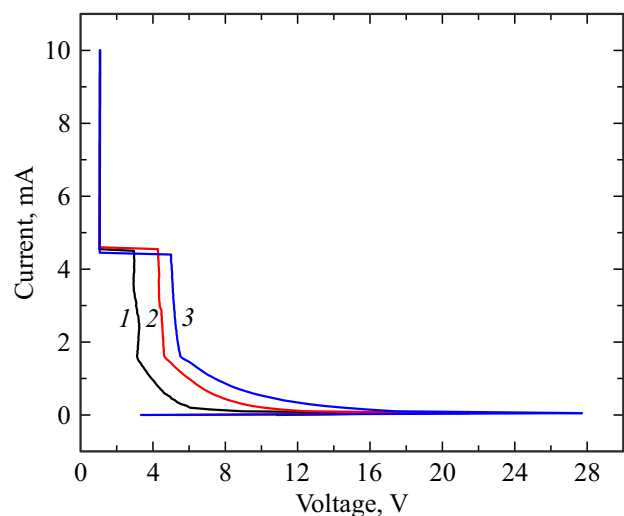


Рис. 2. Типичная ВАХ (в режиме источника тока) тиристорных мезоструктур с разной топологией: 1 — тип 1, 2 — тип 2, 3 — тип 3.

площади металлического контакта и *p*-эмиттера тиристоров (тип 3) привело к тому, что максимальное блокирующее напряжение повысилось на 30%, а минимальное возросло почти в ~ 4 раза по сравнению с образцами типа 1. При этом разброс значений U_{bo} для тиристоров с топологией типа 3 сократился в 16 раз, что немаловажно в серийном производстве, где предъявляются строгие требования к разбросу параметров изготавливаемой про-

Таблица 1. Напряжение переключения и основной ток в закрытом состоянии GaAs тиристорных мезаструктур с разной топологией

Топология образцов	U_{bo} , В	I_o , мкА ($U = 5$ В)
Тип 1	8–24	0.1–0.6
Тип 2	17–32	0.2–0.3
Тип 3	31–32	0.1–0.2

Таблица 2. Характеристики тиристорных мезаструктур при последовательном изменении топологии от типа 1 до типа 3

Этап обработки	U_{bo} , В	I_o , мкА ($U = 5$ В)
Исходная структура (тип 1)	8–24	0.1–0.6
Частичное удаление омического контакта (тип 2)	19–32	0.3–0.5
Частичное удаление p -эмиттера (тип 3)	26–34	0.1

дукции. Кроме того, у образцов с топологией типов 2 и 3 снизилось среднее значение и разброс тока тиристора в закрытом состоянии при основном напряжении 5 В.

Для подтверждения полученных результатов был проведен эксперимент, в котором линейки тиристорных мезаструктур с топологией типа 1 последовательно подвергались травлению металлического контактного слоя, а затем и слоя p -эмиттера для получения на тех же линейках образцов с топологией типов 2 и 3. После каждого этапа обработки измерялись ВАХ полученных тиристорных мезаструктур. Результаты измерений приведены в табл. 2. Они подтверждают, что каждый дополнительный этап обработки тиристорной мезаструктуры обеспечивает рост блокирующей способности образцов по сравнению с предыдущим этапом. Однако следует отметить значительный разброс значений U_{bo} для образцов всех трех типов. Например, для образцов с топологией типа 3 он снизился всего в 2 раза по сравнению с исходными образцами типа 1. Абсолютная величина разброса (8 В) сильно превышает аналогичную величину из табл. 1, что может быть связано с формированием в процессе измерения ВАХ токовых шунтов в объеме структуры, которые сохраняются при последующих обработках поверхности мезаструктур. Кроме того, после частичного удаления полосковых омических контактов наблюдалось небольшое увеличение среднего для линейки тиристорных мезаструктур значения тока в закрытом состоянии при основном напряжении 5 В.

На рис. 3, *a* показаны типичные ВАХ тиристорных мезаструктур при последовательном изменении топологии от типа 1 до типа 3, а на рис. 3, *b* — соответствующие закрытому состоянию участки этих же ВАХ в увеличенном

масштабе. Рис. 3, *a* наглядно иллюстрирует вывод о том, что удаление частей металлического контакта и сильно легированного слоя p -эмиттера, выходящих на сколотую грань тиристорной мезаструктуры, приводит к повышению блокируемого напряжения образцов. Аналогичный результат наблюдался нами в работе [9] при создании сложнопрофилированной ступенчатой топологии боковой поверхности круглых GaAs тиристорных мезаструктур методом жидкостного травления.

На рис. 3, *b* обращает на себя внимание более быстрый характер нарастания тока на начальном участке кривой 2 (от 0 до 2.5 В) по сравнению с кривыми 1 и 3. Такая особенность ВАХ тиристорных мезаструктур типа 2, скорее всего, вызвана загрязнением их поверхности ионами посторонних примесей из иодистого травителя, используемого для удаления анодного омического контакта, промывочной воды или внешней атмосферы [8]. В результате такого

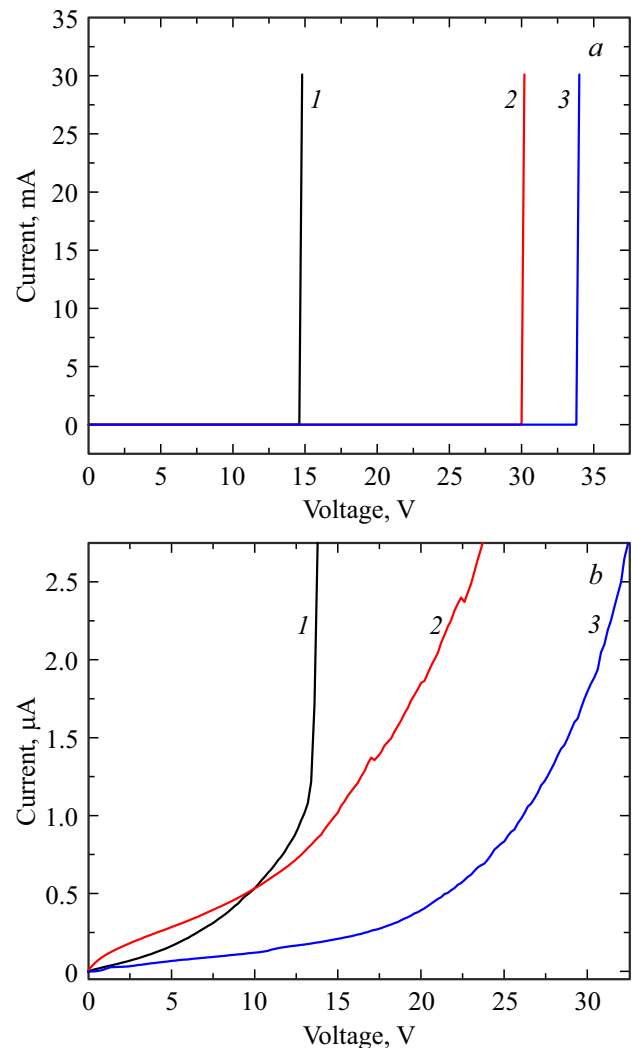


Рис. 3. Типичная ВАХ (в режиме источника напряжения) в открытом (*a*) и закрытом (*b*) состоянии тиристора с топологией типа 1 (кривые 1), а также после частичного удаления металлического контакта (кривые 2) и p -эмиттера (кривые 3).

загрязнения может образоваться поверхностный шунт анодного эмиттерного $p-n^0$ -перехода, который при малых значениях напряжения способствует утечке неравновесных электронов из n^0 -базовой области и приводит к быстрому нарастанию I_o . Вследствие чего накопление электронов в n^0 -базе критической концентрации, необходимой для переключения тиристора в открытое состояние, происходит при большем значении напряжения [10].

Нарастание тока в закрытом состоянии на начальных участках кривых 1 и 3 на рис. 3, б имеет качественно схожий характер. Уменьшение наклона ВАХ кривой 3 по сравнению с кривой 1 может быть связано с рядом причин. Во-первых, снижается вклад поверхностных загрязнений в величину I_o для образцов с топологией типа 3, так как при травлении GaAs с поверхности удаляются загрязнения. Во-вторых, затрудняется поверхностная диффузия дырок, инжектированных в n^0 -базу, к области пространственного заряда (ОПЗ) коллекторного p^0-n^0 -перехода за счет отдаления от него поверхности эмиттерного $p-n^0$ -перехода. И, в-третьих, снижается объемная составляющая тока через эмиттерный $p-n^0$ -переход из-за уменьшения его площади в ~ 1.5 раза. Все вышеперечисленные факторы способствуют уменьшению скорости накопления неравновесных носителей заряда критической концентрации в базовых областях, что приводит к повышению U_{bo} (рис. 3, а).

Интересно отметить, что при больших напряжениях кривые 2 и 3 на рис. 3, б имеют одинаковый наклон, т. е. основной механизм протекания тока на данных участках закрытого состояния для образцов с топологией типа 2 и 3 совпадает. Это связано с тем, что в образцах с топологией типа 2 при увеличении напряжения эмиттерный ток, меняющийся экспоненциально, становится значительно больше тока шунта, меняющегося линейно [10].

В исследуемых образцах коллекторный p^0-n^0 -переход, обеспечивающий блокирующие свойства тиристора, выходит на поверхность скола, образованную при разделении структуры на линейки. Согласно [11], в мезаструктурных диодах с вертикальными стенками электрическое поле на поверхности мезы соизмеримо с величиной поля в объеме, однако поверхностный пробой остается, как правило, доминирующим (из-за наличия на этой поверхности различного рода структурных неоднородностей, поверхностного заряда, загрязнений и т.п.). При повышении основного напряжения тиристора ширина области пространственного заряда в его базовых областях увеличивается. Для n^0 -базового слоя с концентрацией легирующей примеси $1.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ расчетное значение ширины ОПЗ при пробое $p-n$ -перехода составляет 1.6 мкм [12]. Поэтому мало вероятно, что напряжение переключения тиристора ограничено проколом n^0 -базовой области толщиной 1.9 мкм, по крайней мере в объеме структуры. Для переключения тиристора в проводящее состояние необходимо накопление в p^0 - и n^0 -базовых областях неравновесных дырок и электронов соответственно, которые поставляются из

p - и n -эмиттеров в основном за счет процессов дрейф-диффузионного транспорта до наступления лавинного размножения носителей при больших напряжениях. Изменения топологии образцов тиристорных, рассмотренные в данной работе, с одной стороны, способствуют уменьшению инжекции дырок из p -эмиттера в n^0 -базу в приповерхностной области. С другой стороны, они снижают поверхностную диффузию инжектированных дырок к области пространственных зарядов (ОПЗ) p^0-n^0 -коллекторного перехода за счет отдаления от него поверхности эмиттерного $p-n^0$ -перехода после стравливания части p -эмиттера. Все это приводит к повышению напряжения переключения тиристорных и уменьшению основного тока в закрытом состоянии.

В заключение хочется отметить, что вышеприведенные результаты исследований модификации топологии тиристорных мезаструктур свидетельствуют о поверхностной природе их пробоя. Поэтому важной задачей остается борьба с наличием токов утечки и краевых электрических полей на боковой поверхности приборных GaAs-структур различных конструкций.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследовано влияние топологии сильно легированного p -эмиттера и анодного омического контакта GaAs тиристорных полосковых мезаструктур на их напряжение переключения и основной ток в закрытом состоянии. Показано, что изменение топологии верхних слоев мезаструктур позволяет увеличить напряжение переключения до 34 В, а ток в закрытом состоянии уменьшить до 0.1 мкА (при напряжении 5 В).

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания (проект FSWR-2023-0037).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.В. Лебедев. ФТП, **54** (7), 587 (2020).
- [2] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, M.G. Rastegaeva, N.V. Voronkova, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. IEEE Photon. Technol. Lett., **33** (1), 11 (2021).
- [3] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, V.S. Golovin, D.N. Romanovich, V.A. Kapitonov, A.S. Kazakova, K.V. Bakhvalov, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. IEEE Trans. Electron Dev., **68** (6), 2855 (2021).

- [4] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, P.S. Gavrina, V.V. Shamakhov, D.N. Nikolaev, V.V. Zolotarev, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **67** (1), 193 (2020).
- [5] К.С. Жидяев, С.М. Некоркин, Н.В. Байдусь, А.Б. Чигинева, И.В. Самарцев, А.В. Крюков, В.А. Токарев, Д.И. Баклашов. *Матер. XXVI Междунар. симп. „Нанозфизика и наноэлектроника“* (Н.Новгород, Россия, 2022) т. 2, с. 784.
- [6] А. Б. Чигинева, Н.В. Байдусь, К.С. Жидяев, С.М. Некоркин, И.В. Самарцев. *Матер. XV Росс. конф. по физике полупроводников* (Н.Новгород, Россия, 2022) с. 385.
- [7] М. Бонгарюк, Ю.В. Жилиев, Е.В. Коненкова. *ФТП*, **33** (6), 716 (1999).
- [8] П.С. Агаларзаде, А.И. Петрин, С.О. Изидинов. *Основы конструирования и технологии обработки поверхности р–п-перехода* (М., Сов. радио, 1978) гл. 2, с. 32, 54.
- [9] А.Б. Чигинева, Н.В. Байдусь, С.М. Некоркин, К.С. Жидяев, В.Е. Котомина, И.В. Самарцев. *ФТП*, **56** (1), 134 (2022).
- [10] В. Герлах. *Тиристоры* (М., Энергоатомиздат, 1985) гл. 1, с. 43. [Пер. с нем.: W. Gerlach. *Thyristoren* (Heidelberg, Springer Verlag, 1981)].
- [11] Н.М. Лебедева, Н.Д. Ильинская, П.А. Иванов. *ФТП*, **54** (2), 207 (2020).
- [12] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1, гл. 2, с. 111. [Пер. с англ.: S. Sze. *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd edn (N.Y.–Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore, John Wiley & Sons, 1981)].

Редактор Г.А. Оганесян

Influence of strip mesastructure topology on a low-voltage GaAs thyristor main parameters

K.S. Zhidyaev, A.B. Chigineva, N.V. Baidus,
I.V. Samartsev, A.V. Kudrin

Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod,
603022 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract A GaAs thyristor with mesa-strip has been fabricated and experimentally studied. It is shown that changing topology of the heavily doped *p*-emitter and the anode ohmic contact leads to an increase in magnitude and decrease in variation of breakover voltage of the samples, as well as to a decrease in off-state current.