

Влияние уровня легирования эмиттерных областей на динамику включения низковольтных GaAs-динисторов

© 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 26 марта 2025 г.

В окончательной редакции 16 апреля 2025 г.

Принята к публикации 17 апреля 2025 г.

Изготовлены и экспериментально исследованы GaAs-динисторы с полосковой геометрией мез. Показано, что увеличение уровня легирования *n*- и *p*-эмиттеров приводит к уменьшению времени включения GaAs-динисторов и повышению эффективности их работы при генерации импульсов тока наносекундного диапазона, а именно к увеличению амплитуды и скорости нарастания тока и уменьшению времени нарастания фронта.

Ключевые слова: тиристор, динистор, арсенид галлия, динамика включения, импульс тока.

DOI: 10.61011/FTP.2025.01.60500.7741

1. Введение

В настоящее время актуальной задачей является генерация импульсов тока наносекундного и субнаносекундного диапазона с амплитудой не менее ~ 40 А и частотой следования 20–200 кГц для нагрузки с низким импедансом [1]. Такие импульсы используются, например, для накачки полупроводниковых лазеров в системах лазерной дальнометрии [2]. Генерация коротких импульсов тока требует создания быстродействующих токовых ключей.

В литературе предлагаются различные варианты быстродействующих токовых ключей. Большое количество работ посвящено разработке и исследованию высоковольтных коммутаторов (транзисторов, тиристоров, S-диодов) на основе кремния и арсенида галлия [1,3–5]. При этом отмечается, что повышение частоты генерации (от десятков до сотен килогерц) сопровождается резким снижением амплитуды импульсов из-за разогрева структуры токового ключа [1].

Следует отметить, что высоковольтные коммутаторы оказываются неэффективными, когда нагрузка имеет низкое сопротивление. Поэтому значительные усилия исследователей были направлены на разработку различных конструкций низковольтных токовых ключей, работающих при напряжениях < 60 В. В работе [6] удалось реализовать импульсный генератор на основе полевого GaN-транзистора и получить токовые импульсы амплитудой 1.1 кА, длительностью 8 нс при частоте следования 10 кГц. Однако уменьшение длительности импульсов до 580 пс приводило к снижению их амплитуды до 30 А [7]. Кроме того, для эффективной работы GaN-транзисторов предъявляются строгие требования к быстродействию управляющей цепи, что приводит к увеличению ее стоимости и массогабаритных характеристик. Для создания компактных источников коротких оптических импульсов перспективной оказалась

интеграция тиристорных структур и лазерных диодов. При этом альтернативным вариантом ключа являлся низковольтный тиристор на основе GaAs и его твердых растворов [8]. Массив таких тиристоров из 6 элементов при напряжении 27 В генерировал импульсы тока амплитудой 60 А, длительностью 6.4 нс с частотой следования 1 МГц для накачки линейки лазерных диодов [9].

В ряде работ было показано, что параметры эпитаксиальных слоев, входящих в конструкцию GaAs-тиристорных ключей, влияют на длительность и амплитуду генерации импульсов тока [8,10,11]. При этом основное внимание в этих работах уделялось эпитаксиальным слоям базовых областей. Однако для получения коротких импульсов тока большой амплитуды необходимо подбирать оптимальные параметры и для слоев эмиттерных областей тиристорных структур [12]. Настоящая работа направлена на решение этой задачи и посвящена исследованию влияния уровня легирования эмиттерных областей на динамику включения GaAs-динисторов.

2. Исследуемые образцы и методика эксперимента

Исследовались тиристорные *p-n-p-n*-гомоструктуры двух типов (табл. 1), выращенные на подложках n^+ -GaAs (100) методом МОС-гидридной эпитаксии. Базовые области n^0 - и p^0 -типа (толщиной 2 мкм каждая) легировались до уровня $\sim 10^{16}$ см $^{-3}$. Отличия структур заключались в параметрах эмиттерных областей. В структуре первого типа эмиттеры *n*- и *p*-типа, толщиной 0.5 и 0.1 мкм соответственно, были легированы до уровня $1 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. В структуре второго типа были сформированы эмиттеры толщиной 0.3 мкм каждый, а концентрация легирующей примеси была снижена до $2 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. На основе выращенных структур были изготовлены динисторы путем вытравливания мез

Таблица 1. Описание исследуемых GaAs $p-n-p-n$ -структур

Область	Тип 1		Тип 2	
	Толщина, мкм	Легирование, см^{-3}	Толщина, мкм	Легирование, см^{-3}
n -эмиттер	0.5	$1 \cdot 10^{18}$	0.3	$2 \cdot 10^{17}$
p^0 -база	2.0	10^{16}	2.0	10^{16}
n^0 -база	2.0	10^{16}	2.0	10^{16}
p -эмиттер	0.1	$1 \cdot 10^{18}$	0.3	$2 \cdot 10^{17}$

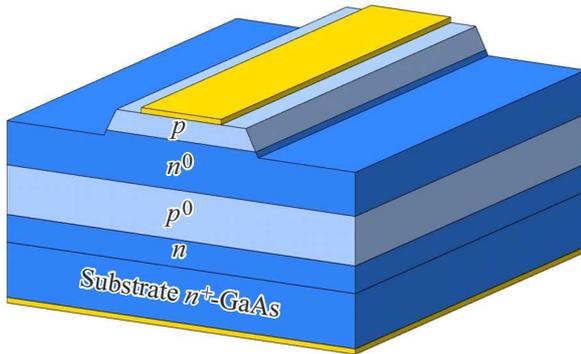


Рис. 1. Схематическое изображение чипа исследуемых динисторов.

полосковой геометрии глубиной 0.5 мкм и шириной 360 мкм. Омические контакты выполнялись на основе AuGe. Полосковый анодный контакт шириной 300 мкм формировался к p -эмиттеру, сплошной катодный контакт — к подложке n^+ -GaAs. Пластины с изготовленными структурами раскалывались сначала на линейки с длиной мезаполосков 1000 мкм, а затем линейки раскалывались на отдельные чипы шириной 800 мкм (рис. 1).

Изготовленные чипы динисторов монтировались параллельно керамическому SMD конденсатору с емкостью 44 нФ. Для измерения коммутируемого тока дополнительно в цепь устанавливался SMD резистор с сопротивлением 0.2 Ом. Компоненты располагались на одной плате максимально близко друг к другу для уменьшения паразитных эффектов. Включение динисторов (переход в открытое состояние) осуществлялось за счет зарядки конденсатора до напряжения переключения. Исследование динамики включения производилось в периодическом режиме работы изготовленных коммутаторов с частотой 300 Гц. Регистрировались осциллограммы напряжения на конденсаторе $U_C(t)$ и резисторе $U_R(t)$, из которых определялись временные зависимости анодного напряжения динистора $U_A(t) = U_C(t) - U_R(t)$. В работе использовался осциллограф с пассивными пробниками с полосой частот 500 МГц каждый.

3. Результаты и обсуждение

Статические вольт-амперные характеристики исследуемых динисторов, измеренные в режиме источника тока,

имели S -образный вид (рис. 2). Переключение образцов из закрытого состояния в открытое осуществлялось при напряжении $U_{BO} = 30$ В и токе ~ 50 мкА. В открытом состоянии при токе 4.5 мА остаточное напряжение у образцов обоих типов равнялось 1 В, что составляло 3.3% от напряжения переключения.

На рис. 3, а приведены графики зависимости от времени анодного напряжения динисторов двух типов в момент их переключения в открытое состояние. Из этих графиков определялась скорость перехода динистора в открытое состояние как время спада анодного напряжения с уровня 90% до уровня 10% от максимального [13]. Обнаружено, что структура 1 типа переключается в открытое состояние быстрее, чем структура 2 типа (14 и 21 нс соответственно). Скорость перехода во включенное состояние определяет форму импульса коммутируемого тока (рис. 3, б). Динамические параметры импульсов тока, сгенерированных с помощью исследуемых динисторов, приведены в табл. 2. Видно, что динисторы 1 типа с повышенным уровнем легирования эмиттерных областей демонстрируют более эффективную работу по сравнению с динисторами 2 типа. Для динисторов 1 типа получены импульсы тока наносекундного диапазона с большей амплитудой, меньшими длительностью и временем нарастания фронта. Скорость нарастания тока (с уровня 10% до уровня 90% от максимального

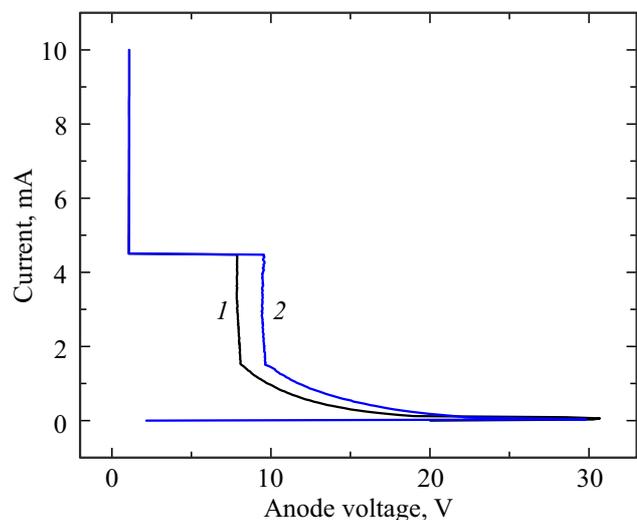


Рис. 2. Статические вольт-амперные характеристики исследуемых динисторов: 1 — первого типа, 2 — второго типа.

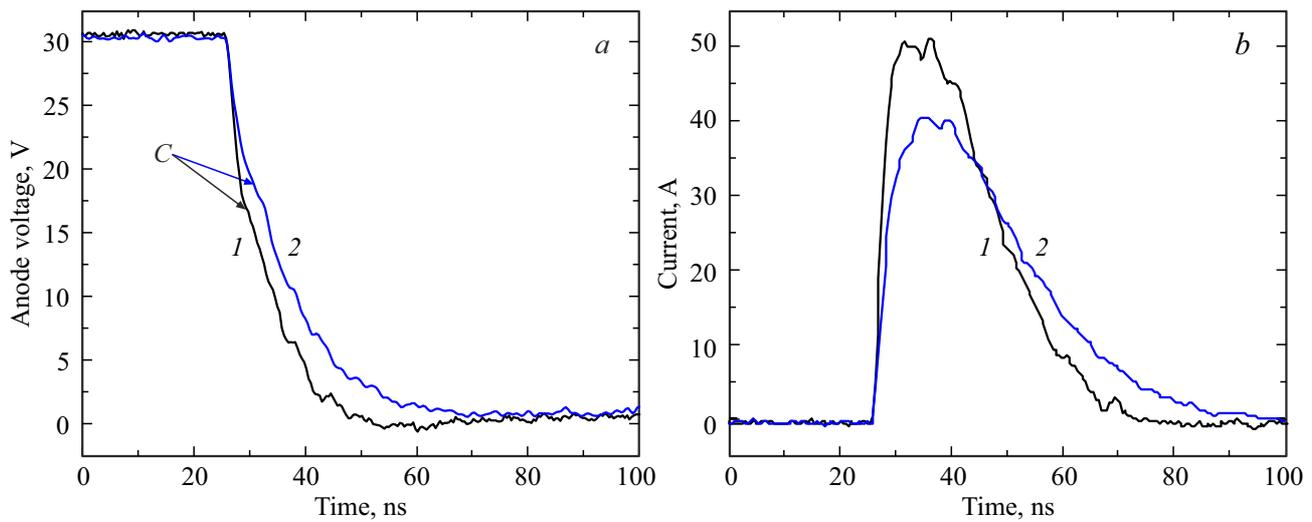


Рис. 3. Временные зависимости анодного напряжения (а) и тока (б) динисторов с $U_{BO} = 30$ В: 1 — первого типа, 2 — второго типа.

Таблица 2. Динамические параметры напряжения и тока, полученные для GaAs-динисторов

Динамические параметры	Динисторы с $U_{BO} = 30$ В		Динисторы с $U_{BO} = 26$ В	
	тип 1	тип 2	тип 1	тип 2
Время спада напряжения, нс	14	21	16	29
Амплитуда импульса тока, А	51	41	40	29
Длительность импульса, нс	21	26	23	34
Время нарастания фронта, нс	3	5	6	10
Скорость нарастания тока, А/нс	13.7	6.1	5.5	2.3

значения) для структуры 1 типа вдвое выше, чем для структуры 2 типа (13.7 и 6.1 А/нс соответственно). Последний параметр очень важен для генерации коротких импульсов тока с резким фронтом. Однако здесь следует отметить, что скорость нарастания тока будет сильно зависеть от характера нагрузки коммутатора.

Включение тиристорных осуществляется за счет накопления в базовых областях неравновесных носителей заряда (ННЗ), необходимых для компенсации объемного заряда, сформированного ионами акцепторной и донорной примесей коллекторного (центрального) $p-n$ -перехода. Известно, что в динисторах могут реализоваться два основных механизма накопления неравновесных носителей заряда в базах. Первый механизм заключается в генерации электронно-дырочных пар за счет ударной ионизации в электрическом поле обратносмещенного коллекторного $p-n$ -перехода, образованного базовыми областями p - и n -типа. Второй механизм заключается в инжекции дырок из p -эмиттера в n -базу, диффузии их в область электрического поля коллекторного $p-n$ -перехода и дрейфа в p -базу. Аналогичным образом происходят диффузия и дрейф электронов из n -эмиттера в n -базу через базовую область p -типа. При одновременном наличии двух описанных механизмов динамика включения будет в первую очередь определяться более быстрым процессом ударной ионизации [11].

Анализируя осциллограммы (рис. 3), можно заметить, что на начальном этапе включения (до ~ 1 нс с момента начала нарастания тока/спада напряжения) динамика изменения анодного напряжения и тока для динисторов двух типов одинакова, но затем процесс включения структуры 2 типа несколько замедляется относительно структуры 1 типа. Это может быть связано с тем, что на начальном этапе включения в динисторах обоих типов реализуется механизм накопления неравновесных носителей заряда в базовых областях за счет ударной ионизации. Однако при увеличении концентрации ННЗ в n - и p -базах происходит частичная компенсация объемного заряда ионизированной примеси, что приводит к перераспределению электрического поля, а именно к снижению максимальной напряженности и уменьшению ее градиента [11]. Такое перераспределение электрического поля приведет к снижению скорости ударной ионизации и, как следствие, к замедлению включения динисторов. В этот момент времени на осциллограмме анодного напряжения наблюдается небольшой излом (рис. 3, а, точка С) и уменьшение скорости спада напряжения. В дальнейшем вклад дрейф-диффузионного механизма накопления неравновесных носителей заряда в базовых областях будет иметь большее влияние на динамику включения, чем на начальном этапе. Эффективность

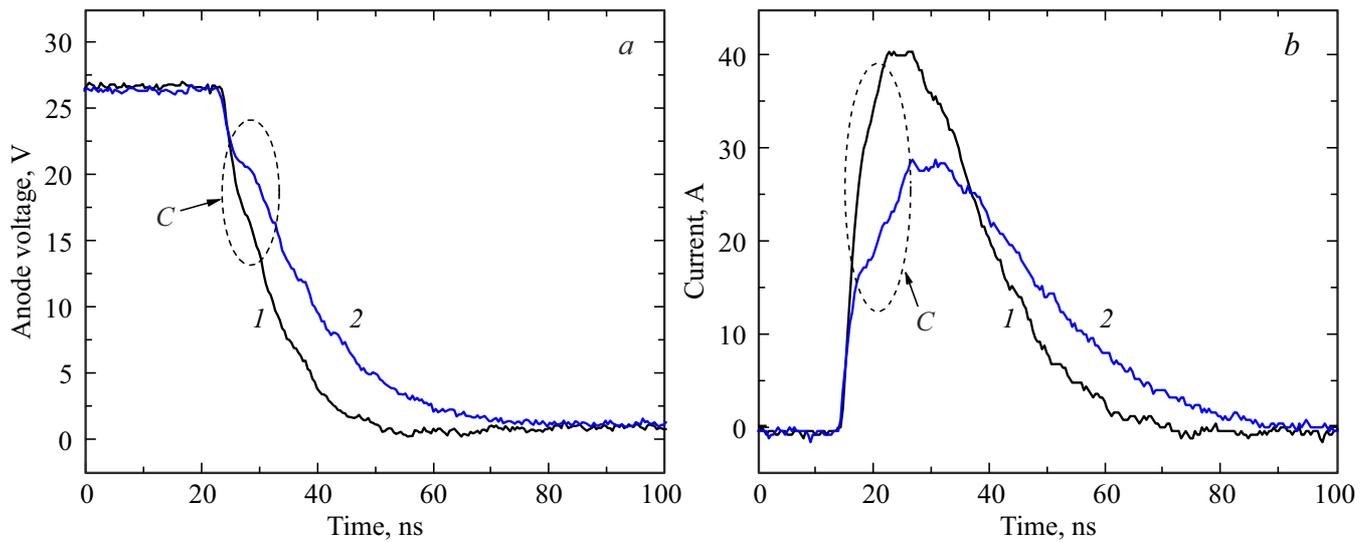


Рис. 4. Временные зависимости анодного напряжения (а) и тока (б) динисторов с $U_{BO} = 26$ В: 1 — первого типа, 2 — второго типа.

данного механизма будет определяться коэффициентами передачи эмиттерных токов, зависящих от коэффициентов инжекции, которые в свою очередь обусловлены отношениями уровней легирования эмиттеров к базам [14]. У динисторов 1 типа уровень легирования эмиттерных областей в 5 раз выше, чем у динисторов 2 типа, при одинаковом уровне легирования базовых областей. Благодаря этому коэффициент передачи эмиттерного тока в структуре 1 типа больше и, как следствие, выше скорость включения в момент снижения интенсивности ударной ионизации.

Исследование динамики включения динисторов аналогичных конструкций, имеющих напряжение переключения $U_{BO} = 26$ В, показало (рис. 4), что структура 1 типа переключается в открытое состояние почти в 2 раза быстрее, чем структура 2 типа (16 и 29 нс соответственно). Динамические параметры импульсов тока, полученных с помощью таких динисторов, приведены в табл. 2. Видно, что для динисторов обоих типов с понижением напряжения переключения (с 30 до 26 В) наблюдается замедление процесса включения и, как следствие, ухудшение динамических параметров токовых импульсов. Это связано с уменьшением скорости ударной ионизации в базовых областях из-за снижения максимальной напряженности электрического поля. Стоит отметить, что на осциллограммах анодного напряжения и тока образцов с $U_{BO} = 26$ В наблюдаются более выраженные области с замедлением динамики спада напряжения и нарастания тока (рис. 4, области C), чем для образцов с $U_{BO} = 30$ В (рис. 3). Это объясняется тем, что эффект замедления процесса включения, связанный со снижением скорости ударной ионизации из-за перераспределения электрического поля в базовых областях, будет сильнее выражен при меньших напряжениях переключения [11].

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследовано влияние уровня легирования *n*- и *p*-эмиттеров на динамику включения низковольтных GaAs-динисторов с полосковой геометрией мез. Показано, что для динисторов с напряжением переключения 30 В повышение уровня легирования эмиттерных областей в 5 раз приводит к уменьшению времени перехода в открытое состояние на 30% (с 21 до 14 нс). При этом изменяются параметры генерируемых импульсов тока наносекундного диапазона: амплитуда возрастает от 41 до 51 А, время нарастания фронта уменьшается с 5 до 3 нс и, как следствие, более чем в 2 раза повышается скорость нарастания тока от 6.1 до 13.7 А/нс.

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] S. Vainshtein, I. Prudaev, G. Duan, T. Rahkonen. *Solid State Commun.*, **365** (7), 115111 (2023).
- [2] J. Glaser. *IEEE Power Electron. Mag.*, **4** (1), 25 (2017).
- [3] S. Vainshtein, G. Duan, G.T. Rahkonen, Z. Taylor, V. Zemlyakov, V. Egorin, O. Smolyanskaya, T. Skotnicki, W. Knap. *Results Phys.*, **19**, 103509 (2020).

- [4] S.N. Vainshtein, A. Kilpela, J. Kostamovaara, R. Myllyla, S. Starobinets, Ju. Zhilyaev. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **41** (8), 1444 (1994).
- [5] S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara, M.M. Kulagina, H.T. Moilanen. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **57** (4), 733 (2010).
- [6] N. Ammouri, H. Christopher, J. Fricke, A. Ginolas, A. Liero, A. Maaßdorf, H. Wenzel, A. Knigge. *Electron. Lett.*, **59** (1), e12680 (2023).
- [7] A. Liero, A. Klehr, T. Hoffmann, T. Prziwarka, W. Heinrich. *Proc. 46th Eur. Microw. Conf. (EuMC)* (London, UK, Oct. 2016) p. 1389.
- [8] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, В.А. Крючков, А.Э. Ризаев, М.И. Кондратов, А.Е. Гришин, Н.А. Пихтин, Т.А. Багаев, В.Н. Светогоров, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков. *Письма ЖТФ*, **50** (4), 43 (2024).
- [9] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.V. Zolotarev, L.S. Vavilova, A.Yu. Leshko, M.G. Rastegaeva, I.V. Miroshnikov, I.S. Shashkin, N.A. Pikhitin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *Phys. Inst.*, **50** (5), S527 (2023).
- [10] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, В.А. Крючков, А.Э. Ризаев, М.И. Кондратов, А.Е. Гришин, Н.А. Пихтин, Т.А. Багаев, В.Н. Светогоров, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков. *ФТП*, **57** (8), 678 (2023).
- [11] О.С. Соболева. Канд. дис. (СПб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2022).
- [12] А. Блихер. *Физика тиристоров* (Л., Энергоиздат, 1981) гл. 5, с. 57. [Пер. с англ.: A. Blicher. *Thyristor physics* (N.Y.–Heidelberg–Berlin, Springer Verlag, 1976)].
- [13] С.О. Слипченко, О.С. Соболева, А.А. Подоскин, Ю.К. Кириченко, Т.А. Багаев, И.В. Яроцкая, Н.А. Пихтин. *ФТП*, **57** (4), 295 (2023).
- [14] В.А. Гуртов. *Твердотельная электроника: Учеб. пособие*, 2-е изд., перераб. и доп. (М., 2005).

Редактор Г.А. Оганесян

Influence of emitter region doping level on the turn-on dynamics of low-voltage GaAs dynistors

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

Nizhny Novgorod State University,
603022 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract A GaAs dynistors with mesa-strip has been fabricated and experimentally studied. It is shown that increasing the doping level of *n*- and *p*-emitters leads to a decrease in the turn-on time of GaAs dynistors and to an increase in their operation efficiency when generating nanosecond current pulses, namely to an increase in the amplitude and rate of rise of current and to a decrease in the rise time of the front.