

07.2

Низковольтные гетеротиристоры InP для генерации импульсов тока длительностью 50–150 ns

© С.О. Слипченко¹, А.А. Подоскин¹, П.С. Гаврина¹, Ю.К. Кириченко¹, Н.В. Шувалова¹, Н.А. Рудова¹, В.А. Капитонов¹, А.Ю. Лешко¹, И.В. Шушканов¹, В.В. Золотарев¹, В.А. Крючков¹, Н.А. Пихтин¹, Т.А. Багаев¹, И.В. Яроцкая¹, В.Н. Светогоров², Ю.Л. Рябоштан², М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк², В.А. Симаков²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² АО „НИИ „Полус“ им. М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия

E-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 8 июня 2023 г.

Принято к публикации 12 июня 2023 г.

Разработаны и исследованы токовые ключи на основе низковольтных InP-гетеротиристоров с максимальным блокирующим напряжением 20 V. В режиме генерации импульсов тока продемонстрирована эффективная работа InP-гетеротиристоров с низкоомной нагрузкой в виде конденсатора. Показано, что минимальное время задержки включения составляет 6 ns при амплитуде тока управления 60 mA. Продemonстрирована возможность генерации импульсов тока длительностью 53–154 ns и амплитуд 38–130 A при изменении номиналов конденсаторов в диапазоне 56–1000 nF.

Ключевые слова: тиристор, токовый ключ.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.16.55965.19602

В настоящее время активно развиваются подходы, направленные на создание компактных и эффективных источников мощных лазерных импульсов длительностью от единиц до сотен наносекунд [1–3]. Подобные источники реализуются на основе кристаллов мощных полупроводниковых лазеров и сильноточного импульсного ключа, роль которого, как правило, играют полевые транзисторы. Для минимизации паразитных связей и низких рабочих напряжений лазерный диод и сильноточный ключ должны быть размещены в непосредственной близости друг от друга, что дополнительно усложняет технологию сборки. В предельном (идеальном) случае данные дискретные компоненты должны иметь интегральное исполнение. Подобная возможность была реализована в структурах низковольтных лазер-тиристоров, например, в [4]. Были продемонстрированы возможности создания мощных импульсных источников для спектрального диапазона в районе 900 nm, реализованные на основе многопереходных гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs. Однако данные интегральные структуры лазер-тиристоров имеют спектральный диапазон, который ограничен в длинноволновой части возможностями создания качественной активной области в системе GaAs–InGaAs [5,6]. Для спектрального диапазона 1550 nm была реализована тиристорная структура, в которой получена характерная бистабильная вольт-амперная характеристика [7]. Однако в предложенной конструкции не было реализовано управляемое включение (прибор открывался только перенапряжением), а также не были исследованы динамические характеристики. Кроме того, величина блокируемого напря-

жения была критически мала для реализации мощных импульсных излучателей. По этим причинам актуальна задача разработки низковольтных тиристорных структур в других системах твердых растворов, в частности в системе InGaAsP/AlInAs/InP, которая позволяет создавать высокоэффективные мощные полупроводниковые лазеры для спектрального диапазона 1300–1900 nm [8,9].

В рамках настоящей работы впервые создана и исследована гетероструктура низковольтного гетеротиристора на основе InP, в которой реализована возможность генерации импульсов тока в диапазоне от нескольких десятков до сотен наносекунд, что в дальнейшем будет использоваться как основа для создания мощных импульсных лазер-тиристоров в спектральном диапазоне 1300–1900 nm.

Как было показано ранее, дизайн гетероструктуры низковольтного лазер-тиристора может быть представлен в виде оптопары светодиод/ $n-p-n$ -фототранзистор. Для гетероструктур лазер-тиристоров AlGaAs/GaAs данное приближение было обосновано подавленной сквозной инжекцией дырок при работе гетеробарьеров в волноводном слое. Тогда избыточные дырки в p -базе $n-p-n$ -фототранзистора поставляются в результате ударной ионизации в домене поля коллекторного $p-n$ -перехода и фотогенерации в p -базе за счет поглощения части спонтанного излучения активной области. Однако в общем случае в зависимости от режима работы светодиода при высокой пороговой концентрации утечка дырок может иметь место, что открывает дополнительный канал поставки избыточных дырок в p -базу. Таким образом, положительная обратная

связь гетеротиристора во включенном состоянии может быть обеспечена тремя механизмами: фотогенерацией, ударной ионизацией и утечкой дырок. Исследования показали, что для эффективной работы на низких напряжениях в импульсном режиме наиболее подходящей является конструкция $n-p-n$ -транзисторной части, в которой область объемного заряда сформирована в слое низколегированной p -базы. Это позволяет сохранить неизменным положение максимума домена электрического поля коллекторного $p-n$ -перехода при переходе из закрытого в открытое состояние. На основании проведенного анализа был выбран дизайн гетероструктуры InP-гетеротиристора, который включает светодиодную часть на основе эмиттеров n - и p -AlInAs, волноводный слой с активной областью на основе AlInGaAs и часть гомотранзистора с эмиттером n -InP, базой p -InP толщиной $4\ \mu\text{m}$ и коллектором n -InP, граничащим со светодиодной частью. Разработанный дизайн гетероструктуры был выращен методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОС-гидридной эпитаксии). Далее с использованием последовательности построительных операций были сформированы полосковый анодный контакт шириной $200\ \mu\text{m}$ со стороны эмиттера p -AlInAs светодиодной части, который с обеих сторон был ограничен полосковыми контактами электрода управления, сформированными в слое коллектора n -InP гомотранзисторной части, и сплошной катодный контакт, который был создан со стороны подложки n -InP. Далее на основе структуры изготавливались кристаллы гетеротиристоров различной длины, которые монтировались с помощью индиевого припоя на медные теплоотводы.

На первом этапе были исследованы статические характеристики. Исследования вольт-амперных зависимостей в статическом режиме показали, что максимальное блокирующее напряжение достигает $20\ \text{V}$, при этом остаточное напряжение в открытом состоянии не превышает $1.4\ \text{V}$, что является минимальным значением для подобной структуры и свидетельствует об эффективной обратной связи, поддерживающей тиристор в открытом состоянии. Для исследования динамических характеристик кристаллы гетеротиристоров монтировались в простейшую схему. Используемая схема содержала конденсатор, включенный параллельно гетеротиристор, источник питания для зарядки конденсатора до требуемого напряжения, когда гетеротиристор находится в закрытом состоянии, а также генератор, обеспечивающий накачку импульсами тока управления светодиодной части через электрод управления. В схеме не использовались дополнительные нагрузочные резисторы, чтобы не ограничивать возможности разработанного низковольтного гетеротиристора. Анализ динамики гетеротиристора как токового ключа проводился на основании результатов измерения динамики напряжения разряжающегося конденсатора. Для измерения динамики разряда конденсатора использовался быстродействующий высокочастотный электрический щуп (полоса частот $1\ \text{GHz}$), который подключался к осциллографу с полосой частот $1\ \text{GHz}$. В об-

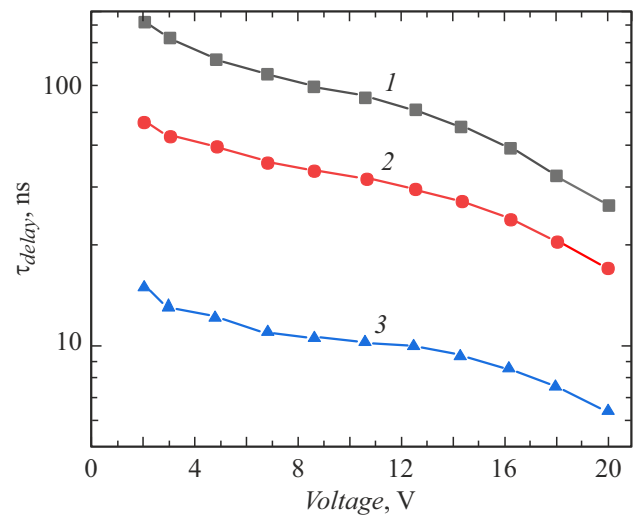


Рис. 1. Зависимости задержек включения от напряжения питания при амплитудах импульсов токов управления, равных 18 (1), 34 (2) и 60 мА (3). Номинал разрядной емкости 56 нФ.

щем случае динамика включения гетеротиристора имеет характерное время задержки включения, которое определяется как время от начала импульса тока управления до начала процесса необратимого разряда конденсатора. Величина задержки включения может изменяться в диапазоне от единиц наносекунд до миллисекунд и зависит от условий работы прибора: амплитуда и длительность тока управления, блокирующее напряжение. Вместе с этим можно определить энергетическую эффективность управления [10], которая определяется энергией импульса управления и также зависит от указанных выше параметров. Кроме того, время задержки включения является критически важной величиной при генерации высокочастотных последовательностей импульсов. По этой причине был проведен экспериментальный анализ типичных времен задержки включения разработанных конструкций. На рис. 1 показаны характерные зависимости времени задержки включения на примере кристалла гетеротиристора длиной $700\ \mu\text{m}$ и номинала конденсатора 56 нФ. Видно, что время задержки включения снижается с ростом блокирующего напряжения и увеличением амплитуды тока накачки. При этом минимальная задержка достигает 6 нс для амплитуды тока управления 60 мА и блокирующего напряжения 20 В. Также видно, что снижение амплитуды тока управления ведет к расширению диапазона изменения времени задержки включения. Например, при амплитуде тока управления 18 мА изменение блокирующего напряжения от 2 до 20 В сопровождается снижением времени задержки включения с 93 до 26 нс.

Другая важная характеристика тиристорной гетероструктуры — скорость работы прибора. В рамках данного исследования генерация импульсов тока происходила в результате разряда конденсатора, включенного параллельно гетеротиристор. Рассматриваемая схема

является простейшей и предусматривает только управляемый переход гетеротиристора во включенное состояние за счет импульса тока управления. Гетеротиристор во включенном состоянии характеризуется малым сопротивлением, что позволяет реализовать эффективный разряд емкости. Выключение гетеротиристора происходит в момент, когда ток в цепи становится меньше тока удержания. В результате длительность импульса определяется номиналом используемого конденсатора и свойствами тиристора как быстрого токового ключа. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости, характеризующие изменение напряжения на конденсаторе при переходе гетеротиристора в открытое состояние. При регистрации данных зависимостей тиристор и конденсатор не отключались от источника питания, так как в режиме одиночных импульсов подобное отключение не приводило к изменению регистрируемых характеристик. Дополнительно длительность импульса тока оценивалась исходя из формы импульса оптического сигнала светодиодной части как ширина на уровне 20% от максимума (рис. 2). Для регистрации оптического сигнала использовалась схема на основе линз с числовой апертурой 0.5, позволяющих эффективно собирать спонтанное излучение на площадке фотоприемника. В эксперименте использовался фотоприемник с приемной площадкой диаметром $300 \mu\text{m}$ и частотной полосой более 1 GHz; спектральная чувствительность на длине волны 1550 nm составляла 0.8 A/W. Как и следовало ожидать, увеличение емкости позволяет увеличить время разряда, а значит, и длительность импульса тока в цепи гетеротиристора. В проведенных экспериментах достигаемые длительности импульсов тока составили 53, 76 и 154 ns для номиналов конденсаторов 56, 220 и 1000 nF соответственно.

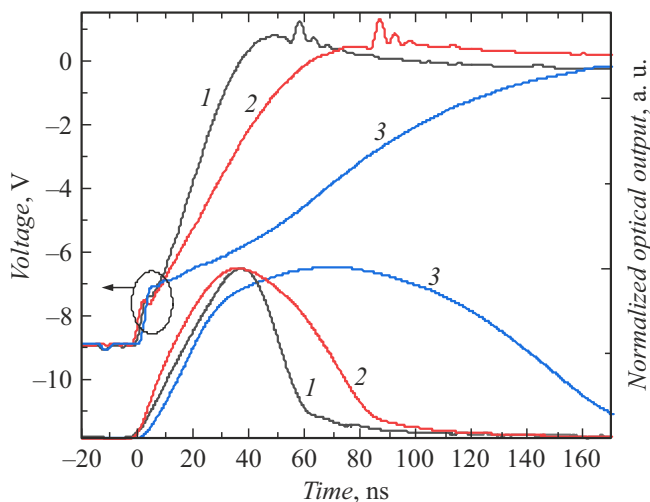


Рис. 2. Зависимости измеряемого напряжения на конденсаторе и нормированных оптических импульсов от времени при амплитуде тока управления 60 мА для значений разрядной емкости 56 (1), 220 (2) и 1000 нФ (3).

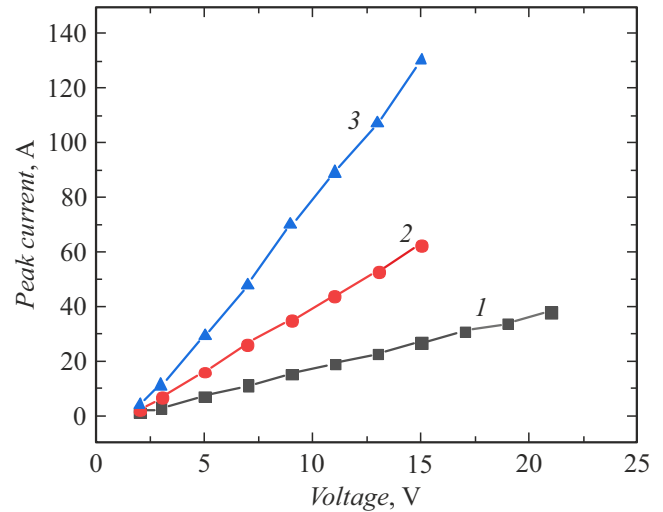


Рис. 3. Зависимости пикового тока, генерируемого гетеротиристором, от блокирующего напряжения для значений разрядной емкости 56 (1), 220 (2) и 1000 нФ (3).

Практически значимым параметром является амплитуда импульса тока, генерируемого в цепи гетеротиристора. На рис. 3 показаны зависимости пикового тока от блокирующего напряжения, полученные при расчете на основании экспериментальных зависимостей динамики напряжения разряда и номиналов используемых конденсаторов. Оценка пикового тока получена путем дифференцирования зависимостей напряжения в области напряжений от -3 до -4 В (рис. 2) с учетом номинала емкости C по соотношению $I = CdU/dt$. Достижимые пиковые токи составляют 38, 62, 130 А для номиналов емкостей 56, 220 и 1000 нФ соответственно. Видно, что зависимости величины пикового тока от блокирующего напряжения линейны, наклон составляет 2, 4.6 и 9.7 А/В для номиналов емкостей 56, 220 и 1000 нФ соответственно. При этом увеличение наклона зависимости с ростом номинала конденсатора имеет сублинейный характер, что обусловлено увеличением длительности импульса. Достижимые пиковые токи сопоставимы с амплитудами токов накачки, при которых сохраняется эффективный прирост оптической мощности полупроводниковых лазеров, излучающих на длине волны 1500 nm, при их накачке внешним генератором [11,12]. Это позволит в дальнейшем использовать полученные результаты как для разработки структур мощных импульсных лазер-тиристоров на длину волны 1500 nm, так и для создания гибридных сборок с полупроводниковыми лазерами для реализации импульсной накачки.

Финансирование работы

Авторы благодарят Российский научный фонд за финансовую поддержку при проведении исследований (проект № 22-79-10159).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Т.А. Багаев, Н.В. Гультиков, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, Ю.В. Курнявко, В.В. Кричевский, А.М. Морозюк, В.П. Коняев, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Н.А. Пихтин, А.Е. Казакова, Д.Н. Романович, В.А. Крючков, Квантовая электроника, **51** (10), 912 (2021). [Т.А. Bagaev, N.V. Gul'tikov, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, Y.V. Kurnyavko, V.V. Krichevskii, A.A. Morozuk, V.P. Konyaev, V.A. Simakov, S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, N.A. Pikhtin, A.E. Kazakova, D.N. Romanovich, V.A. Kryuchkov, Quantum Electron., **51** (10), 912 (2021). DOI: 10.1070/QEL17634].
- [2] A. Klehr, A. Liero, H. Christopher, H. Wenzel, A. Maaßdorf, P. Della Casa, J. Fricke, A. Ginolas, A. Knigge, Semicond. Sci. Technol., **35** (6), 065016 (2020). DOI: 10.1088/1361-6641/ab8397
- [3] S. Aboujja, D. Chu, D. Bean, SPIE, **11983**, 119830P (2022). DOI: 10.1117/12.2608223
- [4] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, D.A. Veselov, V.V. Zolotarev, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, I.S. Tarasov, IEEE Trans. Electron Dev., **63** (8), 3154 (2016). DOI: 10.1109/TED.2016.2582700
- [5] L.J. Mawst, H. Kim, G. Smith, W. Sun, N. Tansu, Prog. Quant. Electron., **75**, 100303 (2021). DOI: 10.1016/j.pquantelec.2020.100303
- [6] F. Bugge, U. Zeimer, S. Gramlich, I. Rechenberg, J. Sebastian, G. Erbert, M. Weyers, J. Cryst. Growth, **221** (1-4), 496 (2000). DOI: 10.1016/S0022-0248(00)00751-X
- [7] D.G. Kim, J.J. Lee, Y.W. Choi, S. Lee, B.K. Kang, S.H. Kim, N. Futakuchi, Y. Nakano, IEEE Photon. Technol. Lett., **12** (9), 1219 (2000). DOI: 10.1109/68.874241
- [8] В.Н. Светогоров, Ю.Л. Рябоштан, Н.А. Волков, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, А.А. Мармалюк, К.В. Бахвалов, Д.А. Веселов, А.В. Лютецкий, В.А. Стрелец, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, Квантовая электроника, **51** (10), 909 (2021). [V.N. Svetogorov, Yu.L. Ryaboshtan, N.A. Volkov, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, K.V. Bakhvalov, D.A. Veselov, A.V. Lyutetskii, V.A. Strelets, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, Quantum Electron., **51** (10), 909 (2021). DOI: 10.1070/QEL17635].
- [9] Н.А. Волков, В.Н. Светогоров, Ю.Л. Рябоштан, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, А.А. Мармалюк, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин, Квантовая электроника, **51** (4), 283 (2021). [N.A. Volkov, V.N. Svetogorov, Yu.L. Ryaboshtan, A.Yu. Andreev, I.V. Yarotskaya, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, D.A. Veselov, N.A. Pikhtin, Quantum Electron., **51** (4), 283 (2021). DOI: 10.1070/QEL17540].
- [10] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, В.В. Васильева, Н.А. Пихтин, А.В. Рожков, А.В. Горбатюк, В.В. Золотарев, Д.А. Веселов, А.В. Жаботинский, А.А. Петухов, И.С. Тарасов, Т.А. Багаев, М.В. Зверков, В.П. Коняев, Ю.В. Курнявко, М.А. Ладугин, А.В. Лобинцов, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, В.А. Симаков, ФТП, **48** (5), 716 (2014). [S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.V. Vasil'eva, N.A. Pikhtin, A.V. Rozhkov, A.V. Gorbatyuk, V.V. Zolotarev, D.A. Veselov, A.V. Jabotinskii, A.A. Petukhov, I.S. Tarasov, T.A. Bagaev, M.V. Zverkov, V.P. Konyaev, Yu.V. Kurnyavko, M.A. Ladugin, A.V. Lobintsov, A.A. Marmalyuk, A.A. Padalitsa, V.A. Simakov, Semiconductors, **48** (5), 697 (2014). DOI: 10.1134/S1063782614050224].
- [11] Н.А. Волков, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, Ю.Л. Рябоштан, В.Н. Светогоров, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, А.А. Мармалюк, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин, Квантовая электроника, **51** (2), 133 (2021). [N.A. Volkov, A.Yu. Andreev, I.V. Yarotskaya, Yu.L. Ryaboshtan, V.N. Svetogorov, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, D.A. Veselov, N.A. Pikhtin, Quant. Electronics, **51** (2), 133 (2021). DOI: 10.1070/QEL17480].
- [12] Ю.К. Бобрецова, Д.А. Веселов, Н.В. Воронкова, С.О. Слипченко, В.А. Стрелец, М.В. Богданович, П.В. Шпак, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, Н.А. Пихтин, Квантовая электроника, **49** (5), 488 (2019). [Yu.K. Bobretsova, D.A. Veselov, N.V. Voronkova, S.O. Slipchenko, V.A. Strelets, M.V. Bogdanovich, P.V. Shpak, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, N.A. Pikhtin, Quantum Electron., **49** (5), 488 (2019). DOI: 10.1070/QEL16956].