

# Низковольтные токовые ключи на основе гетероструктур тиристоров Al-In-Ga-As-P/InP для импульсных лазерных излучателей (1.5 мкм) наносекундной длительности

© А.А. Подоскин<sup>1</sup>, И.В. Шушканов<sup>1</sup>, С.О. Слипченко<sup>1</sup>, Н.А. Пихтин<sup>1</sup>, Т.А. Багаев<sup>1,3</sup>, В.Н. Светогоров<sup>2</sup>, И.В. Яроцкая<sup>2</sup>, М.А. Ладугин<sup>2</sup>, А.А. Мармалюк<sup>2</sup>, В.А. Симаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Акционерное общество «Научно-исследовательский институт „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха», 117342 Москва, Россия

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов, 117198 Москва, Россия

E-mail: podoskin@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 25 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 3 мая 2024 г.

Принята к публикации 6 мая 2024 г.

Рассмотрены токовые ключи на основе InP/AlInGaAs/InGaAsP-гетероструктур тиристорного типа, предназначенные для создания импульсных лазерных излучателей наносекундных длительностей на длину волны 1400–1600 нм. Для образцов токовых ключей с размером анодного контакта  $200 \times 250$  мкм и двумя управляющими контактами  $200 \times 250$  мкм продемонстрированы возможности получения токовых импульсов длительностью 3–5 нс и амплитудой до 6–8 А при напряжении питания 16 В. Частота повторения импульсов достигала 100 кГц.

**Ключевые слова:** тиристор, токовый ключ, гетероструктура, лазерный излучатель.

DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58408.6404

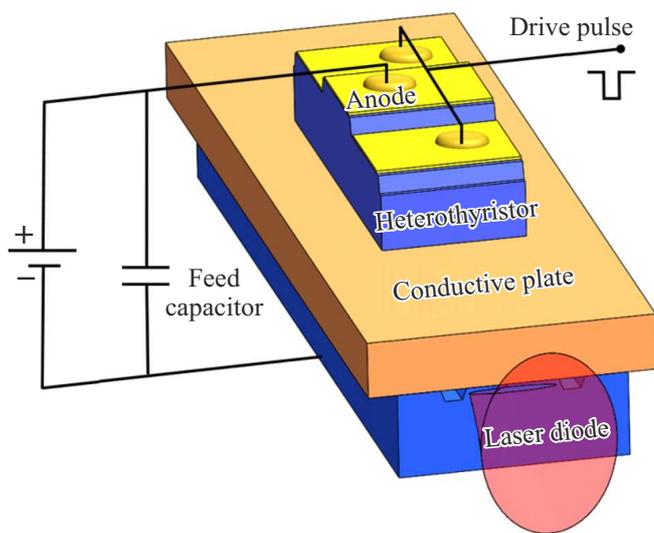
## 1. Введение

В настоящее время актуальным направлением практического применения импульсных полупроводниковых лазерных источников наносекундной и субнаносекундной длительности является создание лидарных систем для автономных транспортных средств на базе технологии время пролетного (time-of-flight — ToF) трехмерного сканирования (time-of-flight 3D range imaging) [1,2]. При создании ToF-лидара для применения в автомобильном транспорте одним из ключевых требований к источникам лазерных импульсов является безопасность излучения для зрения человека. Решением данной проблемы является использование источников излучения на длину волны  $\sim 1.5$  мкм [3]. Другой серьезной проблемой является сложность организации токовой накачки при требуемых длительностях импульса  $< 5$  нс. В частности, полупроводниковый лазер для источника токовых импульсов является низкоомной нагрузкой. В этом случае критически важным становится влияние паразитной индуктивности токового контура. Традиционный способ накачки от внешнего токового ключа (источника импульсов тока накачки) [4,5] имеет значительные ограничения. Ограничения обусловлены паразитными индуктивностями и сопротивлениями токового контура или требованиями к высокочастотной (ВЧ) линии доставки импульса тока накачки. Повышение напряжения импульса накачки в сочетании с увеличением сопротивления токового контура позволяет снизить негативный эффект

от паразитной индуктивности [6,7]. Другим перспективным путем преодоления данной проблемы является снижение размеров токового контура за счет использования вертикальной интеграции лазерных излучателей и токовых ключей (гибридная [6–10] и эпитаксиальная интеграция [11,12]). В данной работе исследуются динамические характеристики токовых ключей на основе InP-тиристоров, а также гибридные вертикальные сборки на основе лазерного диода и токового ключа, предназначенные для создания импульсных излучателей на длину волны 1400–1600 нм. Целями данной работы являются: (1) исследование возможности создания излучателей с наносекундной длительностью оптического импульса на основе гибридных вертикальныхборок для спектрального диапазона 1400–1600 нм, (2) демонстрация перспективной возможности создания эпитаксиально-интегрированных импульсных излучателей на основе лазер-тиристорной гетероструктуры с излучающей частью на длину волны в диапазоне 1400–1600 нм.

## 2. Экспериментальные образцы и схема измерений

Принципиальная схема гибридной вертикальной сборки, рассматриваемой в данной работе, представлена на рис. 1. Токовый ключ изготавливался на основе тиристорной гетероструктуры, выращенной методом (Metal organic chemical) МОС-гибридной эпитаксии. Гетероструктура ключа была аналогична конструкции из [13]



**Рис. 1.** Схематическое изображение электрической схемы подключения образца вертикальной сборки токового ключа и лазерного диода. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

и включала в себя транзисторную часть и верхний InP/AlInGaAs/InGaAsP-гетеродиод. Транзисторная часть включала в себя легированную цинком до  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  *p*-InP-базу толщиной 3 мкм и легированный кремнием до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  *n*-InP-коллектор толщиной 1.3 мкм. В качестве *n*-эмиттера выступал легированный кремнием до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  *n*-InP-слой, расположенный со стороны подложки. На транзисторную часть дорастивался гетеродиод, имитирующий лазерную гетероструктуру на длину волны в диапазоне 1400–1600 нм. Гетеродиод имитировал энергетические барьеры лазерной гетероструктуры на диапазон длин волн 1400–1600 нм, которые препятствуют сквозному протеканию дырок от анодного контакта в область коллекторного *p*–*n*-перехода нижней транзисторной части гетероструктуры токового ключа. Это обеспечивалось за счет использования в структуре гетеродиода широкозонных эмиттеров *n*-InP и *p*-InP, а также узкозонного волновода на основе AlInGaAs толщиной 0.4 мкм. Из предложенной гетероструктуры были изготовлены образцы токовых ключей мезаполосковой конструкции с шириной анодного контакта 200 мкм и двумя боковыми управляющими контактами шириной по 200 мкм каждый. Катодный контакт нанесли сплошным слоем со стороны подложки, утонченной до 150 мкм. Методом раскалывания изготавливались чипы токовых ключей с общим размером  $250 \times 650$  мкм при размере анода  $250 \times 200$  мкм. Максимальное статическое напряжение блокировки коллекторного *p*–*n*-перехода токового ключа достигало 18 В. В работе исследовались экспериментальные образцы двух типов. Первый тип образцов (рис. 1) был в виде вертикальной гибридной сборки чипа токового ключа и чипа лазерного диода полосковой конструкции на длину

волны 1550 нм с шириной апертуры 100 мкм. Вторым тип образцов представлял собой только чип токового ключа, питаемый катодной стороной непосредственно на медный теплоотвод.

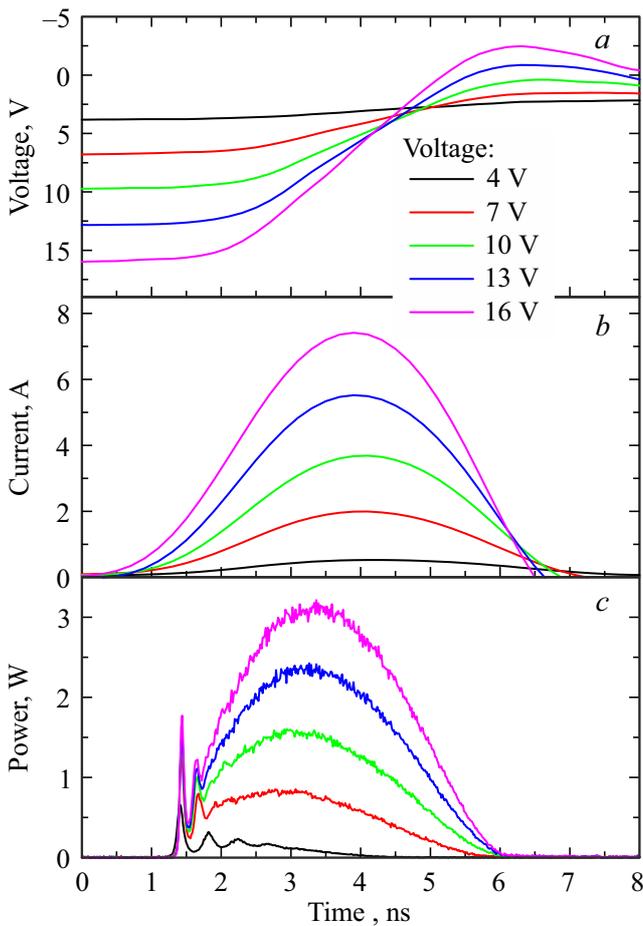
### 3. Методика и результаты измерений

Динамика включения образцов тиристорных токовых ключей исследовалась с помощью высокоомного быстродействующего измерительного щупа с частотной полосой 500 МГц. Порядок работы электрической схемы был следующий: (1) на образец подавалось постоянное напряжение питания, при этом происходила зарядка питающего конденсатора до требуемого статического напряжения (рис. 1); (2) после этого на контакт управления от генератора подавался управляющий импульс (амплитуда импульса тока управления составляла 50 мА), типичная величина задержки включения составляла 25–15 нс для напряжений 4–16 В и была аналогична результатам, полученным ранее [13]. Импульс тока управления позволял перевести тиристорный ключ в открытое состояние с низким сопротивлением, что обеспечивало эффективную разрядку питающего конденсатора. Оценка формы и амплитуды импульса тока, генерируемого в цепи лазертиристорный ключ проводилась с использованием двух способов. Для первого способа параметры генерируемого импульса тока оценивались с помощью импульса оптической мощности, получаемого лазерным диодом, смонтированным последовательно с токовым ключом. В работе использовался Фабри-Перо полупроводниковый лазер на длину волны 1.47 мкм с шириной излучающей апертуры 100 мкм. Собиралась вертикальная гибридная конструкция из токового ключа и лазерного диода для сокращения размеров токового контура и уменьшения паразитных сопротивлений и индуктивностей (рис. 1). В рамках второго способа амплитуда тока в контуре рассчитывалась на основе временных зависимостей динамики напряжения на разрядном конденсаторе из соотношения  $I = C \cdot dU/dt$ , где  $C$  — номинал питающего конденсатора,  $U$  — напряжение на питающем конденсаторе, полученное с помощью быстродействующего измерительного щупа. На первом этапе исследований рассмотрена динамика напряжения, тока и оптической мощности в гибридных сборках с номиналом питающего конденсатора 1.4 нФ. Из представленных зависимостей (рис. 2) видно хорошее совпадение расчетной формы импульса тока и измеренной формы оптического импульса.

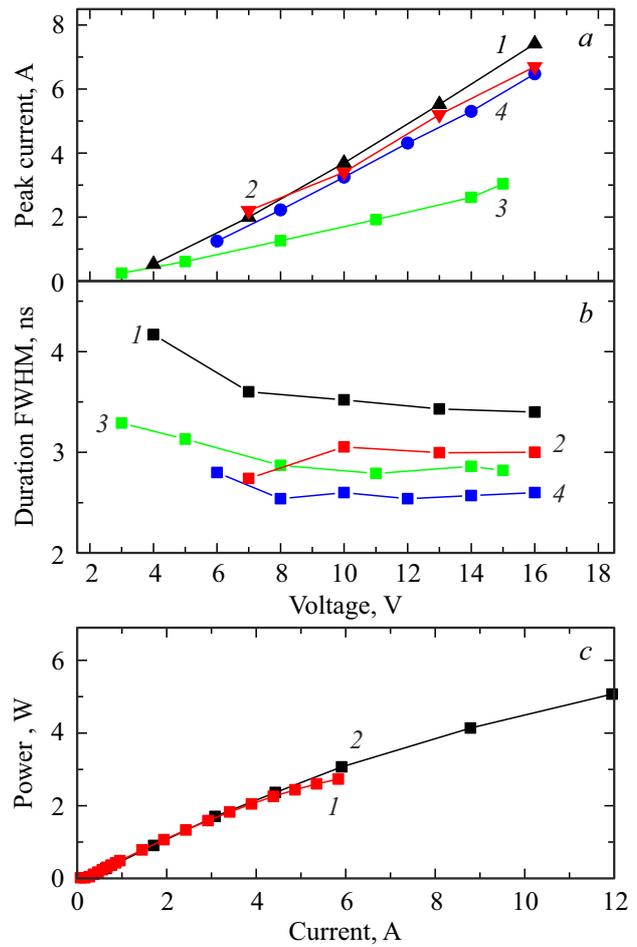
Для напряжения питания 16 В расчетная амплитуда импульсов тока достигала 6.8 А, длительности оптического и токового импульсов составляли 3.2 и 3.5 нс на полувысоте (разница обусловлена наличием порога лазерной генерации).

Далее из амплитуды регистрируемых оптических импульсов были сделаны оценки амплитуд импульсов тока в разрядном контуре исследуемого токового ключа

(рис. 3, *a*, зависимости *I*, 2). Для этого использовались ватт-амперные характеристики, измеренные отдельно для аналогичных лазерных диодов, накачиваемых внешними источниками тока, как в импульсном режиме с длительностью 100 нс, так и непрерывном режиме (рис. 3, *c*) [14]. Оценки амплитуд тока в разрядном контуре, полученные двумя способами, имеют хорошее совпадение (рис. 3, *b*, зависимости *I* и 2). Зависимости амплитуды от напряжения имеют линейный характер. Таким образом, динамика напряжения на питающем конденсаторе может быть использована для оценки работы тиристорного токового ключа. На втором этапе исследовалась возможность сократить длительность получаемого токового импульса, для чего исследовались образцы второго типа — токовые ключи с питающими конденсаторами 0.47 и 0.94 нФ. Амплитуды тока при напряжении питания 16 В достигали 3 А для 0.47 нФ и 6.2 А для 0.94 нФ, при этом длительности импульсов на полувысоте в диапазоне напряжений 8–16 В составляли около 2.8 и 2.6 нс соответственно. Таким



**Рис. 2.** Временные зависимости динамики: *a* — напряжения на питающем конденсаторе, *b* — расчетного тока в контуре, *c* — выходной оптической мощности лазерного излучателя (форма лазерного импульса регистрировалась фотодетектором с частотной полосой 20 ГГц).



**Рис. 3.** *a* — расчетная амплитуда импульса тока и *b* — длительность импульса тока на полувысоте для различных номиналов питающего конденсатора, нФ: 1 — 1.41, 2 — 1.41 (расчет по амплитуде импульса оптики), 3 — 0.47, 4 — 0.94. *c* — зависимости выходной оптической мощности от тока накачки, полученные отдельно для лазерных диодов, накачиваемых внешними источниками: 1 — непрерывный режим накачки, 2 — накачка импульсами длительностью 100 нс.

образом, использование меньшего номинала конденсатора позволило сократить длительность импульса тока до значений < 3 нс. Частота следования импульсов в проведенных экспериментах достигала 100 кГц.

#### 4. Заключение

Достигнутые максимальные амплитуды (6–8 А) и длительности импульса (< 3 нс) тока делают предложенные низковольтные (напряжение питания до 16 В) токовые ключи перспективными источниками импульсов токовой накачки для излучателей, применяемых в ТоF-лидарах, поскольку такие длительности позволяют существенно повысить пространственное разрешение подобных лидарных систем. В дальнейшем применение многоэлементных конструкций для гибридных вертикальных сбо-

рок позволит увеличивать амплитуду импульсов тока накачки и, следовательно, выходную оптическую мощность лазерного излучателя. Также следует отметить, что InP/InGaAsP-гетероструктура с InP транзисторной частью и верхним  $p-n$ -гетеропереходом, имитирующим лазерную гетероструктуру, перспективна для создания на ее основе эпитаксиально-интегрированных излучателей путем замены верхнего  $p-n$ -перехода на лазерную гетероструктуру. При этом, в отличие от GaAs/AlGaAs-тиристоров, доступный диапазон длин волн 1400–1600 нм удовлетворяет требованиям безопасности излучения, предъявляемым к современным излучателям ТоF-лидаров, применяемых в автомобильных системах автономного управления.

### Финансирование работы

Разработка, изготовление и исследования экспериментальных образцов выполнены в рамках проекта Российского научного фонда № 22-79-10159. Разработка постростовых операций выполнена в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] V. Molebny, P.F. McManamon, O. Steinvall, T. Kobayashi, W. Chen. *Opt. Eng.*, **56** (3), 031220 (2017). DOI: 10.1117/1.OE.56.3.031220
- [2] J. Rapp, J. Tachella, Y. Altmann, S. McLaughlin, V.K. Goyal. *IEEE Signal Proc. Mag.*, **37** (4), 62 (2020). DOI: 10.1109/MSP.2020.2983772
- [3] J.A. Curcio, C.C. Petty. *JOSA*, **41** (5), 302 (1951). DOI: 10.1364/JOSA.41.000302
- [4] J. Glaser. *IEEE Power Electron. Mag.*, **4** (1), 25 (2017). DOI: 10.1109/MPPEL.2016.2643099
- [5] A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, V.V. Shamakhov, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, A.A. Klimov, S.V. Zazulin, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin. *Quant. Electron.*, **53** (1), 1 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623170104
- [6] 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 Phot. Techn. Lett.*, **33** (1), 11 (2020). DOI: 10.1109/LPT.2020.3040026
- [7] S. Vainshtein, V. Zemlyakov, V. Egorkin, A. Maslevtsov, A. Filimonov. *IEEE Trans. Pover Electron.*, **34** (4), 3689 (2018). DOI: 10.1109/TPEL.2018.2853563
- [8] I. Prudaev, S. Vainshtein, Maksim G. Verkholetov, V. Oleinik, V. Kopyev. *IEEE Ttans. Electron. Dev.*, **68** (1), 57 (2020). DOI: 10.1109/TED.2020.3039213
- [9] A. Knigge, A. Klehr, H. Wenzel, A. Zeghuzi, J. Fricke, A. Maasßdorf, A. Liero, G. Tränkle. *Semicond. Sci. Technol.*, **35** (6), 065016 (2020). DOI: 10.1088/1361-6641/ab8397
- [10] N. Ammouri, H. Christopher, J. Fricke, A. Ginolas, A. Liero, A. Maasßdorf, H. Wenzel, A. Knigge. *Electron. Lett.*, **59** (1), 1 (2022). DOI: 10.22541/au.166520352.25121396/v1
- [11] S. Slipchenko, A. Podoskin, A.V. Rozhkov, N. Pikhtin, I. Tarasov, T. Bagaev, M. Ladugin, A. Marmalyuk, A. Padalitsa, V. Simakov. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **27** (3), 307 (2014). DOI: 10.1109/LPT.2014.2370064
- [12] T. Bagaev, M. Ladugin, A. Padalitsa, A. Marmalyuk, Y. Kurnyavko, A. Lobintsov, A.I. Danilov, S. Sapozhnikov, V.V. Kricheskii, M.V. Zverkov, V. Konyaev, V. Simakov, S. Slipchenko, A. Podoskin, N. Pikhtin. *Quant. Electron.*, **49** (11), 1001 (2020). DOI: 10.1070/qel17104
- [13] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, P.S. Gavrina, Yu.K. Kirichenko, N.V. Shuvalova, N.A. Rudova, V.A. Kapitonov, A.Yu. Leshko, I.V. Shushkanov, V.V. Zolotarev, V.A. Kryuchkov, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, I.V. Yarotskaya, V.N. Svetogorov, Yu.L. Ryaboshan, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *Techn. Phys. Lett.*, **49** (3), 231 (2023). DOI: 10.1134/S106378502390087X
- [14] L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mashanovitch. *Diode lasers and photonic integrated circuits* (Hoboken–N.J., John Wiley & Sons, 2012).

Редактор Г.А. Оганесян

### Low-voltage current switches based on AlInGaAsP/InP thyristor heterostructures for nanosecond pulsed laser emitters (1.5 $\mu\text{m}$ )

A.A. Podoskin<sup>1</sup>, I.V. Shushkanov<sup>1</sup>, S.O. Slipchenko<sup>1</sup>, N.A. Pikhtin<sup>1</sup>, T.A. Bagaev<sup>1,3</sup>, V.N. Svetogorov<sup>2</sup>, I.V. Yarotskaya<sup>2</sup>, M.A. Ladugin<sup>2</sup>, A.A. Marmalyuk<sup>2</sup>, V.A. Simakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute, 194021 St.Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Open Joint-Stock Company Stelmakh Polyus Research Institute, 117342 Moscow, Russia

<sup>3</sup> RUDN University, 17198 Moscow, Russia

**Abstract** The study examines current switches based on InP thyristors designed for pulsed 1400–1600 nm laser emitters. The heterostructure of the switch includes an InP transistor section and an upper InP/AlInGaAs/InGaAsP heterodiode, simulating a laser heterostructure. For switch samples with an anode contact size of  $200 \times 250 \mu\text{m}$  and two control contacts of  $200 \times 250 \mu\text{m}$ , the ability to generate current pulses with durations of 3–5 ns and amplitudes exceeding 6–8 A at a supply voltage of 16 V was demonstrated. The pulse repetition frequency reached 100 kHz.