

Исследование пространственной динамики включения лазера-тиристора (905 нм) на основе многопереходной гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs

© А.А. Подоскин¹, П.С. Гаврина¹, В.С. Головин¹, С.О. Слипченко¹, Д.Н. Романович¹,
В.А. Капитонов¹, И.В. Мирошников¹, Н.А. Пихтин¹, Т.А. Багаев²,
М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк², В.А. Симаков²

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

² АО «НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха»,
117342 Москва, Россия

E-mail: Podoskin@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 20 января 2021 г.

В окончательной редакции 25 января 2021 г.

Принята к публикации 25 января 2021 г.

Работа посвящена исследованию пространственной динамики процесса включения лазера-тиристора на основе многопереходной гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs с тонкой p -базой. Предложенная гетероструктура имела модифицированную базу с подлегированным слоем рядом с n -эмиттером, позволяющим повысить рабочие напряжения для работы в режиме генерации наносекундных длительностей. В лазер-тиристорных импульсных источниках на основе рассмотренной гетероструктуры показана значительная локализация областей протекания тока, возникающих при переключении прибора из закрытого состояния в открытое. С помощью визуализации свечения областей локализации тока проведена оценка динамики распространения включенного состояния. Также оценены предельные размеры анодного контакта, необходимые для создания импульсного токового ключа и лазерного излучателя наносекундного диапазона на его основе.

Ключевые слова: лазер-тиристор, токовый шнур, локализация тока, полупроводниковые лазеры.

DOI: 10.21883/FTP.2021.05.50839.9611

1. Введение

Актуальность создания импульсных лазерных источников наносекундного диапазона излучения в ближнем инфракрасном диапазоне с характерными длительностями и мощностями в единицы–десятки нс и Вт соответственно обуславливается разнообразием областей их применения. Одно из наиболее востребованных направлений — излучатели наносекундного диапазона для систем машинного зрения (лидары) [1,2]. Современные излучатели на основе диодных лазеров имеют традиционно высокую излучательную эффективность в непрерывном и квазинепрерывном режимах. Однако для получения импульсов наносекундного диапазона длительностей необходимы источники импульсной накачки на основе токовых ключей (полевые и биполярные транзисторы, тиристоры). Для подобных источников импульсной накачки паразитные емкости и индуктивности токоведущего контура являются главными факторами, ограничивающими достижимые амплитуды тока и общий КПД импульсного излучателя. Решением проблемы является сокращение размеров контура „токовый ключ–лазерный диод“ [3] или применение интегральных конструкций, таких как лазер-тиристоры [4,5]. В лазер-тиристорах с базой GaAs [4–6], как и в других полупроводниковых токовых переключателях с лавинными эффектами, известна проблема локализации области протекания тока [7] (так называемого токового шнурования,

current filamentation), возникающая в результате неоднородного по площади прибора процесса переключения из закрытого состояния в открытое и выражающаяся в крайне неоднородном распределении плотности тока по площади прибора. Динамика распространения области включения по площади прибора является определяющей для выходных характеристик конечного прибора. Цель работы состояла в исследовании особенностей распространения включенного состояния по площади прибора и определении зависимости размеров области токовой локализации от времени распространения включенного состояния. В дальнейшем это позволит выбрать оптимальный размер единичного кристалла лазер-тиристора для создания импульсного источника излучения (тока) с требуемой длительностью оптического (токового) импульса. В работе представлено исследование скорости распространения области включенного состояния в низковольтном лазере-тиристоре, предназначенном для работы в виде как интегрального излучателя, так и внешнего токового ключа для накачки линеек и матриц лазерных диодов.

2. Гетероструктура и образцы

Гетероструктура включала в себя транзисторную и лазерную части. Транзисторная часть представляла собой $n-p-n$ -гетерофототранзистор, состоящий из

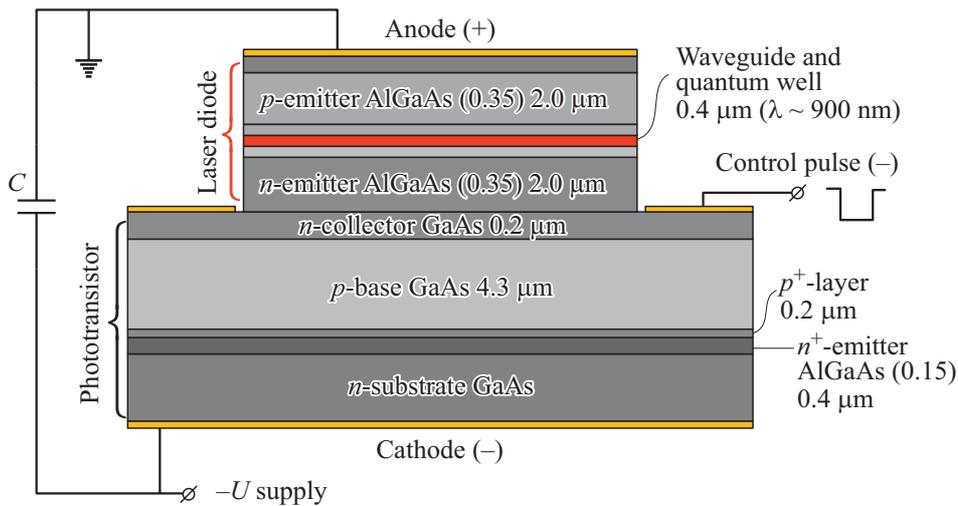


Рис. 1. Схема включения образца лазера-тиристора.

высоколегированного n -эмиттера $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ толщиной $0.4\ \mu\text{m}$, низколегированной p -базы GaAs толщиной $4.3\ \mu\text{m}$ и высоколегированного n -коллектора GaAs толщиной $0.2\ \mu\text{m}$. Поскольку для наносекундных импульсных излучателей индуктивность токового контура является одним из основных ограничивающих факторов, помимо компактной компоновки токового контура можно для повышения пиковой амплитуды тока при сохранении длительности импульса несколько повысить рабочее напряжение. При этом важно не входить в область рабочих параметров, при которых начнут сказываться эффекты разогрева в базовой области лазер-тиристорной гетероструктуры. Для повышения блокируемого напряжения было предложено снизить степень легирования p -базы и со стороны n -эмиттера ввести блокирующий слой толщиной $0.2\ \mu\text{m}$ с повышенным p -легированием. Лазерная часть выращивалась над транзисторной и состояла из эмиттеров $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ толщиной $2\ \mu\text{m}$ и волноводного слоя $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной $0.4\ \mu\text{m}$ с квантовой ямой InGaAs на $905\ \text{nm}$ по центру. Для оценки эффективности лазерной части была отдельно изготовлена гетероструктура, соответствующая лазерной части, и набор образцов лазеров на ее основе с шириной полоска $200\ \mu\text{m}$. Величина характеристической пороговой плотности тока и внутренних потерь при внутреннем квантовом выходе $> 92\%$ составляла $165\ \text{A}/\text{cm}^2$ и $2.2\ \text{cm}^{-1}$ соответственно. Из основной гетероструктуры изготавливались образцы лазер-тиристорных излучателей с шириной анодного полоскового контакта $200\ \mu\text{m}$. С обеих сторон от анодного контакта располагались управляющие электроды шириной так же $200\ \mu\text{m}$. Длина чипов составляла от 880 до $1100\ \mu\text{m}$. Чипы лазер-тиристорных излучателей напайвались подложкой вниз на медные теплоотводы, на которые также монтировались разрядные конденсаторы (рис. 1) на минимальном расстоянии от чипа лазера-тиристора. На первом этапе исследовались режимы работы образцов с длиной резонатора $1100\ \mu\text{m}$ с естественно сколоты-

ми гранями и величиной разрядной емкости $470\ \text{nF}$. Величина статически блокируемого напряжения образцов достигала $30\ \text{V}$. Проводились измерения выходной оптической мощности лазерной части P_{out} и динамики напряжения на разрядном конденсаторе U_c (рис. 2). Из зависимости напряжения на разрядной емкости по соотношению $I(t) = CdU_c/dt$ рассчитывался общий ток в контуре лазера-тиристора. Из зависимостей, приведенных на рис. 2, видна низкая в сравнении с данными из [4,5] эффективность генерации лазерного излучения. При этом образцы характеризуются высокими значениями расчетного сквозного тока, протекающего через гетероструктуру. Также видно, что с ростом напряжения происходит сокращение времени разрядки питающего конденсатора с $300\text{--}350\ \text{ns}$ при $3\text{--}10\ \text{V}$ до $200\text{--}70\ \text{ns}$ при $24\text{--}27\ \text{V}$, что выражается как в сокращении оптического импульса, так и в возрастании амплитуды расчетного тока. Основное сокращение длительностей приходится на диапазон напряжений $> 20\ \text{V}$.

3. Экспериментальная схема

Для оценки особенностей работы образцов лазер-тиристорных излучателей был проведен эксперимент по визуализации процесса распространения включенного состояния по площади прибора. Для этого использовалась установка на основе кремниевой высокочувствительной камеры ProEM 512 и схемы построения изображения (рис. 3). Схема построения изображения состояла из асферической линзы и объектива камеры и устанавливалась перпендикулярно слоям гетероструктуры образца лазер-тиристорного излучателя. Конструкция образцов лазер-тиристорных излучателей содержала „окна“, образованные за счет наклонного профиля боковых стенок лазерного мезаполоска и уменьшения ширины металлизации относительно ширины контактных площадок на $\sim 10\ \mu\text{m}$ (как для анодного контакта,

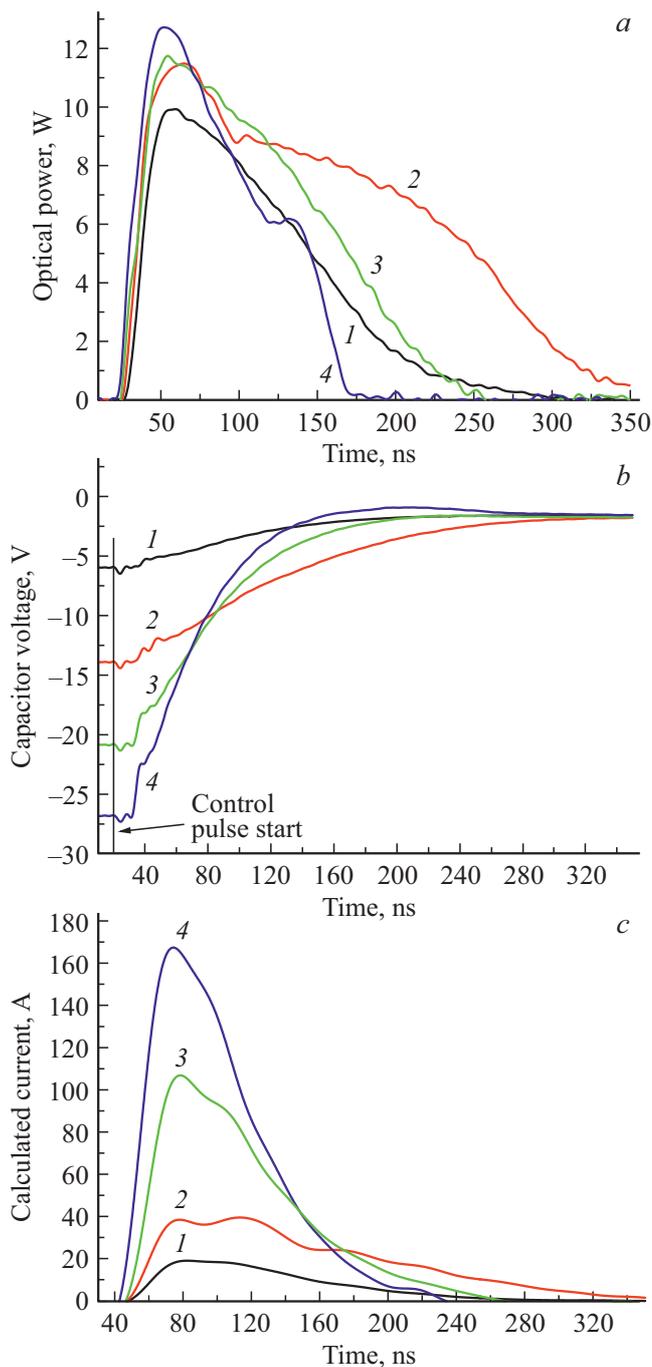


Рис. 2. Зависимости выходной оптической мощности (а), напряжения на разрядном конденсаторе (б) и расчетного тока в контуре (с, расчет со сглаживанием и без учета электрической наводки) от времени для образца лазера-тиристора с длиной резонатора 1100 мкм и емкостью разрядного конденсатора 470 нФ при токе управления 65 мА (через две управляющие площадки) и напряжениях питания, В: 1 — 6, 2 — 14, 3 — 21, 4 — 27.

так и для управляющих контактов). Для дополнительной фильтрации излучения от активной области лазерной части использовался двойной полосовой фильтр FB850-40Thorlabs.

4. Экспериментальные результаты

На рис. 4 представлены результаты визуализации образца лазер-тиристорного излучателя при номинале питающего конденсатора 22 нФ. При повышении питающего напряжения с 15 до 28 В длительность расчетного импульса тока сокращалась с 33 до 24 нс. Из представленных на рис. 4 снимков видно, что в образцах лазер-тиристорных излучателей наблюдается сильная локализация областей свечения. Наблюдаемое в эксперименте свечение имеет две составляющих: 1) свечение области интенсивной ударной ионизации в *p*-базе транзисторной части, вызванное излучательной рекомбинацией сгенерированных носителей; 2) свечение от излучательной рекомбинации в активной области лазерной части лазер-тиристорной гетероструктуры (влияние на характер картины свечения снижено за счет полосового фильтра). В рамках данной работы размеры области локализации тока оценивались по наблюдаемым размерам соответствующих областей интенсивного свечения. Наблюдаемая высокая степень локализации области тока по площади анодного контакта (лазерного полоска) может служить объяснением наблюдаемой низкой эффективности лазерной генерации, однако в работе [8] аналогичная степень локализации не привела к столь низкому отношению выходной оптической мощности к расчетному току через прибор. Из снимков на рис. 5 видно, что в зависимости от амплитуды тока управления наблюдаются различные конфигурации областей протекания тока, в том числе с несколькими пространственно разделенными областями локализации, возникающими в рамках одного цикла разрядки питающей емкости (регистрация проводилась в режиме однократного импульса). Исходя из отмеченных эффектов для оценки временной динамики распространения области включения по площади образца подбирали режимы работы, при которых в исследуемом образце наблюдается только одна область с ярким свечением. Была проведена серия измерений режима работы образца лазер-тиристорного излучателя с длиной резонатора 880 мкм при различных номиналах разрядной емкости (от 2 до 220 нФ) и рабочем напряжении 28 В. На рис. 6 представлены нормированные профили формы областей свечения, соответствующие областям локализации тока, и оценены их размеры. Уменьшение величины разрядной емкости контура до 2 нФ позволило сократить длительность получаемых импульсов до 10 нс. Во всем диапазоне номиналов разрядных емкостей присутствовал эффект уменьшения длительности процесса разрядки и токового импульса соответственно. Наиболее ярко эффект проявлялся на номиналах > 10 нФ (рис. 7). На рис. 8 приводится сопоставление размеров области локализации тока и длительности процесса разрядки питающего конденсатора, соответствующей длительности токового импульса. Зависимости размера области локализации тока, соответствующие различным уровням отсчета интенсивности свечения от максимальной (рис. 6), можно рассматривать в качестве верхнего и нижнего ограничений на минимальный

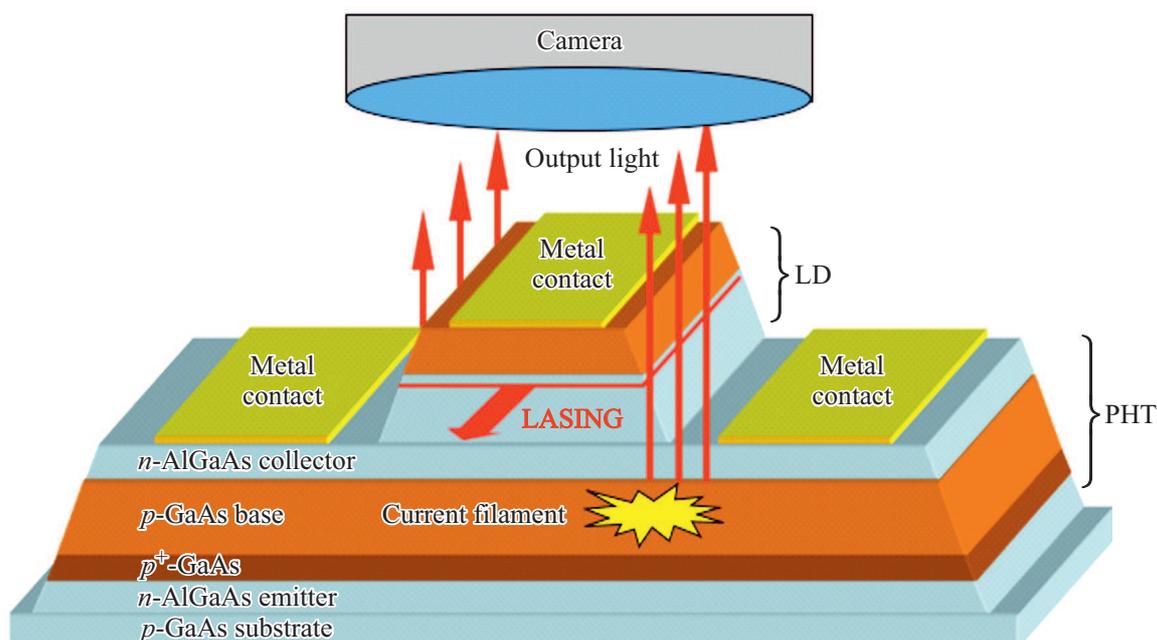


Рис. 3. Экспериментальная схема для визуализации областей локализации плотности тока при включении излучателей на основе лазер-тиристорной гетероструктуры: LD — лазерная часть гетероструктуры, PHT — гетерофототранзисторная часть.

размер анодной площадки прибора, необходимый для получения соответствующих длительностей импульсов тока.

5. Обсуждение

Образцы лазер-тиристорных излучателей на основе рассматриваемой гетероструктуры характеризуются низкой излучательной эффективностью, но высокими амплитудами расчетных токов. На рис. 4, 5 (вид свер-

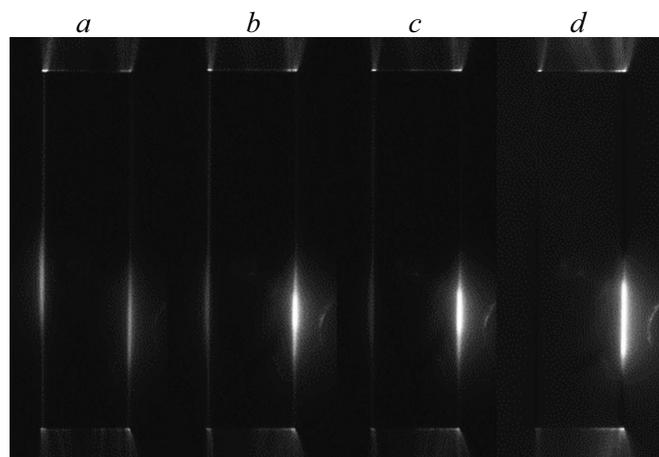


Рис. 4. Снимки свечения областей локализации тока образца лазера-тиристора с длиной резонатора 880 мкм (ширина анодного полоска 200 мкм) при емкости питающего конденсатора 22 нФ, токе управления 62 мА и напряжениях питания, В: *a* — 15, *b* — 20, *c* — 22, *d* — 28.

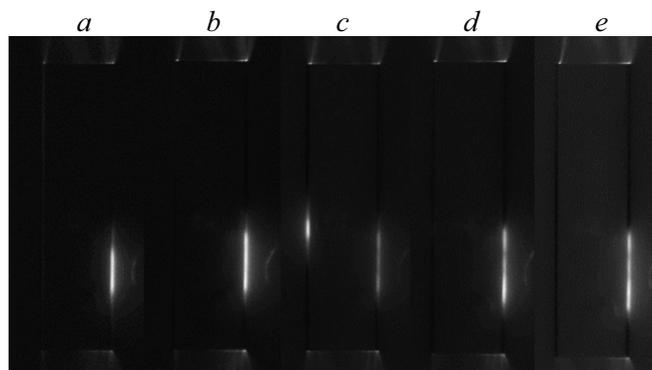


Рис. 5. Снимки свечения областей локализации тока образца лазера-тиристора с длиной резонатора 880 мкм (ширина анодного полоска 200 мкм) при емкости питающего конденсатора 22 нФ, напряжении питания 28 В и токах управления, мА: *a* — 39, *b* — 62, *c* — 75, *d* — 120, *e* — 380.

ху) наблюдаются ярко выраженные области свечения, свидетельствующие о существенной локализации протекающего через прибор тока. Наличие подобной локализации, с одной стороны, ограничивает возможности создания эффективных импульсных лазерных излучателей на базе рассмотренной гетероструктуры, с другой — открывает возможности к ее использованию в качестве компактного внешнего токового ключа для накачки линеек и стеков лазерных диодных излучателей, аналогично [9–11]. Форма областей локализации зависит от всех основных рабочих параметров лазер-тиристорного излучателя: напряжения питания, ампли-

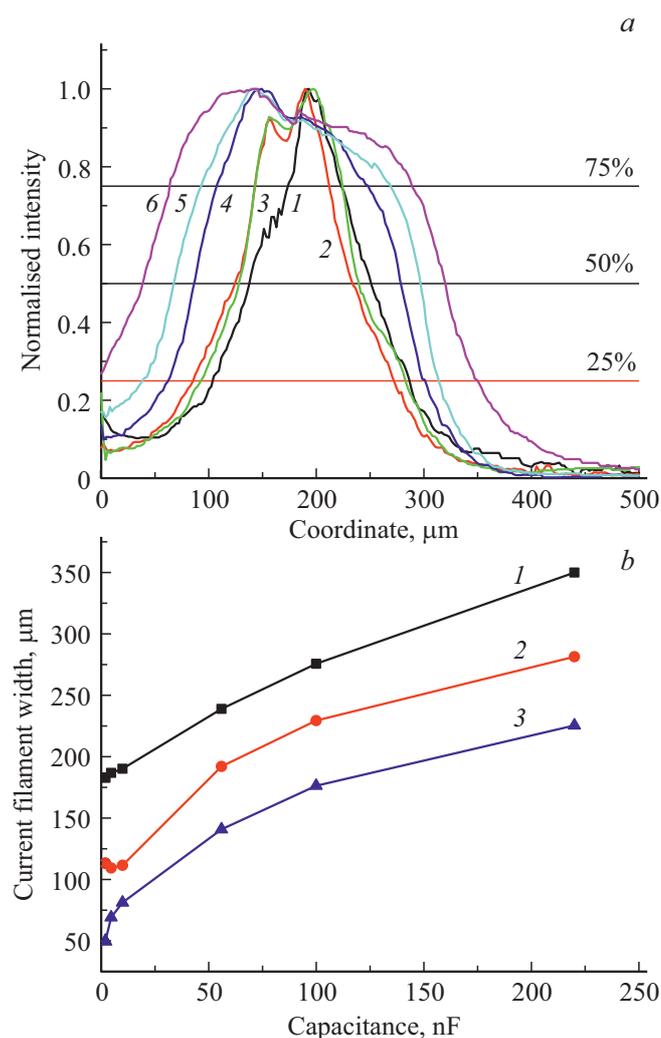


Рис. 6. Размеры области локализации протекания тока для образца с длиной 880 мкм: *a* — нормированные профили интенсивности свечения области локализации протекания тока для различных величин разрядных емкостей, нФ: 1 — 2, 2 — 4.7, 3 — 10, 4 — 56, 5 — 100, 6 — 220; *b* — размеры сечения области локализации протекания тока для разных разрядных емкостей и при различных уровнях от максимума нормированного профиля интенсивности свечения, %: 1 — 25, 2 — 50, 3 — 75.

туды тока управления и длительности импульса (величины разрядной емкости). Наблюдаемые при различных напряжениях питания формы областей локализации и яркости свечения могут быть объяснены не только различной интенсивностью процессов ударной ионизации и токовой локализации, но и различным начальным расположением токовых шнуров. Так, при низких напряжениях питания токовый шнур может располагаться в глубине под полосковым анодным контактом, а с ростом напряжения питания — смещаться к электродам управления (рис. 4). Однако в независимости от первоначального расположения области токовой локализации полученные экспериментальные снимки позволяют

получить оценку верхней границы ее геометрических размеров. Из динамики процесса разрядки питающей емкости (рис. 2 и 7) следует, что наиболее интересны в качестве рабочих режимы с напряжениями питания, близкими к максимальному, поскольку переход в этот диапазон рабочих напряжений сопровождается сокращением длительности процесса разрядки и дополнительным увеличением амплитуды тока. Для высоких рабочих напряжений получена верхняя оценка размеров области токовой локализации от 170 до 350 мкм при рабочих емкостях от 2 до 220 нФ и длительностях токового импульса от 10 до 112 нс соответственно (рис. 7). Это позволяет выбрать оптимальный размер анодной контактной площадки (он не должен превышать размер области токовой локализации при соответствующих емкости и длительности) для приборов в виде

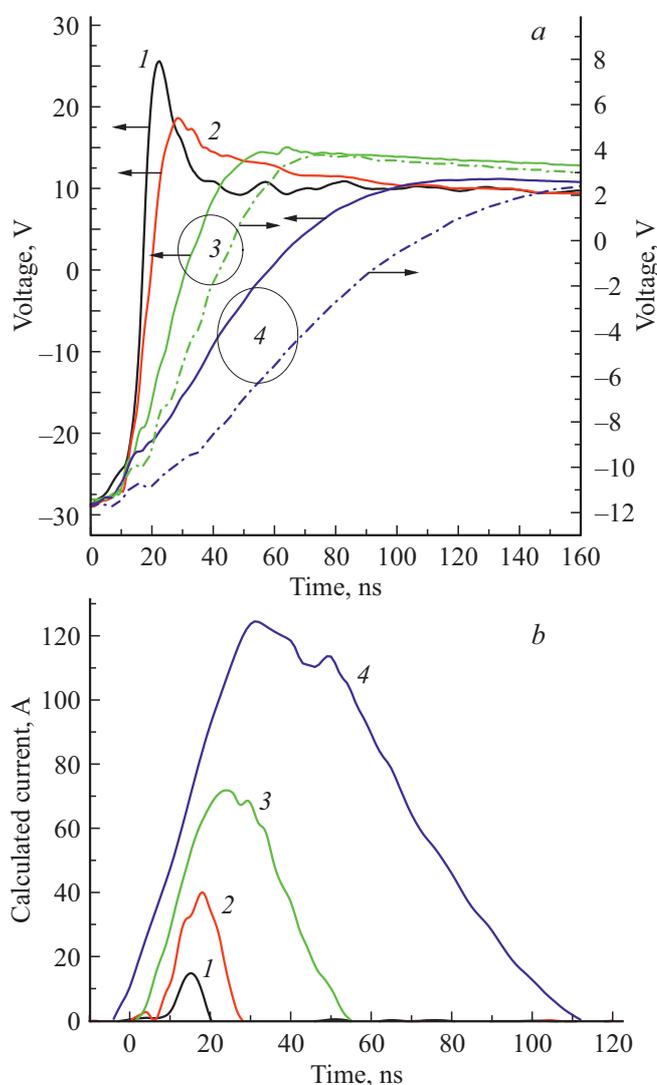


Рис. 7. Для образца лазера-тиристора длиной 880 мкм: *a* — динамика напряжения на питающем конденсаторе при его номиналах, нФ: 1 — 2, 2 — 10, 3 — 56, 4 — 220; *b* — динамика расчетного тока в разрядном контуре при номиналах питающего конденсатора, нФ: 1 — 2, 2 — 10, 3 — 56, 4 — 220.

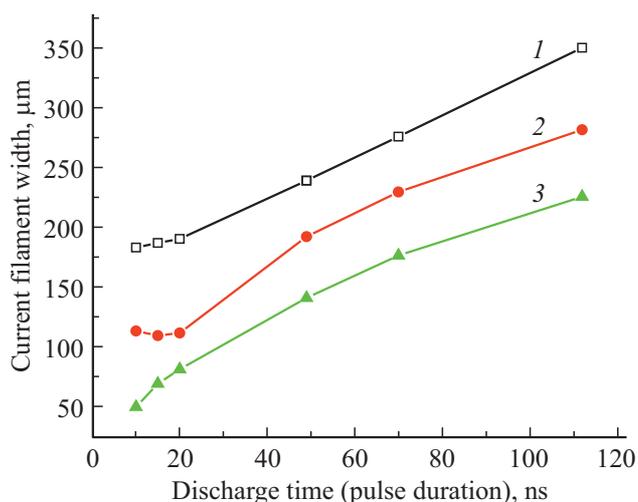


Рис. 8. Зависимость размера области токовой локализации (токового шнура) от времени разрядки питающего конденсатора при различных уровнях от максимума нормированного профиля интенсивности свечения, %: 1 — 25, 2 — 50, 3 — 75.

быстродействующих компактных токовых ключей для внешней накачки диодных излучателей импульсами тока наносекундного диапазона длительностей.

6. Заключение

Исследованы особенности работы импульсных лазерных источников на основе многопереходной гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs с тонкой *p*-базой, толщиной 4.3 мкм, модифицированной дополнительным подлегированным слоем со стороны *n*-эмиттера с целью повышения блокируемого напряжения и уменьшения влияния индуктивности на работу источников в режиме генерации наносекундных импульсов. Показана значительная локализация областей протекания тока при переключении прибора из закрытого состояния в открытое: размеры составили от 170 до 350 мкм при длительностях токового импульса от 10 до 112 нс. При этом отмечена низкая излучательная эффективность, но высокие пиковые значения импульсного тока через прибор. Рассмотренные импульсные приборы предложено использовать в качестве внешнего токового ключа для накачки диодных излучателей при размерах анодных площадок, соответствующих размерам областей токовой локализации.

Финансирование работы

В части разработки технологии постростовых операций экспериментальных образцов исследование выполнено за счет Государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

В части экспериментальных исследований работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам

Президента Российской Федерации (грант для молодых кандидатов наук МК-3208.2019.8).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B. Schwarz. *Nature Photonics*, **4**(7), 429 (2010). DOI: 10.1038/nphoton.2010.14
- [2] J. Huikari, S. Jahromi, J.-P. Jansson, J. Kostamovaara. *Opt. Eng.*, **57**(2), 1 (2018). DOI: 10.1117/1.OE.57.2.024104
- [3] A. Liero, A. Klehr, A. Knigge, W. Heinrich. *Eng. Res. Express*, **2**(1), 015023 (2020). DOI: 10.1088/2631-8695/ab5be5
- [4] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, A.V. Rozhkov, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, T.A. Bagaev, M.V. Zverkov, V.P. Konyaev, Y.V. Kurniavko, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, A.A. Pandalitsa, V.A. Simakov. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **25**(17), 1664 (2013). DOI: 10.1109/LPT.2013.2272801
- [5] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, A.V. Rozhkov, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, A.A. Pandalitsa, V.A. Simakov. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **27**(3), 307 (2015). DOI: 10.1364/OE.24.016500
- [6] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, I.S. Tarasov. *Opt. Express*, **24**, 16500 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.016500
- [7] M.E. Levenshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein. *Breakdown phenomena in semiconductors and semiconductor devices*. In series: *Selected Topics in Electronics and Systems* (World Scientific, 2005) v. 36.
- [8] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, I.S. Tarasov. *J. Appl. Phys.*, **121**(5), 054502 (2017). DOI: 10.1063/1.4975411
- [9] E.B. Treidel, H. Christopher, O. Hilt, A. Klehr, A. Ginolas, A. Liero, J. Würfl. *Electron. Lett.*, **56**(20), 1084 (2020). DOI: 10.1049/el.2020.0896
- [10] T. Hoffmann, A. Klehr, A. Liero, G. Erbert, W. Heinrich. *Electron. Lett.*, **51**(1), 83 (2015). DOI: 10.1049/el.2014.3204.
- [11] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, D.N. Romanovich, V.V. Shamakhov, D.N. Nikolaev, I.S. Shashkin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *Opt. Express*, **27**(22), 31446 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.031446

Редактор Л.В. Шаронова

Turn on process spatial dynamics of a thyristor laser (905 nm) based on an AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructure

A.A. Podoskin¹, P.S. Gavrina¹, V.S. Golovin¹,
S.O. Slipchenko¹, D.N. Romanovich¹, V.A. Kapitonov¹,
I.V. Miroshnikov¹, N.A. Pikhin¹, T.A. Bagaev²,
M.A. Ladugin², A.A. Marmaluyk², V.A. Simakov²

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² Stel'makh Research and Development
Institute POLYUS,
117342 Moscow, Russia

Abstract The switching on process spatial dynamics of a laser-thyristor based on an AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructure with a thin p -base has been studied. The heterostructure had a modified base with a middle-doped layer at the n -emitter, which makes it possible to increase the operating voltages in order to generate nanosecond current pulses. In laser thyristor pulsed sources based on the proposed heterostructure, a high degree of current flow region localization arising during turn on process of the device was demonstrated. Using the current localization regions luminescence, the propagation dynamics of the switched-on state was estimated. The anode contact sizes required for the nanosecond range pulsed current switches or laser emitters development are obtained.