

Моделирование пространственной динамики включения лазера-тиристора ($\lambda = 905$ нм) на основе многопереходной гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs

© О.С. Соболева, В.С. Головин, В.С. Юферев, П.С. Гаврина, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.А. Подоскин[¶]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
191024 Санкт-Петербург, Россия

[¶] E-mail: Podoskin@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 26 декабря 2019 г.

В окончательной редакции 30 декабря 2019 г.

Принята к публикации 30 декабря 2019 г.

Представлена двумерная модель транспорта для исследования пространственной токовой динамики включения лазера-тиристора, учитывающая оптическую обратную связь, ударную ионизацию, насыщение скорости дрейфа в сильных электрических полях. Показано наличие локализации тока при включении лазера-тиристора и взаимосвязи между неоднородностью распределения тока управления в зависимости от его амплитуды и положения начальной области включения. Время включения лазера-тиристора составляет 13 нс при напряжении питания 26 В, время распространения включенного состояния на всю ширину 200 мкм полоска ~ 65 нс, данные параметры остаются неизменными в независимости от пространственной динамики включения.

Ключевые слова: лазер-тиристор, локализация тока, AlGaAs/GaAs, ударная ионизация, транспорт в гетероструктурах.

DOI: 10.21883/FTP.2020.05.49265.9341

1. Введение

В последнее время растет интерес к мощным полупроводниковым лазерам с длительностями импульсов нс и суб-нс. Такие лазеры широко применяются в различных сферах: лазерная дальнометрия, прецизионная обработка материалов, нелинейное преобразование частоты и др. При этом основные задачи связаны не только с созданием эффективной лазерной структуры, обеспечивающей высокую пиковую мощность, но и обеспечением эффективной накачки полупроводникового лазера, т.е. создание эффективного мощного короткоимпульсного источника тока.

Сегодня наиболее распространенные решения для накачки полупроводниковых лазеров основаны на использовании внешних импульсных источников тока или импульсных схем на основе дискретных компонент, расположенных на том же носителе, что и лазерный диод [1–3]. В последнем случае в качестве токовых ключей в основном используются полевые транзисторы (ХЕМТ, МОСФЕТ на основе Si, GaAs или GaN) [4]. В работе [5] впервые была показана возможность интеграции тиристорного ключа и лазерного диода в одном полупроводниковом кристалле, что позволило получать мощные оптические импульсы без использования дополнительных внешних электрических компонентов. Такой подход обладает большей эффективностью при генерации коротких лазерных импульсов за счет уменьшения количества дискретных компонент и паразитных связей в импульсной сильноточной электрической цепи, а лазерные системы на его основе могут быть проще, экономичнее

и компактнее. Использование многопереходных гетероструктур лазер-тиристор (ЛТ) позволяет генерировать последовательности мощных лазерных импульсов с пиковой мощностью до 43 Вт при длительности импульса 100 нс [6,7], частотами повторения до единиц МГц [8] и длительностями от 100 нс до 100 пс [9]. Что немаловажно, так как энергия, необходимая для управляемого включения ЛТ, находится на уровне единиц нДж [8,10].

С целью оптимизации переходных характеристик многопереходной гетероструктуры ЛТ были разработаны сосредоточенная статическая [11] и одномерная динамическая модели [12], в которых ЛТ рассматривался в виде оптопары лазерный диод–фототранзистор, связанной по оптическому каналу. Было показано, что основными физическими процессами, отвечающими за работу прибора, являются оптическая обратная связь и ударная ионизация, а высокие скорости переходных процессов определяются исключительно ударной ионизацией [12].

Последние экспериментальные исследования показали, что в лазерах-тиристорах имеет место локальное включение [13]. В работе [14] проводились исследования фототранзисторов при внешней оптической активации, было продемонстрировано локальное включение фототранзистора, а также показано, что область включения может быть меньше области оптической активации. В работе [13] впервые было проведено экспериментальное исследование эффектов локального включения мощных лазеров-тиристор, были продемонстрированы два режима работы прибора: при низком напряжении питания и низкой скорости ударной ионизации область включения достаточно большая и определяется неодно-

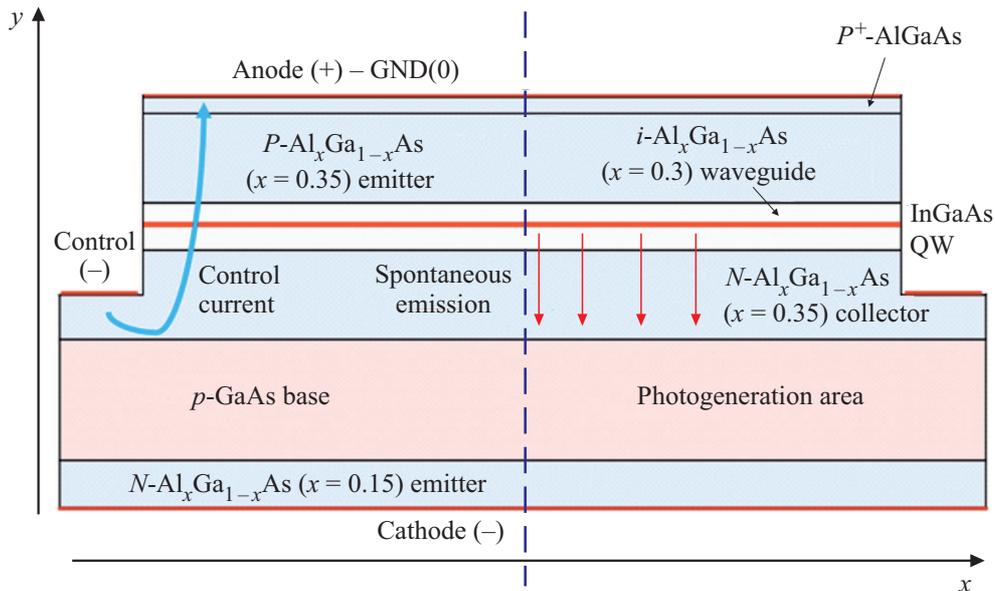


Рис. 1. Схематическое изображение лазера-тиристора.

родностью тока управления, во втором режиме при увеличении напряжения питания (15 В и выше) происходит заметное сужение области включения, что связывалось с включением ударной ионизации.

Однако экспериментальных данных [13] недостаточно для анализа пространственной динамики включения ЛТ. В то же время за счет сильной локализации тока может происходить сильный перегрев и разрушение кристалла, разрушение зеркал за счет локализации оптического излучения, падение излучательной эффективности лазерной части за счет появления непрокачиваемых областей. При этом использование многомерных моделей для исследования пространственной динамики тока, что очень важно для оптимизации конструкции и режимов работы прибора [15]. Цель данной работы состояла в исследовании пространственной токовой динамики включения лазера-тиристора в рамках разработанной двумерной модели, учитывающей основные особенности гетероструктуры лазеротристоров: ограничение токовой инжекции, оптическая обратная связь, пороговый характер работы лазерной части, ударная ионизация.

2. Описание модели и исследуемой гетероструктуры

Модельная структура лазера-тиристора представлена на рис. 1 и состоит из транзисторной и лазерной частей, связанных между собой оптической обратной связью. Транзисторная часть состоит из эмиттера $N\text{-Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ (0.24 мкм), базы $p\text{-GaAs}$ (2 мкм) и кол-

лектора $N\text{-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ (2 мкм). Лазерная часть включает в себя эмиттер $N\text{-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$, который являлся одновременно коллектором транзисторной части, эмиттер $P\text{-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ (2 мкм) и волновод $i\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной 0.4 мкм. В центре волновода расположена квантово-размерная активная область (10 нм InGaAs) между GaAs-спейсерами (по 10 нм каждый). Кристаллы лазера-тиристора имеют полосковую геометрию с шириной анодного контакта 200 мкм, сформированного к p -эмиттеру лазерной части прибора, и длину Фабри–Перо резонатора 500 мкм. Управляющий электрод сформирован к эмиттеру $N\text{-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ лазерной части. В модели исключены контактные GaAs-слои для простоты и экономии вычислительных ресурсов.

Между катодным и анодным контактами лазера-тиристора прикладывается напряжение питания (U_0) от постоянного источника. Таким образом, в данной модели рассматривается только включение прибора, а не импульсные характеристики, для исследования которых необходимо включать в цепь параллельно прибору конденсатор. В основную цепь (цепь разрядки) включены нагрузка (1 Ом) и индуктивность (2 нГн), в цепи управления нагрузка на несколько порядков выше (100 Ом).

Включение лазера-тиристора производится посредством подачи управляющего потенциала на электроды управления (рис. 1). Через лазерную часть прибора начинает протекать ток (рис. 1), в активной области возникает спонтанное излучение, которое, распространяясь во всех направлениях, частично поглощается в p -базе, генерируя в этой области неравновесные носители. Фогенерация в области сильного электрического поля коллекторного перехода в базе активирует ударную ионизацию, которая обеспечивает быстрое накопление критической концентрации дырок в базе и быстрое

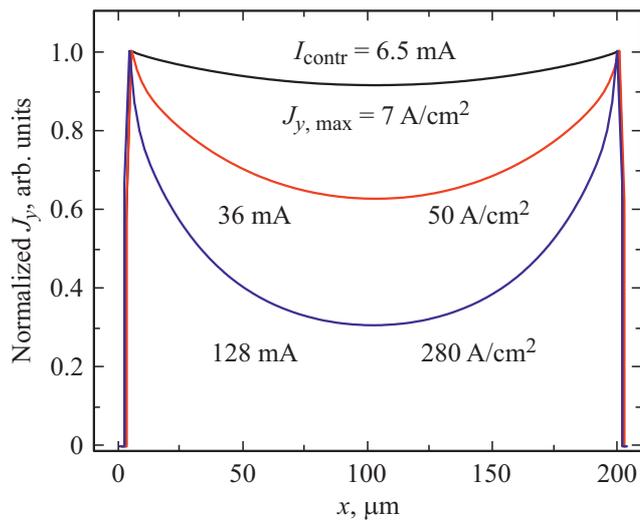


Рис. 2. Распределение нормализованной плотности тока управления в области лазерного диода при различных токах управления.

включение лазера-тиристора. В то же время фотогенерация в *p*-базе растет при увеличении протекающего через структуру тока, обеспечивая оптическую обратную связь [12,16] и поддерживая лазер-тиристор во включенном состоянии.

В данной работе, в отличие от предыдущих теоретических исследований [12], ЛТ рассматривается как единая многопереходная гетероструктура, а не оптопара фототранзистор–лазерный диод. Разработанная модель ЛТ учитывает дрейф-диффузионный транспорт носителей через гетероструктуру, насыщение скорости дрейфа в сильных электрических полях (и отрицательную дифференциальную подвижность в GaAs) как ударную ионизацию в области коллекторного перехода в модели Зельберхера [17]. Основные уравнения транспорта аналогичны приведенным в [12]. В области гетероперехода ударная ионизация не учитывалась, так как электрическое поле гетероперехода довольно узкое, и время пролета носителей через него меньше времени релаксации. Отношение dE_c/dE_g принято равным 0.6. Гетеропереходы задавались с помощью небольшого градиента по составу (толщина 5 нм), на гетерогранице

принято равенство квазиуровней Ферми. Время жизни носителей (электронов и дырок) Шокли–Рида–Холла принято равным 10 нс. Оптическая обратная связь, учитывающая пороговые характеристики лазерной генерации, описывается на основе разработанной ранее модели фотогенерации в слое *p*-базы [12,16].

На начальном этапе была проведена оценка максимального напряжения удержания исследуемой структуры лазера-тиристора (27 В) и однородности распределения плотности тока управления в дрейф-диффузионной модели с использованием пакета SILVACO ATLAS. Так как слой растекания *n*-AlGaAs для импульса тока управления достаточно тонкий (2 мкм) относительно размера излучающей апертуры (200 мкм), то существует заметная неоднородность накачки активной области вдоль оси *OX* (рис. 2), степень накачки которой зависит от амплитуды импульса тока управления. При малых амплитудах тока управления ($I_{cla} = 6.5$ мА) плотность тока управления ($J_{max} = 7$ А/см²) распределяется однородно по всей активной области, а при высоких — к примеру, при управляющем потенциале ($I_{cla} = 128$ мА) ($J_{max} = 280$ А/см²) — локализуется в узкой области у края мезы (рис. 2). Такая локализация обусловлена уменьшением дифференциального сопротивления лазерного диода при увеличении управляющего потенциала/тока.

Были проанализированы две двумерные модели фотогенерации в *p*-базе при поглощении спонтанного излучения из активной области лазерной части (рис. 3): (i) полная, учитывающая фотогенерацию в *p*-базе как сумму вкладов от точечных источников в активной области, распределенных вдоль излучающей апертуры, и (ii) упрощенная, в которой скорость фотогенерации в базовой области в точке x_1 зависит только от концентрации носителей в активной области в точке x_1 . На рис. 4 приведено сравнение полной и упрощенной двумерной модели фотогенерации по полученным потокам спонтанного излучения на границе база/коллектор ($F_1(x)$ — поток, полученный в нелокальной модели, $F_2(x)$ — в локальной модели) при токе управления 6.5 и 128 мА. Видно, что упрощенная модель дает незначительное расхождение значений потоков спонтанного излучения только у края мезы (не более 10%), тогда как для большей части полоскового контакта потоки

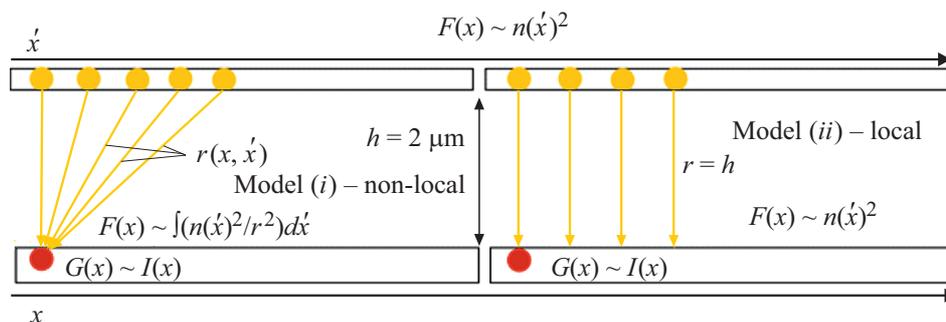


Рис. 3. Схематическое изображение модели фотогенерации.

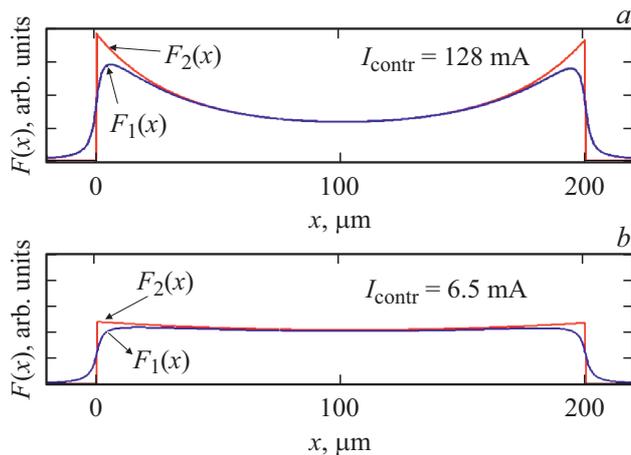


Рис. 4. Потоки спонтанного излучения на границе база/коллектор ($F_1(x)$ — поток, полученный в нелокальной модели, $F_2(x)$ — в локальной) при токе управления 128 (а) и 68 мА (b).

спонтанного излучения, полученные в разных моделях, одинаковы. Так как фотогенерация является триггером для ударной ионизации, определяющей скорость включения на начальном этапе, можно считать более простую модель (ii) приемлемой. Кроме того, если учесть отражение лучей, падающих под углом к гетерогранице AlGaAs/GaAs, то модель (ii) будет давать результат, еще более приближенный к полной модели. Данная модель описывает распределение потока спонтанного излучения на границе база/коллектор, для описания скорости фотогенерации в базе лазера-тиристора при моделировании динамики включения вдоль оси y поток спонтанного излучения менялся только за счет поглощения (1).

Таким образом, фотогенерация в области p -базы описывалась на основе следующих соотношений:

$$G(y, x) = \alpha \cdot F(x)e^{-\alpha \cdot y}, \quad (1)$$

$$F(x) = \frac{1}{2} \cdot d_{QW} \cdot \beta \cdot B \cdot n_{QW}(x)^2, \quad (2)$$

где $F(x)$ — поток спонтанного излучения, падающий на границу базы с коллектором в точке с координатой x , α — коэффициент поглощения, d_{QW} — толщина квантовой ямы, B — коэффициент излучательной рекомбинации, $n_{QW}(x)$ — зависящая от координаты x концентрация неравновесных носителей в активной области лазерной части, β — доля поглощаемого в базе излучения из активной области [16], коэффициент $1/2$ показывает, что только половина спонтанного излучения распространяется в направлении базы.

3. Результаты моделирования

В результате двухмерного моделирования включения лазера-тиристора с помощью пакета Silvaco ATLAS были

получены динамика тока и напряжения, пространственное распределение плотности тока, концентраций носителей и электрического поля. Начальное напряжение питания составляло $U_0 = 26 \text{ В}$, что близко к максимальному, и позволило рассмотреть динамику включения при максимальном вкладе ударной ионизации в процессы включения и локализации тока. При включении лазера-тиристора наблюдается сильная локализация тока, начальное положение которой зависит от амплитуды тока управления. При относительно небольшом токе управления (6.5 мА), когда распределение интенсивности попадающего в базу излучения практически однородное, (см. вставку на рис. 5, а) наблюдается локализация по центру. При более высоких токах управления начальная область включения сдвигается к управляющим контактам (пассивной области или краю мезы), последовательно возникают две области локализации, со стороны правого и левого контактов. На рис. 5, б (см. вставку) показано включение при высоком токе управления (128 мА), в момент времени, когда возникает второй токовый „шнур“, видно, что за это время первая область локализации уже распространяется на некоторое рассто-

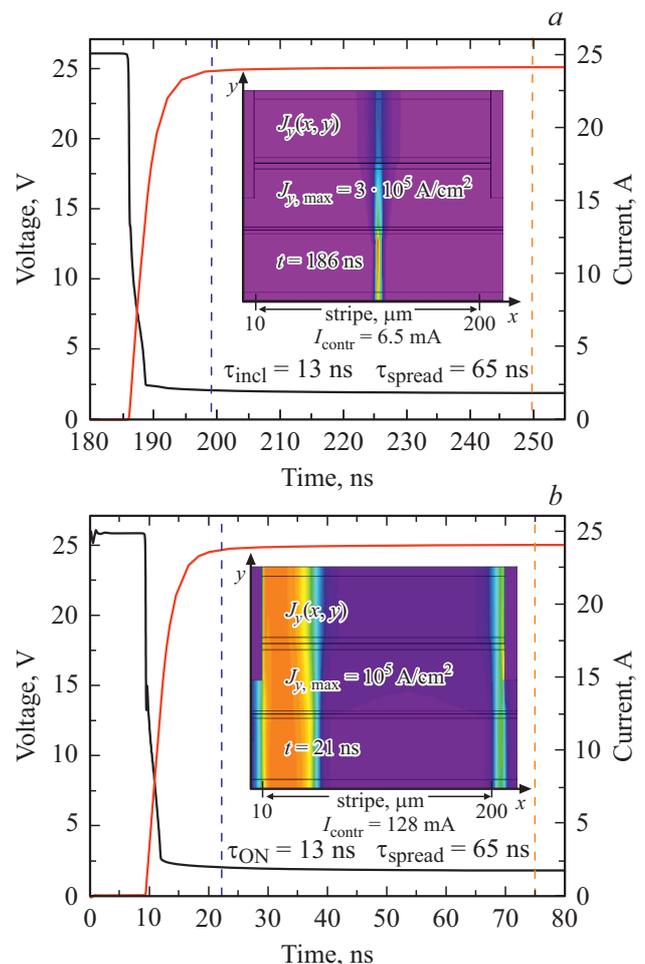


Рис. 5. Динамика тока и напряжения при включении лазера-тиристора при токах управления 6 (а) и 128 мА (b).

яние (~ 20 мкм), а плотность тока во втором шнуре значительно ниже. Похожая зависимость начального положения включения от амплитуды тока управления наблюдалась в экспериментальных исследованиях [13].

На рис. 5 а и б показана динамика тока и напряжения при включении малым и большим токами управления. Из рисунка видно, что, несмотря на различия в пространственном распределении плотности тока, времени и задержек включения (185 нс для тока управления 6.5 мА и 10 нс для тока управления 128 мА), длительность фронта импульса тока (и напряжения) не меняется. Время нарастания тока в независимости от величины амплитуды управляющего импульса тока составляет 13 нс для выбранных параметров цепи.

Рассмотрим более подробно особенности пространственной локализации тока при включении лазера-

тиристора (рис. 6). Видно, что ширина области локализации меняется в гетероструктуре лазера тиристора и имеет „перемычку“ в области базы вблизи коллекторного перехода, а в лазерной части прибора область протекания тока значительно шире, а следовательно, максимальная плотность тока ниже. Таким образом, локализация тока в меньшей мере оказывает влияние на лазерную генерацию и сильнее проявляется в области активной ударной ионизации в базе лазера-тиристора. Из рис. 6 видно, что время распространения включенного состояния (когда ток начинает протекать по всей ширине полоска) составляет ~ 65 нс и не зависит от амплитуды управляющего сигнала. Таким образом, время распространения включенного состояния на всю ширину полоскового контакта 200 мкм значительно превышает время включения лазера-тиристора.

Как в случае низкой амплитуды управляющего сигнала, так и высокой, на начальном этапе включения наблюдается рост плотности тока в шнуре и сужение области включенного состояния, что также отмечалось в [15], и лишь спустя 10–15 нс, когда напряженность электрического поля в области базы падает до минимального значения и темп ударной ионизации падает практически до нуля, начинает увеличиваться ширина области включения. Основным фактором, определяющим скорость распространения включенного состояния в лазере-тиристор, является скорость дрейфа/диффузии дырок в базовой области, так как именно наличие критической концентрации дырок в базовой области определяет включение прибора. В то время как диффузия дырок происходит за счет градиента концентрации, дрейф обеспечивает продольная (параллельно слоям гетероструктуры) компонента напряженности электрического поля в базе, образованная из-за разных значений подвижности дырок и электронов в области шнура, т.е. электроны быстрее уходят из узкой области включения в *p*-базе, а некомпенсированные дырки остаются в центре, и таким образом создается продольное электрическое поле (эффект Дембера).

4. Заключение

Представлена двумерная динамическая модель лазера-тиристора, учитывающая транспорт носителей заряда в рамках дрейф-диффузионного приближения, ударную ионизацию в области коллекторного перехода, оптическую обратную связь и неоднородность плотности тока управления. Данная модель позволяет исследовать особенности пространственной локализации тока при включении лазера-тиристора.

В представленной работе впервые рассматривался транспорт носителей во всей гетероструктуре лазера-тиристора, а не только в области фототранзистора. Показано, что при включении присутствует локализация тока, при этом положение начальной области включения определяется амплитудой сигнала управления. В случае

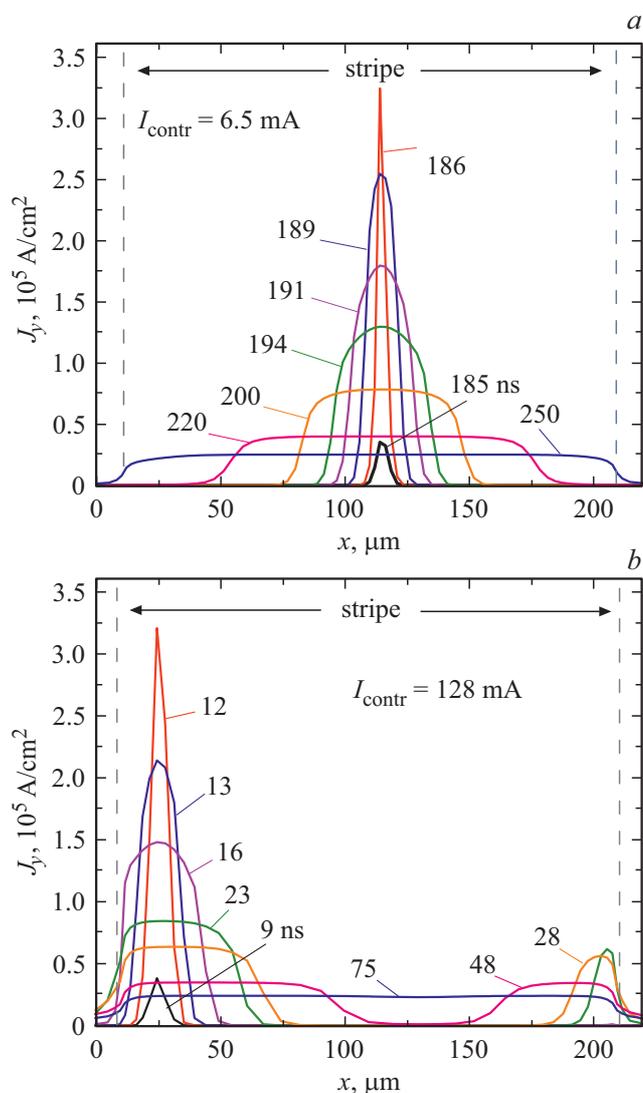


Рис. 6. Распределение *y*-компоненты плотности тока во время включения лазера-тиристора при токах управления 6.5 (а) и 128 мА (б) (сечение параллельно слоям гетероструктуры вдоль оси *x* в области базы).

низкой амплитуды тока управления (6.5 мА) начальная область включения расположена по центру, в случае высокой амплитуды (128 мА) — у краев мезы, при этом формируется два канала включения. Несмотря на различия в пространственном характере включения, скорость нарастания тока и форма импульса не зависят от амплитуды управляющего сигнала. Из-за локализации тока при уменьшении начального напряжения включения сохраняются высокие скорости включения. Данные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Исследован характер локализации тока при включении лазера-тиристора. На начальном этапе включения наблюдается сужение ширины шнура и последующий рост плотности тока при неизменной ширине шнура. Как только на структуре напряжение падает до минимального начинается увеличение ширины локальной области протекания тока. За время ~ 65 нс область включения распространяется по всей ширине полоска, в независимости от амплитуды управляющего сигнала. Распространение включенного состояния и его скорость определяют процессы дрейфа и диффузии дырок в области базы, так как именно накопление критической концентрации дырок в базовой области определяет включение прибора.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук МК-3208.2019.8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] X. Wang, P. Crump, H. Wenzel, A. Liero, T. Hoffmann, A. Pietrzak, C.M. Schultz, A. Klehr, A. Ginolas, S. Einfeldt, F. Bugge. *IEEE J. Quant. Electron.*, **46** (5), 658 (2010).
- [2] D.A. Veselov, V.A. Kapitonov, N.A. Pikhtin, A.V. Lyutetskiy, D.N. Nikolaev, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, V.V. Shamaikhov, I.S. Shashkin, I.S. Tarasov. *Quant. Electron.*, **44** (11), 993 (2014).
- [3] Th. Hoffmann, A. Klehr, A. Liero, G. Erbert, W. Heinrich. *Electron. Lett.*, **51** (1), 83 (2015).
- [4] A. Liero, A. Klehr, A. Knigge, W. Heinrich. *Engin. Res. Express*, **2**, 015023 (2020).
- [5] 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. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **25** (17), 1664 (2013).
- [6] 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. Padalitsa, V.A. Simakov. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **27** (3), 307 (2015).

- [7] A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, V.V. Zolotarev, D.A. Veselov, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, S.O. Slipchenko. *IEEE 17th Intern. Conf. Laser Optics (LO)*, (June 27–July 1, 2016, St. Petersburg, Russia) R3-9 (2016).
- [8] 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), 83154 (2016).
- [9] 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** (15), 16500 (2016).
- [10] 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, Y.V. Kurniavko, M.A. Ladugin, A.V. Lobintsov, A.A. Marmalyuk, A.A. Padalitsa, V.A. Simakov. *Semiconductors*, **48** (5), 697 (2014).
- [11] S.O. Slipchenko; A.A. Podoskin, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, A.V. Gorbatyuk. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **62** (1), 149 (2015).
- [12] V.S. Yuferev, S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **62** (12), 4091 (2015).
- [13] 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).
- [14] 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.*, **119** (12), 124513 (2016).
- [15] G. Duan, S. Vainshtein, J. Kostamovaara. *Appl. Phys. Lett.*, **100** (19), 193505 (2012).
- [16] A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, M.S. Zakharov, D.A. Veselov, V.V. Zolotarev, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov. *Semicond. Sci. Techn.*, **30** (12), 125011 (2015).
- [17] S. Selberherr. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices* (Wien–NY, Springer Verlag, 1984).

Редактор Г.А. Оганесян

Modeling of the turn-ON spatial dynamics of the AlGaAs/InGaAs/GaAs laser-thyristor ($\lambda = 905$ nm)

O.S. Soboleva, V.S. Golovin, V.S. Yuferev, P.S. Gavrina, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A 2D simulation of carrier transport and spatial current dynamics in the laser-thyristor is presented. The simulation takes into account such features as impact ionization, optical feedback, and saturation of the drift velocity in strong electric fields. The current localization during the laser-thyristor turn-on process is demonstrated. The relationship between the control current distribution nonuniformity and its amplitude, as well as the initial turn-on region position, are shown. The laser-thyristor turn-on time of 13 ns at a supply voltage of 26 V and 65 ns turn-on spreading time over the entire 200 μm stripe width are demonstrated. These parameters remain unchanged regardless of the turn-on spatial dynamic.