

07;09

Экспериментальные исследования динамики распространения включенного состояния низковольтных лазеров-тиристоров на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs

© П.С. Гаврина¹, О.С. Соболева¹, А.А. Подоскин¹, Д.Н. Романович¹, В.С. Головин¹, С.О. Слипченко¹,
Н.А. Пихтин¹, Т.А. Багаев², М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк², В.А. Симаков²

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

² АО „Научно-исследовательский институт „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия

E-mail: gavrina@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 28 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 23 января 2019 г.

Принято к публикации 25 января 2019 г.

Предложена методика определения пространственно-временной динамики тока в полупроводниковых гетероструктурах, основанная на модуляции внешнего излучения при прохождении через исследуемый кристалл. Апробация методики проведена на полупроводниковых лазерах-тиристорах на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs. Продемонстрировано качественное совпадение результатов эксперимента с результатами предыдущих измерений пространственно-временной динамики в приборе.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.08.47612.17662

Работа сильноточных приборов зачастую сопровождается локализацией тока с формированием токовых шнуров, что приводит к перегреву структуры и понижению надежности прибора. Экспериментальные методы исследования шнурования тока в структурах базируются на регистрации изменения термических, электрических или оптических характеристик прибора. Методика обнаружения локального повышения температуры в приборе с помощью тепловизионных камер (см., например, [1]) имеет пространственное разрешение на уровне десятков микрометров, временное разрешение обычно отсутствует. Метод 2D TIM (transient interference mapping) [2–4] использует эффект изменения фазы оптического луча при прохождении через полупроводник и отражении от внешней поверхности прибора. Временное разрешение методики определяется шириной оптического импульса. Возникновение и исчезновение доменов сильного поля можно отследить с помощью анализа токовой динамики (см., например, [5]) и вольт-амперных характеристик приборов, что было показано в работах [6–9]. Однако возможности электрических методов исследования структур с распространением включенного состояния ограничены. В [6,8,10] положение токовых шнуров определяется по спонтанному излучению в области с повышенной плотностью тока, однако такой способ может иметь меньшую эффективность при работе с приборами на основе непрямозонных полупроводниковых материалов.

В настоящей работе предлагается методика измерения пространственно-временной токовой динамики в полупроводниковых гетероструктурах, основанная на эффектах модуляции диагностического оптического излучения при прохождении через область с высокой плотностью тока. За основу взят подход из работы [11], где оце-

ниваются оптические потери в волноводе мощного полупроводникового лазера с шириной полоска 100 μm по модуляции проходящего через волновод внешнего излучения от полупроводникового лазера с такой же шириной полоска поглощением на свободных носителях заряда. Нашим объектом исследования был выбран лазер-тиристор (ЛТ) полосковой конструкции (ширина полоска 200 μm), содержащий в одном кристалле оптопару лазерный диод–фототранзистор (см. [12]). Схематически конструкция, составы слоев и электрическая схема ЛТ представлены на рис. 1. На анод и катод подается постоянное напряжение, импульс управления амплитудой десятки-сотни миллиампер запускает инжекцию носителей заряда в лазерную часть. Собственное спонтанное излучение ЛТ частично поглощается в слаболегированной базе p -GaAs, создавая начальные носители заряда для процесса ударной ионизации. В [13] показано, что комбинация эффектов фотогенерации и ударной ионизации в узкой области сильного поля вблизи коллекторного p - n -перехода приводит к быстрому переводу ЛТ в состояние с низким дифференциальным сопротивлением, т.е. во включенное состояние. Однако флуктуации плотности тока в параллельной эпитаксиальным слоям плоскости (в том числе возникающие из-за неоднородной фотогенерации носителей заряда в базе p -GaAs) в условиях наличия ударной ионизации способствуют формированию токовых шнуров, проходящих перпендикулярно слоям гетероструктуры. В работе [10] по динамике собственного излучения из лазерной части были обнаружены области начального включения ЛТ, располагающиеся вблизи контактов управления. В связи с этим целесообразно провести сравнение результатов настоящей работы с результатами [10].

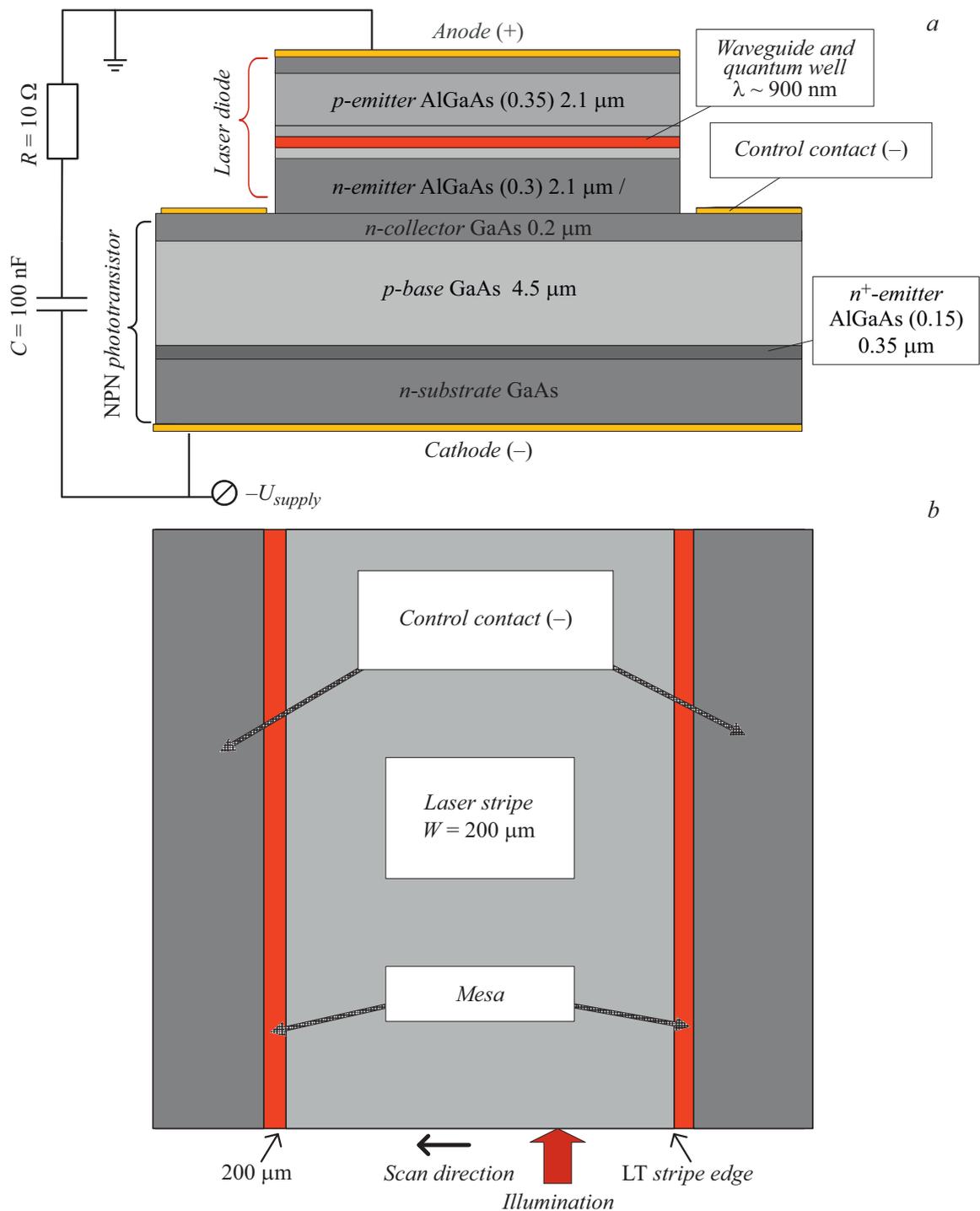


Рис. 1. Схематическое изображение лазера-тиристора. *a* — вид со стороны торца кристалла ЛТ, *b* — вид сверху.

В эксперименте ввод излучения осуществлялся в базовую область *p*-GaAs в направлении оси резонатора (рис. 1, *b*) с помощью оптической схемы, представленной на рис. 2, *a*. В качестве источников диагностического излучения использовались два типа полупроводниковых лазеров полосковой конструкции, излучающих в спектральном диапазоне, для которого слой базы *p*-GaAs оптически прозрачен. Для первой демонстрации на-

личия модуляции (по аналогии с упомянутой выше работой [11]) проходящего через кристалл излучения был выбран лазер-источник с шириной полоска 100 μm (λ ~ 1060 nm) при ширине полоска ЛТ 200 μm. Однако для получения пространственного разрешения методики было необходимо принимать меры по уменьшению апертуры лазера-источника. Для проведения пространственного сканирования вдоль торца кристалла ЛТ

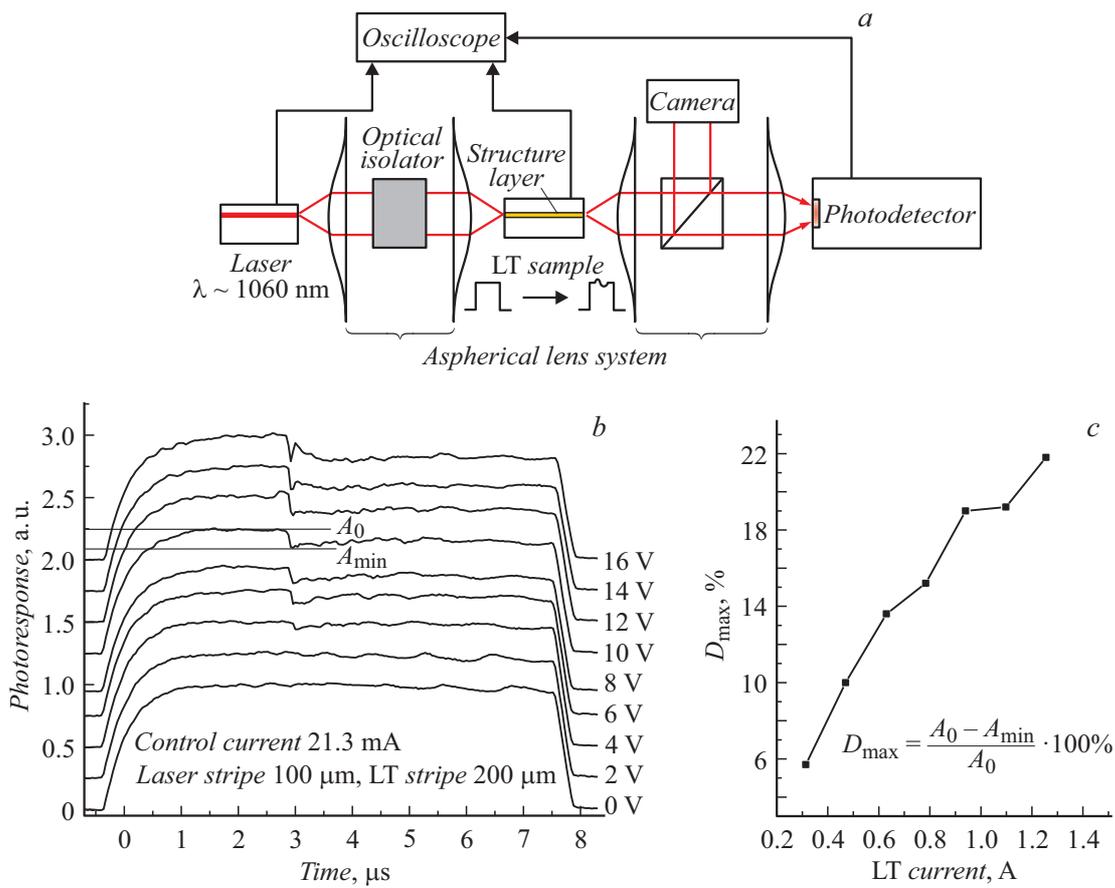


Рис. 2. *a* — оптическая схема эксперимента; *b* — фотоотклик от излучения многомодового лазера с шириной полоска 100 μ m, прошедшего через базовую область ЛТ, при напряжениях питания от 0 до 16 В; *c* — зависимость максимальной глубины модуляции D_{max} прошедшего через ЛТ излучения от амплитуды протекающего через ЛТ тока.

применялся лазер-источник с шириной полоска 5 μ m ($\lambda \sim 1128$ nm), что позволило получить на выходе из кристалла ЛТ длиной 1 mm апертуру пучка менее 20 μ m. При этом сканирование осуществлялось посредством перемещения кристалла ЛТ, размещенного на подвижном столике, относительно оптической оси лазера-источника.

На рис. 2, *b* представлены временные зависимости фотооткликов от прошедшего через ЛТ излучения от лазера-источника с шириной полоска 100 μ m при различных амплитудах протекающего через ЛТ тока. Отчетливо видна отрицательная модуляция амплитуды излучения на фоне прямоугольного импульса при приложенных напряжениях, превышающих 4 В. Как и в работе [11], модуляция может быть связана с поглощением диагностического излучения на свободных носителях заряда, при этом амплитуда модуляции пропорциональна плотности протекающего тока. За максимальную глубину модуляции D_{max} примем разность между амплитудой первоначального уровня оптического сигнала A_0 (в ходе эксперимента оставалась постоянной) и минимальной амплитудой оптического сигнала A_{min} (для наглядности уровни A_0 и A_{min} на рис. 2, *b* показаны горизонтальными

линиями для напряжения 10 В). Измеряя протекающий через ЛТ импульсный ток, можно построить зависимость максимальной глубины отрицательной модуляции D_{max} от амплитуды тока через ЛТ (рис. 2, *c*). Из рис. 2, *c* видно, что глубина модуляции может превышать 20% от первоначального уровня сигнала.

Рис. 3 показывает набор фотооткликов от прошедшего через кристалл ЛТ излучения лазера-источника с шириной полоска 5 μ m при пространственном сканировании в направлении от края полоска (вблизи контакта управления, нижний сигнал на рис. 3) к центру (верхний сигнал на рис. 3). Первоначальный уровень оптического сигнала показан горизонтальными штриховыми линиями для каждой пространственной координаты. Видно, что форма и глубина отрицательной модуляции различаются от одной координаты засветки к другой, что свидетельствует о существенно неоднородном протекании тока в ЛТ. Максимальная глубина отрицательной модуляции и скорость ее нарастания наблюдаются со стороны контакта управления, в то время как модуляция при засветке центральных участков торца ЛТ имеет меньшие фронт нарастания и амплитуду относительно первоначального уровня оптического сигнала. Можно

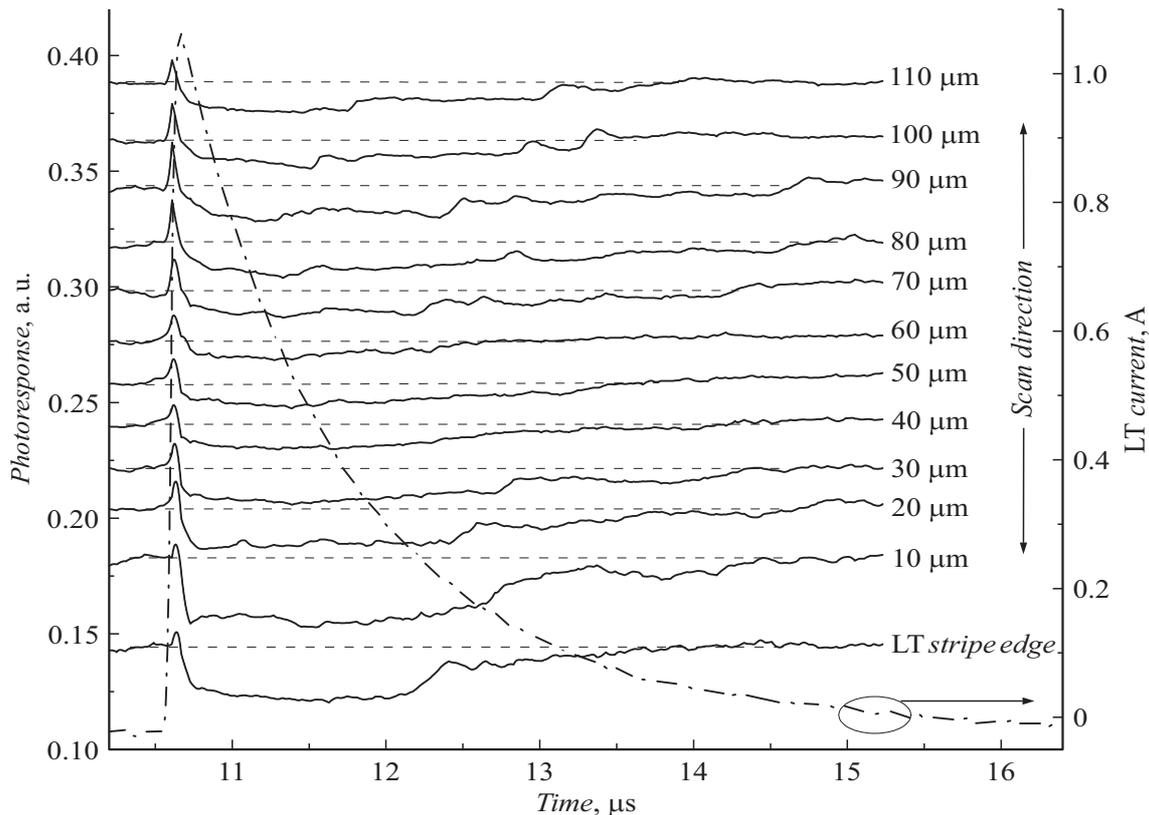


Рис. 3. Набор фотооткликов (сплошные линии) от излучения лазера с шириной полоска $5\mu\text{m}$ после прохождения базовой области ЛТ при пространственном сканировании образца в направлении от края кристалла (LT stripe edge) к центру до точки $110\mu\text{m}$ (штриховые линии — начальный уровень оптического сигнала) и импульс протекающего через ЛТ тока (штрихпунктирная линия, правая шкала).

сделать вывод о наличии шнурования тока на начальных этапах включения ЛТ вблизи контакта управления, что качественно повторяет результаты работы [10]. При этом можно отметить, что диаметр токового шнура в момент времени с максимальной плотностью тока не превышает $20\mu\text{m}$.

Итак, в работе предложена методика исследования пространственно-временной токовой динамики в полупроводниковых приборах на основе эпитаксиальных гетероструктур, основанная на модуляции излучения при прохождении через кристалл. Испытания методики на низковольтных ЛТ показали качественное совпадение результатов с предыдущими оценками пространственной динамики собственного излучения ЛТ из работы [10]. Однако по сравнению с подходом [10] предлагаемая методика является более универсальной, поскольку не требует наличия собственного излучателя в гетероструктуре. Ее пространственное разрешение определяется точностью позиционирования кристалла относительно максимума оптического пучка и расходимостью пучка внутри кристалла и составляет на данный момент $10\mu\text{m}$. Временное разрешение, задаваемое характеристиками измерительного оборудования, составляет 1ns . Кроме того, по общему снижению амплитуды проходящего излучения можно судить о степени поврежденности

прибора вследствие образования дефектов в местах повышенной плотности тока. Дальнейшая работа будет направлена на совершенствование предлагаемой методики с целью повышения ее информативности.

П.С. Гаврина и О.С. Соболева выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (договор № 18-38-00906 „Закономерности формирования и развития пространственных неоднородностей тока в низковольтных полупроводниковых гетероструктурах с нелинейной обратной связью“).

Список литературы

- [1] Hempel M., Tomm J.W. // Novel in-plane semiconductor lasers XIII. International Society for Optics and Photonics, 2014. V. 9002. P. 90021H. DOI: 10.1117/12.2035488
- [2] Pogány D., Dubec V., Bychikhin S., Furbock C., Litzemberger A., Groos G., Stecher M., Gornik E. // IEEE Electron Dev. Lett. 2002. V. 23. N 10. P. 606–608. DOI: 10.1109/LED.2002.803752
- [3] Pogány D., Bychikhin S., Furbock C., Litzemberger M., Gornik E., Groos G., Esmark K., Stecher M. // IEEE Trans. Electron Dev. 2002. V. 49. N 11. P. 2070–2079. DOI: 10.1109/TED.2002.804724

- [4] *Haberfehlner G., Vychikhin S., Dubec V., Heer M., Podgaynaya A., Pfost M., Stecher M., Gornik E., Pogany D.* // *Microelectron. Reliab.* 2009. V. 49. N 9-11. P. 1346–1351.
DOI: 10.1016/j.microrel.2009.07.032
- [5] *Левинштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С.* Эффект Ганна. М.: Сов. радио, 1975. 288 с.
- [6] *Кернер Б.С., Синкевич В.Ф.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1982. Т. 36. В. 10. С. 359–362.
- [7] *Сергеев В.А., Куликов А.А.* // *Радиоэлектронная техника.* 2012. № 1. С. 66–72.
- [8] *Вайнштейн С.Н., Жиляев Ю.В., Левинштейн М.Е.* // *Письма в ЖТФ.* 1988. Т. 14. В. 16. С. 1526–1530.
- [9] *Vainshtein S., Yuferev V., Palankovski V., Ong D.S., Kostamovaara J.* // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. N 6. P. 062114. DOI: 10.1063/1.2870096
- [10] *Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Tarasov I.S.* // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 121. N 5. P. 054502.
DOI: 10.1063/1.4975411
- [11] *Веселов Д.А., Пихтин Н.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Шамахов В.В., Шашкин И.С., Воронкова Н.В., Тарасов И.С.* // *Квантовая электроника.* 2015. Т. 45. № 7. С. 604–606.
- [12] *Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Gorbatyuk A.V.* // *IEEE Trans. Electron Dev.* 2015. V. 62. N 1. P. 149–154. DOI: 10.1109/TED.2014.2372317
- [13] *Yuferev V.S., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Slipchenko S.O.* // *IEEE Trans. Electron Dev.* 2015. V. 62. N 12. P. 4091–4096.
DOI: 10.1109/TED.2015.2483371