

Эффективность управления мощного лазера-тиристора, излучающего в спектральном диапазоне 890–910 нм

© 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⁺

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
⁺ НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха,
117342 Москва, Россия

(Получена 21 октября 2013 г. Принята к печати 1 ноября 2013 г.)

Разработана конструкция мощного лазера-тиристора, обеспечивающая низкие токовые и оптические потери при использовании малосигнального токового управления. Показана возможность управления временем задержки включения лазерной генерации мощного лазера-тиристора в диапазоне 8–2600 нс. Минимальные значения энергии и амплитуды импульса плотности тока управления, необходимые для включения лазера-тиристора с пиковой выходной оптической мощностью 28 Вт, составили 1.4 нДж и 0.6 А/см² соответственно.

Решение задачи генерации лазерных импульсов устройствами на основе полупроводниковых гетероструктур востребовано во многих практических приложениях: системы дальнометрии [1], интегральные информационные системы [2], различные области медицины [3]. Обычно генераторы лазерных импульсов имеют в своем составе полупроводниковый лазер и внешний источник импульсного тока накачки [4,5]. Такой подход обладает рядом недостатков, связанных с необходимостью согласования полупроводникового лазера с источником накачки, наличием паразитных связей, проявляющихся при генерации мощных токовых импульсов, снижающих общую энергетическую эффективность и быстродействие системы. Кроме этого, использование внешних источников не всегда позволяет реализовать преимущество полупроводниковых лазеров, связанное с малыми размерами. Особую сложность задача реализации импульсной токовой накачки приобретает при построении систем, включающих сотни и тысячи одиночных излучателей, как мощных, так и маломощных [6]. Здесь, помимо требований к силовой части источника, возникает вопрос об энергетической эффективности генерируемых сигналов управления такой системой. Наиболее перспективным решением является использование приборов, объединяющих функции импульсных источников с малосигнальным управлением и лазерных излучателей. В работе [7] впервые были представлены результаты исследования оптических характеристик мощного лазера-тиристора. Интеграция мощного быстродействующего ключа с эффективной лазерной гетероструктурой позволила показать возможность генерации оптических импульсов с амплитудой 28 Вт и длительностью 10–100 нс. Целью настоящего сообщения является исследование временных и энергетических характеристик малосигнального управления

при включении лазерной генерации в мощном лазере-тиристере.

Экспериментальные образцы были изготовлены на основе тиристорной гетероструктуры с интегрированной лазерной гетероструктурой, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) (рис. 1). Лазерная часть была сформирована в верхнем р–п-переходе и обеспечивала генерацию в спектральном диапазоне 890–905 нм. Коллекторный р–п-переход формировался в эпитаксиальном слое GaAs и обеспечивал оптическую передачу дырочного тока за счет поглощения спонтанных фотонов, генерируемых активной областью на основе квантовой ямы (QW) InGaAs. Экспериментальные образцы имели полосковую конструкцию анода и управляющего электрода с шириной полоска 200 мкм. Анодный электрод также формировал излучающую апертуру лазерной части кристалла. Кристаллы выкальвывались из гетеро-

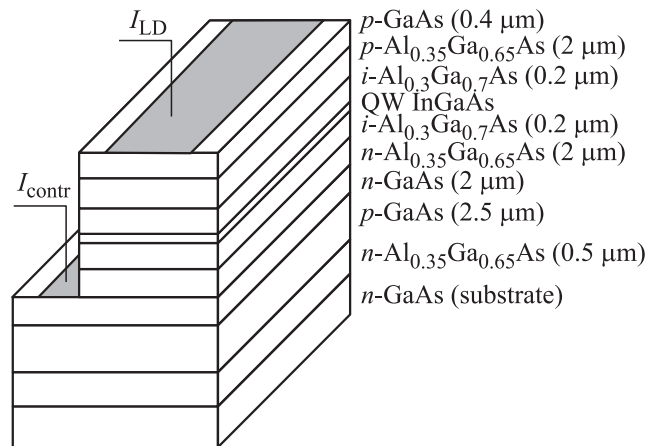


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции лазера-тиристора.

[¶] E-mail: serghpl@mail.ioffe.ru

структуры и монтировались подложкой вниз с помощью индиевого припоя на медные теплоотводы. Сколотые грани, перпендикулярные анодному электроду, формировали зеркала резонатора Фабри–Перо для лазерного излучения.

Схема включения лазера-тиристора состояла из источника постоянного напряжения, подключенного к анодному и катодному электродам лазера-тиристора, а также емкости, включенной параллельно.

Лазер-тиристор является бистабильным прибором и характеризуется двумя равновесными состояниями. Первое — когда лазер-тиристор закрыт и напряжения на коллекторном переходе и зарядной емкости равны напряжению внешнего источника. Это состояние может сохраняться сколь угодно долго, если внешние возмущающие факторы (ток управления, напряжение на коллекторном переходе) ниже порога включения тиристорной структуры. В этом случае все токи в системе пренебрежимо малы. Второе состояние — когда лазер-тиристор открыт. В этом случае через лазер-тиристор протекает ток I_{LD} , определяемый разностью потенциалов между катодом и анодом и сопротивлением тиристора в открытом состоянии. Переход из закрытого состояния в открытое — это динамический процесс, который включает в себя этап накопления критического заряда в p -базе и этап перехода в стационарное открытое состояние. При этом, если внешнее управление обеспечит накопление критического заряда в p -базе, управляющий импульс может быть выключен и лазер-тиристор самостоятельно перейдет в открытое состояние. Чтобы исследовать условия включения, в данной работе использовалось управление прямым током через лазерную часть гетероструктуры. Основными параметрами импульса управления являлись: амплитуда (I_{contr}) и длительность (t_{contr}), характеризуемая временем от начала импульса до момента включения лазерной генерации. На рис. 2 показаны типичные треки для импульса управления и оптического излучения лазера-тиристора, характеризующие временную задержку включения лазерной генерации. Исследования минимальных значений t_{contr} проводились для различных амплитуд импульсов управления и напряжений на коллекторном переходе (рис. 3). Так как основной механизм появления избыточных дырок в p -базе это фотогенерация, то определяющим для достижения критической концентрации является отношение скорости фотогенерации в p -базе, связанной со скоростью спонтанной рекомбинации в активной области лазерной гетероструктуры, к скорости безызлучательной рекомбинации в p -базе. Необходимо отметить, что в исследуемых образцах только часть общего спектра спонтанного излучения эффективно поглощается в p -базе. В результате для области низких уровней возбуждения снижение амплитуды тока управления дает сверхлинейный рост времени задержки. Этот факт связан со снижением доли в коротковолновой области спектра спонтанного излучения, эффективно поглощаемого p -базой. В итоге минимальная плотность

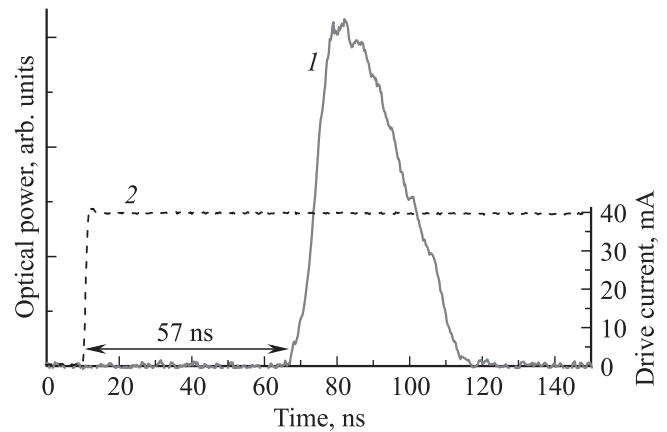


Рис. 2. Динамика управляемого включения лазера-тиристора при напряжении питания 8 В: 1 — оптический сигнал лазера, 2 — управляющий сигнал.

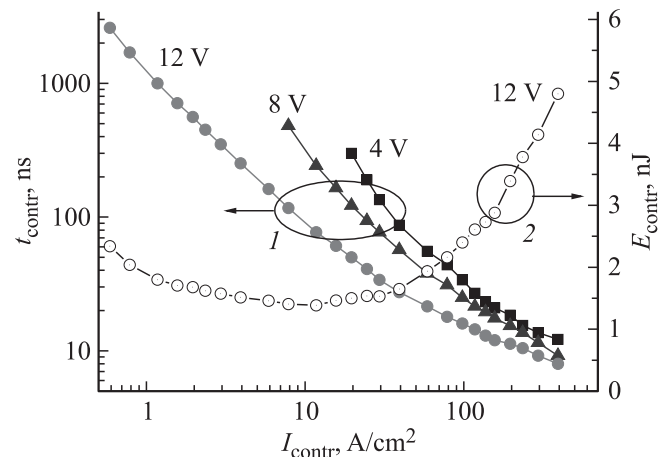


Рис. 3. Динамика включения лазера-тиристора при различных уровнях управляющего сигнала: 1 — зависимости от тока времени задержки включения лазера-тиристора при питающих напряжениях 4, 8 и 12 В, 2 — зависимость от тока энергии импульса управления E_{contr} для питающего напряжения 12 В.

тока накачки, обеспечивающая стабильное включение, составила 0.6 A/cm^2 , при этом задержка включения лазерной генерации составила 2.6 мкс. В области околопороговых уровней возбуждения с ростом амплитуды тока управления наблюдается сублинейная зависимость времени t_{contr} от тока I_{contr} . Это связано с ростом вклада усиленной люминесценции, характеризующей преимущественной направленностью вдоль оси резонатора Фабри–Перо. В результате меньшая доля спонтанно распространяется в сторону p -базы. Максимальное значение амплитуды импульса тока управления ограничивалось порогом генерации лазерной части гетероструктуры, выше которого рост интенсивности спонтанного излучения насыщался. В итоге минимальное время задержки включения составило 8 нс при амплитуде плотности тока управления 390 A/cm^2 . Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале разработанного

лазера-тиристора для генерации высокочастотной последовательности лазерных импульсов с использованием малосигнального управления.

Из полученных экспериментальных зависимостей (рис. 3) видно, что напряжение на коллекторном переходе является критически важным параметром для оптимизации времени задержки включения. Наиболее явно это проявляется при низких уровнях управляющих сигналов. Так, при минимальном напряжении на коллекторном переходе 4 В минимальная плотность тока, при котором сохраняются устойчивое включение, составляет 20 A/cm^2 при $t_{\text{cont}} = 300 \text{ нс}$, тогда как на 12 В для того же значения t_{cont} амплитуда плотности тока снижается до 3.4 A/cm^2 . Влияние напряжения на коллекторном переходе на время задержки связано с изменением толщины p -базы и вовлечением в эффективный сбор фотогенерированных дырок из области n -базы, граничащей с коллекторным переходом. Отдельно необходимо отметить такой фактор роста избыточных носителей, как лавинное размножение в области объемного заряда коллекторного перехода.

С этой целью отдельно оценивалась энергетическая эффективность управления в рассматриваемых экспериментальных образцах. Из рис. 3 видно, что для всего исследуемого интервала энергии, затраченная на генерацию одного импульса управления, находится в диапазоне нескольких нДж при условии, что энергия одного лазерного импульса, генерируемого лазером-тиристором, превышает 1 мкДж [7]. Однако зависимость немонотонна, и минимальное значение энергии сигнала управления 1.4 нДж достигалось при плотности тока управления 12 A/cm^2 и времени задержки включения 77 нс. При оценке потенциальной энергетической эффективности управления в информационных системах необходимо учитывать существенное снижение площади элементов по сравнению с исследованными экспериментальными образцами. В этом случае оптимизация исследуемой гетероструктуры и конструкции лазера-тиристора должна позволить снизить энергозатраты на управление до уровня несколько пДж и ниже. Важно отметить, что полученные экспериментальные результаты по управляемому включению лазера тиристора обеспечиваются в том числе и при генерации пиковой оптической мощности 28 Вт.

Результаты данной работы показывают, что предложенный подход к конструированию интегральной гетероструктуры, включающей высоковольтный ключ и область эффективной лазерной генерации, позволяет достичь рекордной эффективности при использовании малосигнального управления для генерации мощных лазерных импульсов. Также можно отметить существующие потенциальные возможности по улучшению характеристик малосигнального управления за счет оптимизации области фотогенерации в коллекторном переходе и p -базе.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашения № 8694.

Список литературы

- [1] В.Н. Назаров, И.Ф. Балашов. *Энергетическая оценка импульсных лазерных дальномеров* (СПбГУ ИТМО, 2002).
- [2] Woon-Kyung Choi, Doo-Gun Kim, Yon-Tae Moon, Do-Gyun Kim, Young-Wan Choi, Lee, Seok, Deok-Ha Woo. *Proc. OFC/NFOEC'07* (Anaheim, 2007) p. OThT7.
- [3] G.S. Sokolovskii, S.B. Onikienko, A.V. Zemlyanoi, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, V.A. Margulis, I.V. Guzova. *14 Междунар. конф. „Laser Optics“* (СПб., Россия, 2010).
- [4] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, А.В. Рожков, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Боршев, И.С. Тарасов. *Письма ЖТФ*, **32** (16), 47 (2006).
- [5] X. Wang, P. Crump, A. Pietrzak, C. Schultz, A. Klehr, T. Hoffmann, A. Liero, A. Ginolas, S. Einfeldt, F. Bugge, G. Erbert, G. Tränkle. *Proc. SPIE*, **7198**, 71 981G (2009).
- [6] В.П. Коняев, А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин, Т.А. Багаев, М.В. Зверков, В.В. Кричевский, А.А. Падалица, С.М. Сапожников, В.А. Симаков. *ФТП*, **48** (1), 104 (2014).
- [7] 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. Padalitsa, V.A. Simakov. *Photonics Technol. Lett. IEEE*, **25** (17), 1664 (2013).

Редактор Л.В. Шаронова

The control efficiency of high power laser-thyristor emitting in the 890–910 nm spectral range

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⁺

Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia
⁺ Stel'makh Research and Development Institute „Polyus“, 117342 Moscow, Russia

Abstract High power laser-thyristor construction providing low current and optical losses was developed. Control of laser thyristor generation turn on time delay from 8 to 2600 ns was demonstrated. The minimum values of energy and control signal current density amplitude required for laser-thyristor turn on at peak output power of 28 W were 1.4 nJ and 0.6 A/cm^2 , respectively.