

**Излучатели лазерных диодов с длительностью оптического импульса менее 10 нс**Р.В. Дибольский<sup>1,\*</sup>, А.Н. Туркин<sup>1,†</sup>, А.М. Морозюк<sup>2,‡</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стальмаха Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1

(Поступила в редакцию 04.06.2024; подписана в печать 01.07.2024)

В последнее время всё больше возрастает интерес к мощным импульсным полупроводниковым лазерам. Это объясняется их высокой эффективностью, а также широкими возможностями практического применения этих источников света, в частности, для передачи данных в открытом пространстве, метрологии, системы машинного зрения (LiDAR) и т.п. Обычно генераторы лазерных импульсов имеют в своем составе полупроводниковый лазер и внешний источник импульсного тока накачки. 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. 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. Интеграция мощного быстродействующего ключа с эффективной лазерной гетероструктурой позволила показать возможность генерации оптических импульсов с длительностью менее 10 нс.

PACS: 42.55.-f УДК: 535-1

Ключевые слова: лазер-тиристор, интегральная сборка, управляющий электрод, потенциальный барьер.

**ВВЕДЕНИЕ**

Наиболее доступный способ генерации оптических импульсов в лазерных диодах (ЛД) на основе полупроводниковых наногетероструктур — это прямая накачка ЛД от источника импульсов тока. Однако, обеспечение требуемых уровней и временных параметров излучения ЛД при использовании внешних дискретных элементов, требует создания сложных импульсных генераторов, вследствие чего такие устройства являются дорогостоящими и не всегда достаточно эффективными.

Принципиально новым решением проблемы накачки является монолитная интеграция тиристорного ключа, как генератора импульсного тока накачки, непосредственно с областью оптического усиления полупроводникового лазера, что обеспечивает автоматическое согласование полупроводникового лазера с низким последовательным сопротивлением с тиристорным ключом и подавление паразитных индуктивностей при коммутации наносекундных импульсов [1–6].

Разработка современной технологии создания эпитаксиально-интегрированных наногетерострук-

тур, в которых совмещены функции низковольтного быстродействующего тиристорного ключа и мощного полупроводникового лазера, позволит создать новое поколение мощных импульсных источников излучения — лазер-тиристор. Тиристор — это полупроводниковый прибор, выполненный на основе монокристалла полупроводника с тремя или более *p-n*-переходами, который может переключаться между двумя устойчивыми состояниями: «открытое» состояние (состояние высокой проводимости) и «закрытое» состояние (состояние низкой проводимости) [7]. После открытия тиристора величина тока протекающего через лазерный диод (ЛД) определяется суммарным последовательным сопротивлением  $R_k$  пары лазер-тиристор:

$$I = V_B / R_k. \quad (1)$$

Средняя мощность импульса излучения  $P$  при заданной величине тока накачки определяется Ватт-амперной характеристикой ЛД и равна:

$$P = S(I - I_{th}), \quad (2)$$

где  $S$  — эффективность преобразования тока в свет (наклон ватт-амперной характеристики),  $I_{th}$  — пороговый ток ЛД.

\* dibolskii.rv@physics.msu.ru

† andrey@turkin.su

‡ forester325@list.ru

## 1. ТИРИСТОР

Тиристор является не полностью управляемым прибором. Его можно перевести в проводящее состояние сигналом управления, но для того, чтобы выключить, необходимо обеспечить спад прямого тока до нуля. Тиристор имеет четырёхслойную структуру  $p-n-p-n$  и три вывода: анод  $A$ , катод  $C$  и управляющий электрод  $G$  (см. рис. 1).

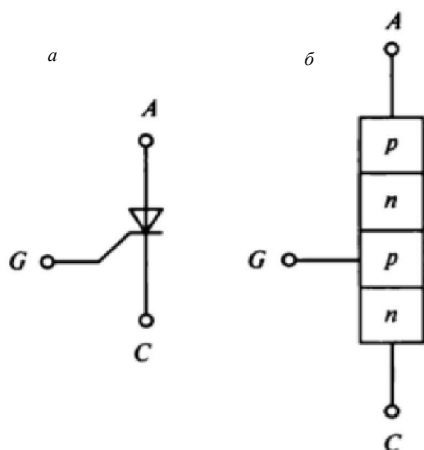


Рис. 1. Традиционный тиристор:  $a$  — графическое обозначение;  $b$  — вид четырёхслойной структуры [8]

Вольтамперная характеристика (ВАХ) идеального тиристора показана на рис. 2,  $a$ . Тиристор может проводить ток в одном направлении в открытом состоянии, а в закрытом — выдерживать прямое и обратное напряжение. ВАХ реального прибора, проводящего в одном направлении, показана на рис. 2,  $b$ . На нём изображено семейство кривых, соответствующих различным значениям тока управляющего электрода  $I_G$ . Отличительной особенностью вольтамперных характеристик тиристорных приборов является наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, на котором происходит быстрое переключение прибора из закрытого состояния в открытое.

Предельное прямое напряжение, которое выдерживает тиристор без его включения, имеет максимальное значение при  $I_G = 0$ . При увеличении управляющего тока прямое напряжение снижается (см. рис. 2). Включенному состоянию тиристора соответствует ветвь 4, выключенному — участок 1–2, а процессу включения соответствует участок 2–3. Ток удержания  $I_k$  равен минимальному допустимому значению прямого тока, при котором тиристор остается в проводящем состоянии. Зависимость тока утечки от обратного напряжения соответствует ветви 5.

При превышении обратного напряжения до значений более  $U_{B0}$  начинается резкое возрастание обратного тока, приводящее к пробое тиристора. Такой пробой может быть необратимым, т.е. приводить к выходу прибора из строя. На тиристорах обычно указывается

повторяющееся и неповторяющееся максимально допустимое напряжения. Повторяющееся напряжение — это напряжение, которое тиристор выдерживает без пробоя каждый период на рабочей частоте. Неповторяющееся напряжение — это напряжение, которое тиристор выдерживает однократно с последующим длительным перерывом, необходимым для восстановления его структуры.

Существует множество различных видов тиристорных приборов. По типу проводимости их принято разделять на несимметричные, которые проводят ток в одном направлении, и симметричные тиристоры — симисторы, проводящие ток в обоих направлениях. По способу управления тиристоры подразделяют на [9]:

1. Диодные тиристоры (динисторы) — такие приборы не имеют управляющего электрода, их открытие происходит импульсом высокого напряжения между анодом и катодом;
2. Тривоидные тиристоры (тринисторы) — такие приборы имеют управляющий электрод, они не переходят в проводящее состояние при прямом напряжении анод-катод без подачи импульса тока на управляющий электрод.

Тиристоры применяются в основном для создания на их основе силовых тиристорных ключей, главное преимущество которых в сравнении с другими типами заключается в возможности управления большими нагрузками слабым управляющим сигналом.

Лазерный излучатель, управление которого производится тиристорным ключом, выполненный путём соединения тиристора и лазерного диода, называется лазер-тиристором.

## 2. МОДЕЛЬ ЛАЗЕРА-ТИРИСТОРА

Конструкция лазера-тиристора приведена на рис.3.

На подложке  $n$ -GaAs последовательно формируются слои  $n$ -GaAlAs (1),  $p$ -GaAs (2), которые являются, соответственно, коллектором и  $p$ -базой тиристора. Далее выращиваются слои лазерной гетероструктуры: эмиттер  $n$ -GaAlAs (3), волноводный слой GaAlAs (4), активный слой InGaAs (5), волноводный слой GaAlAs (6), эмиттер  $p$ -GaAlAs (7) и контактный слой  $p$ -GaAs. Слои лазерной гетероструктуры  $n$ -типа проводимости образуют  $n$ -базу тиристора.

При подаче на  $p$ -контакт лазера-тиристора напряжения  $V$  положительной полярности  $p$ - $n$  переход между  $p$ -базой (2) и  $n$ -эмиттером (3) смещается в обратном направлении (см. рис. 3).

Все приложенное напряжение  $V$  падает на обратном смещенном  $p$ - $n$  переходе. Толщина слоя объемного пространственного заряда (ОПЗ), образованного отрицательно заряженными ионами примеси (акцепторами) и положительно заряженными ионами примеси (донорами) зависит от уровня легирования слоев 2 и 3 тиристора и напряжения  $V$  [10].

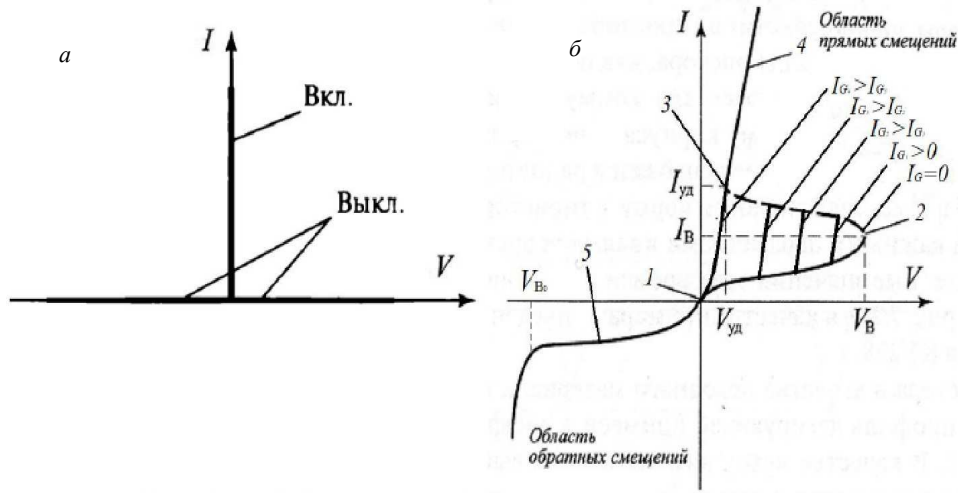


Рис. 2. Вольтамперная характеристика: а — идеального тиристора, б — реального тиристора [9]

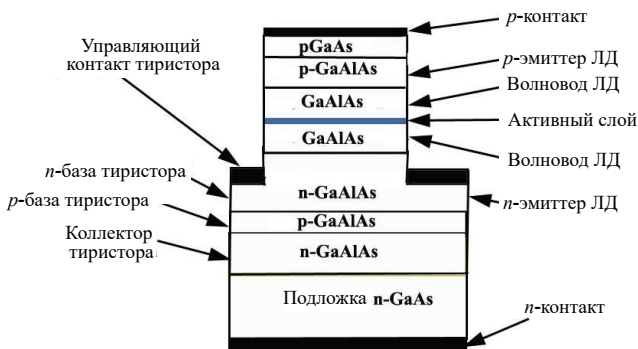


Рис. 3. Конструкция лазера-тиристора

При отсутствии напряжения на управляющем электроде увеличение  $V$  приводит к возрастанию толщины слоя ОПЗ. Если некотором значении  $V_B$  толщина ОПЗ обратно смещенного  $p-n$  перехода становится равной толщине  $p$ -базы, то электрическое поле ОПЗ вытягивает электроны из  $n$ -коллектора (1), которые после дрейфа через  $p$ -базу (2) попадают в слой (3) и захватываются положительно заряженными ионами донорной примеси (см. рис. 4, а, б, в). Это приводит к снижению потенциального барьера обратного смещенного  $p-n$  перехода и возникновению тока электронов из  $n$ -коллектора (1). Одновременно с этим происходит перераспределение электрического потенциала в слоях активного элемента, следствием чего является инжекция дырок из  $p$ -эмиттера.

Процесс открытия тиристора сопровождается появлением на вольтамперной характеристике участка с отрицательным сопротивлением (рис. 2). Величина полного тока через тиристор после полного снятия потен-

циального барьера на обратном смещенном  $p-n$  переходе определяется омическим сопротивлением  $r$  слоев тиристора (участок 4 на рис. 2).

Наличие управляющего электрода даёт возможность целенаправленного управления процессом снятия потенциального барьера на обратном смещенном  $p-n$  переходе (рис. 4). При подаче на управляющий контакт тиристора отрицательного напряжения в слое (3), который является  $n$ -базой тиристора, появляются электроны, которые начинают захватываться положительно заряженными ионами донорной примеси (рис. 4, б). Это приводит к снижению потенциального барьера на обратном смещенном  $p-n$  переходе, и появлению электронного тока из  $n$ -коллектора (1) и тока дырок из  $p$ -эмиттера (7). При соответствующем выборе напряжения, подаваемого на управляющий контакт, происходит полное снятие потенциального барьера на обратном смещенном  $p-n$  переходе (рис. 4, в), и возникает накачка лазерного диода протекающим током.

### 3. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальной особенностью схемы накачки лазера-тиристора является использование формирователя импульса заряда — устройства, которое открывает и закрывает цепь заряда конденсатора (см. рис. 5). В этом случае цепь источника питания автоматически разрывается после окончания импульса напряжения, подаваемого от генератора 1 на формирователь. Зарядка конденсатора прекращается, и напряжение на конденсаторе составляет величину

$$V_c = V[1 - \exp\left(-\frac{t_1}{RC}\right)], \quad (3)$$

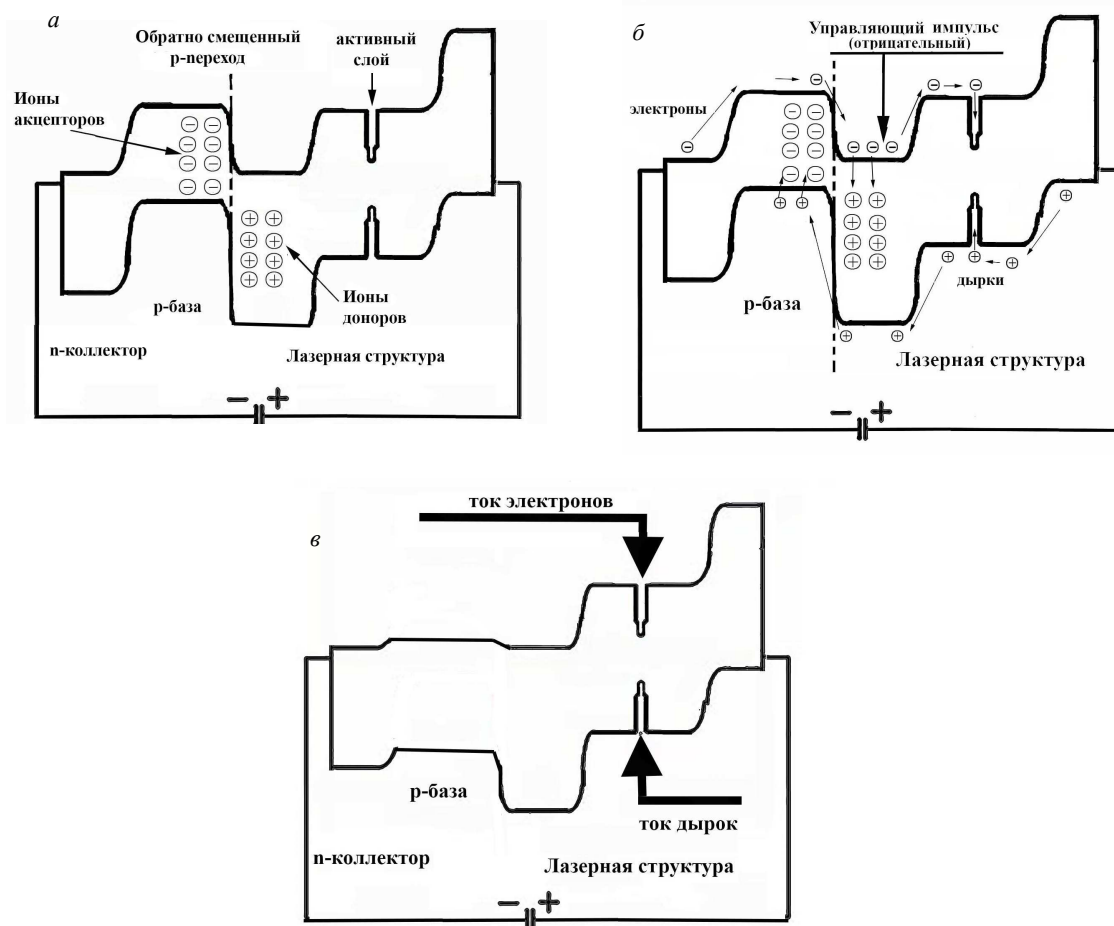


Рис. 4. Накачка лазерного диода протекающим током: *a* — при отсутствии смещения, *б* — при подаче отрицательного электрического импульса на управляющий электрод; *в* — Распределение токов в открытом лазер-тиристоре

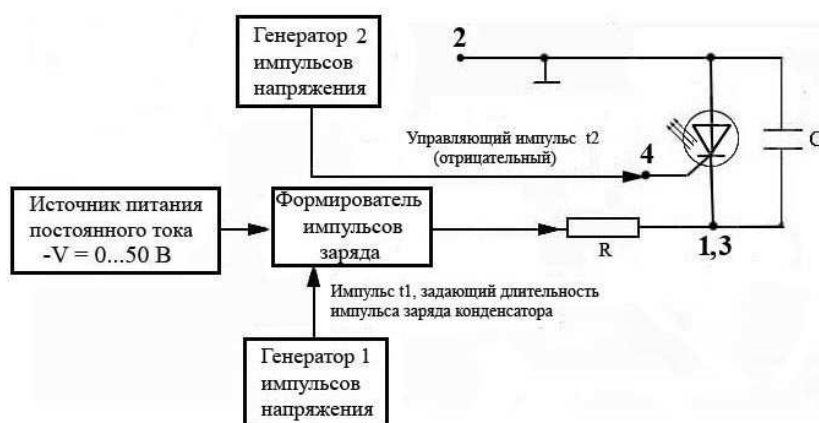


Рис. 5. Блок-схема накачки лазера-тиристора

где  $t_1$  — длительность импульса напряжения, подаваемого на формирователь от генератора 1.

Таким образом, напряжение  $V_c$  на конденсаторе определяется длительностью задающего импульса  $t_1$ ,

величиной зарядного сопротивления  $R$  и ёмкостью  $C$  конденсатора, установленного в излучателе. При этом напряжение, до которого заряжается конденсатор, не может превышать напряжения  $V$  на выходе источника

питания. После открытия лазера-тиристора управляющим импульсом  $t_2$  от генератора 2 происходит полный разряд конденсатора. При этом формирователь закрыт, и блокирует протекание тока от источника питания.

Напряжение питания отрицательной полярности подаётся на вход пульта проверки лазера-тиристора (ППЛТ) от источника питания постоянного тока. Длительность импульса заряда конденсатора задается генератором импульсов напряжения 1, амплитуда импульса заряда равна величине постоянного напряжения, подаваемого от источника питания постоянного тока.

Длительность импульса запуска лазера-тиристора определяется генератором импульсов напряжения 2, синхронизированным с генератором 1. Импульс запуска смещён относительно импульса заряда на 5...10 мкс.

Импульс заряда поступает на ножку корпуса 3, управляющий импульс подаётся на ножку корпуса 1.

Пульт проверки лазер-тиристора (ППЛТ) обеспечивает накачку испытываемых образцов с частотой повторения до 20 кГц, и позволяет изменять амплитуду импульса заряда  $V$  в диапазоне 0...-50 В.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе эксперимента была исследована зависимость мощности излучения лазера-тиристора от тока накачки. Было установлено, что при токах накачки более 60 А увеличивается разогрев полупроводникового элемента протекающим током, следствием чего является снижение эффективности излучения интегрированного ЛД и соответствующее снижение средней мощности импульсов лазерного излучения (см. рис. 6). Из полученных данных видно, что использование теплоотвода позволяет снизить температуру излучающего элемента, и увеличить мощность импульсов излучения.

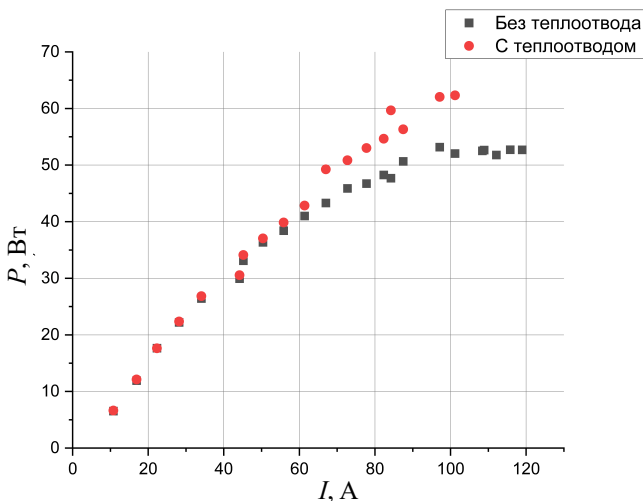


Рис. 6. Зависимость мощности импульса от тока накачки

На рис. 7 представлена зависимость длительности импульса от тока накачки.

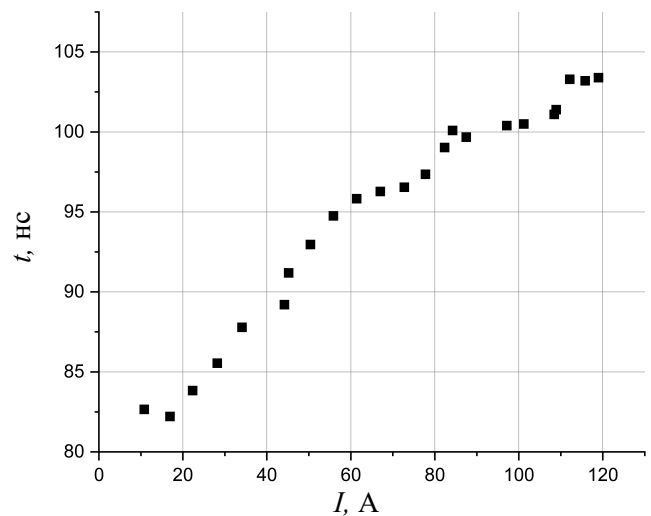


Рис. 7. Зависимость длительности импульса от тока накачки

Предполагалось, что значение тока накачки не оказывает заметного влияния на длительность импульса. Но при изменении значения тока от 10 А до 120 А длительность импульса увеличилась на 20%. Увеличение длительности светового импульса может быть связано с увеличением последовательного сопротивления полупроводникового кристалла при нагреве протекающим током.

Были получены зависимости длительности и мощности импульса от ёмкости конденсатора (см. рис. 8, 9).

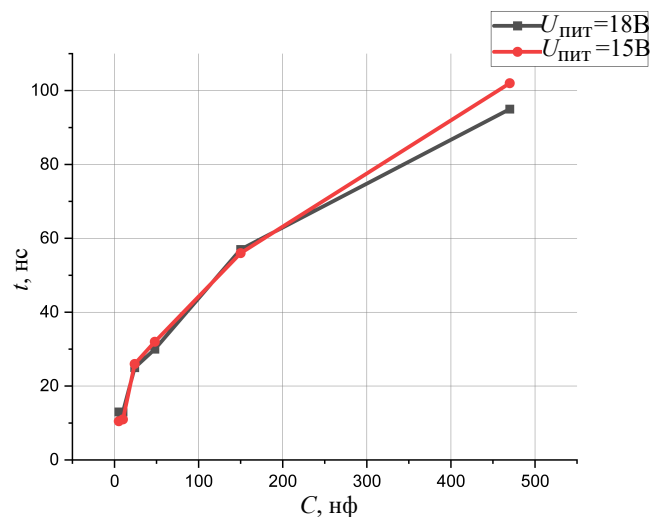


Рис. 8. Зависимость длительности импульса от ёмкости конденсатора

Как и ожидалось, уменьшение ёмкости конденсатора приводит к уменьшению длительности импульса до

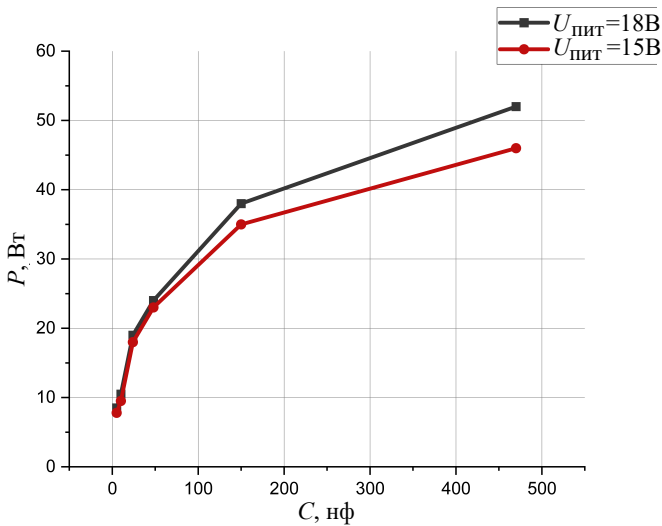


Рис. 9. Зависимость мощности импульса от ёмкости конденсатора

значений менее 10 нс. Так как энергия системы выражается формулой:

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (4)$$

где  $W$  — энергия системы,  $C$  — ёмкость конденсатора,  $U$  — напряжение на конденсаторе. При уменьшении ёмкости происходило уменьшение выходной мощности (см. рис. 9).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были получены импульсы излучения ЛД длительностью менее 10 нс. В качестве следующего этапа работы предполагается проведение исследований с целью дальнейшего увеличения мощности излучения световых импульсов с длительностью менее 10 нс.

Авторы выражают благодарность начальнику отдела НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха» Коняеву Вадиму Павловичу за помощь в написании статьи.

- [1] Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Rozhkov A.V. et al. // IEEE Photonics Technology Letters, **27**(3), 307 (2014).
- [2] Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Rozhkov A.V. et al. // J. of Appl. Phys. **116**(8), 084503 (2014).
- [3] Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Pikhtin N.A. et al. // IEEE Transactions on Electron Devices, **62**(1) 149 (2014).
- [4] Слипченко С.О., Подоскин А.А., Васильева В.В. и др. Программа и тезисы докладов 4-го Всероссийского симпозиума с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология», 17, 2014.
- [5] Слипченко С.О., Подоскин А.А., Пихтин Н.А. и др. «Статическая и динамическая модель мощного лазерного тиристора». Программа и тезисы докладов 4-го Всерос-

- сийского симпозиума с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология», 68, 2014.
- [6] Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Pikhtin N.A. et al. // In Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIV **9382**, p. 93821J, International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [7] Кублановский Я.С. Тиристорные устройства. М.: «Радио и связь», 1987.
- [8] Герлах В. Тиристоры, М.: «Энергоатомиздат», 1985.
- [9] Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. М.: «Издательский дом МЭИ», 2009.
- [10] Зу С. Физика полупроводниковых приборов. М.: «Мир», 1981.

## Laser diode emitters with optical pulse duration less than 10 ns

R.V. Dibolskii<sup>1,a</sup>, A.N. Turkin<sup>1,b</sup>, A.M. Morozyuk<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>Department of Optics, Spectroscopy and Physics of Nanosystems, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup>Research Institute Polyus named after M.F. Stelmakh Moscow 117342, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>dibolskii.ro@physics.msu.ru, <sup>b</sup>andrey@turkin.su, <sup>c</sup>forester325@list.ru

Recently, interest in high-power pulsed semiconductor lasers has been growing. This is explained by their high efficiency, as well as wide possibilities of practical application of these light sources, in particular, for data transmission in open space, metrology, machine vision systems (LiDAR), etc. Typically, laser pulse generators include a semiconductor laser and an external source of pulsed pump current. This approach has a number of disadvantages associated with the need to match the semiconductor laser with the pump source, the presence of parasitic connections that appear when generating high-power current pulses, reducing the overall energy efficiency and speed of the system. In addition, the use of external sources does not always allow realizing the advantage of semiconductor lasers associated with small dimensions. The task of implementing pulsed current pumping becomes especially difficult when building systems that include hundreds and thousands of single emitters, both high-power and low-power. Here, in

addition to the requirements for the power part of the source, the question arises about the energy efficiency of the generated control signals for such a system. The most promising solution is the use of devices that combine the functions of pulse sources with small-signal control and laser emitters. The integration of a powerful high-speed key with an effective laser heterostructure has made it possible to demonstrate the possibility of generating optical pulses with a duration of less than 10 ns.

PACS: 42.55.-f .

*Keywords:* laser-thyristor, integrated assembly, control electrode, potential barrier

*Received 04 June 2024.*

#### **Сведения об авторах**

1. Дибольский Роман Владимирович — студент; e-mail: dibolskii.rv@physics.msu.ru.
2. Туркин Андрей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: andrey@turkin.su.
3. Морозюк Александр Михайлович — вед. инженер; e-mail: forester325@list.ru.