

ных термоэлементов//Физическая электроника. 1980. № 21. С. 96—100.

22. Ащеулов А. А., Величук Д. Д., Черкез Р. Г., Романюк И. С. Радиационный анизотропный сенсор: Тр. IX МНПК "СИЭТ", 2008. — г. Одесса, 19—23 мая 2008.

23. Anatyshuk L. I., Vikhor L. N., Cherkez R. G. Computer simulation of functionally graded materials for thermoelectricity//Journal of Thermoelectricity. 1997. No. 3. P. 43—61.

24. Комп'ютерне проектування термоелектричних перетворювачів енергії. Методичні рекомендації/Укл.: Черкез Р. Г. — Чернівці: Рута, 2006. — 20 с.

25. Ащеулов А. А., Величук Д. Д., Романюк И. С. Методы и средства для контроля параметров ТЭО Пельтье // НПК "СИЭТ", Одесса-07. С. 269.

26. Ащеулов А. А., Бучковский И. А., Величук Д. Д., Романюк И. С. Методы бесконтактного контроля параметров ТЭМ Пельтье, их материалов и комплектующих//НПК "Сенсор-07", Одесса-07. С. 64, 65.

27. Ащеулов А. А., Величук Д. Д., Романюк И. С. Установка для экспресс-контроля глубины охлаждения термоэлектрических микромодулей Пельтье // ТКЭА. 2007. № 4. С. 35—38.

28. Пат. UA26486. Пристрій контролю параметрів ТЕМ Пельтье. / Ащеулов А. А., Величук Д., Романюк І. С.; Опубл. 25.09.2007; Бюл. № 15, 2007.

Статья поступила в редакцию 19 октября 2008 г.

## Modernized measuring device of parameters of microTEM Peltier

A. A. Ascheulov, D. D. Velichuk

Institute of Thermo-Electricity, Chernovcy, Ukraine

I. S. Romanyuk

Joint-Stock Company "Quartz", Chernovcy, Ukraine

*Short description of noncontact method and construction of measuring device of basic parameters of thermo-electric micromodules of Peltier is presented in the static and dynamic modes. As a sensor of temperature and thermal streams anisotropic thermo-electric touch-control, working in the mode of different-time comparing, is utilized.*

PACS: 85.30.-z

УДК 537.86:530.145; 621.373.5.038.825.2

## Джиттер периода следования импульсов генерации твердотельного лазера на кристалле $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ с диодной накачкой

М. И. Беловолов, А. Ф. Шаталов

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

*Приведены результаты экспериментального исследования импульсной генерации твердотельного неодимового лазера на кристалле кальций—галлий—германиевого граната  $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$  с диодной накачкой, частота  $F$  следования импульсов которого изменялась от 3 до 13 кГц при поглощенной мощности накачки от 0,45 до 1 Вт. Обнаружено, что джиттер периода импульсов генерации лазера зависит от  $F$  как  $1/F^\gamma$ , где  $\gamma = 1,3$ . Получены коэффициенты, определяющие чувствительность длительности и частоты импульсов генерации к изменениям длины резонатора и поглощенной мощности накачки.*

PACS: 06.20-r; 42.55.Xi; 42.55.Rz; 42.60.Pk

### Введение

В последнее время появился ряд работ [1—6], в которых исследуются твердотельные лазеры на кристалле кальций—галлий—германиевого граната  $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$  (CGGG:Nd) с диодной накачкой. Интерес к таким лазерам, работающим как в

непрерывном [1—5], так и в импульсном [6] режиме обусловлен свойствами кристалла CGGG:Nd, который допускает легирование большими концентрациями ионов неодима  $\text{Nd}^{3+}$  и удачно сочетает привлекательные как спектрально-люминесцентные, так и физико-технологические свойства [7, 8]. Наличие неоднородно уши-



ренных спектров поглощения и люминесценции у ионов неодима  $\text{Nd}^{3+}$  в кристаллах  $\text{CGGG:Nd}$  облегчает согласование их спектров поглощения со спектрами излучения лазерных диодов накачки и делает кристаллы  $\text{CGGG:Nd}$  перспективными для создания компактных и экономичных лазерных источников [4].

В работе [6] получена импульсная генерация лазера на кристалле  $\text{CGGG:Nd}$  с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора. Изучены зависимости средней мощности генерации лазера, энергии и ширины импульса генерации от поглощенной мощности накачки.

В настоящей работе исследуются джиттер периода (случайные изменения периода следования) импульса генерации лазера на кристалле  $\text{CGGG:Nd}$  с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора; определяются коэффициенты, позволяющие проводить практические оценки изменений частоты следования и длительности импульса генерации лазера при изменениях длины его резонатора и поглощенной мощности накачки.

### Эксперимент

Схема лазера на кристалле  $\text{CGGG:Nd}$  с диодной накачкой показана на рис. 1, а. Лазерный диод 1 с волоконным выходом 2 ( $\text{NA} = 0,22$ ;  $d_c = 100$  мкм) служил источником накачки. Длина волны излучения накачки составляла  $\lambda_p = 805$  нм, ширина спектра излучения накачки на полувысоте  $\Delta\lambda \approx 2$  нм. Микрообъектив 3 фокусировал излучение из выходного торца волокна на лазерный элемент (ЛЭ) 4 в пятно диаметром 90 мкм.

Лазерный элемент в виде пластинки размером  $5 \times 5$  мм и толщиной 1,5 мм укреплялся с помощью термопасты на медном теплоотводе. Передняя грань ЛЭ (изображена на рис. 1, а зачерненным прямоугольником) служила входным зеркалом, а сферическое зеркало 6 (радиус  $R = 5$  см, коэффициент пропускания  $T = 0,01$ ) — выходным зеркалом резонатора лазера. В последнем помещали насыщающийся поглотитель 5, выполненный на кристалле  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ , просветленный на длине волны 1,06 мкм и имеющий коэффициент пропускания  $T = 0,9$  при малых интенсивностях падающего на него излучения. Толщина поглотителя равнялась 1 мм. Концентрация ионов неодима  $\text{Nd}^{3+}$  в ЛЭ составляла  $2 \cdot 10^{20}$  см $^{-3}$ , а его толщина равнялась 1,5 мм. За один проход в этом ЛЭ поглощалось 80 % излучения накачки.

Вид одиночного импульса генерации лазера показан на рис. 1, б. Длительность (ширина по полувысоте) импульса составляла 11 нс, а его энергия — 3,5 мкДж.

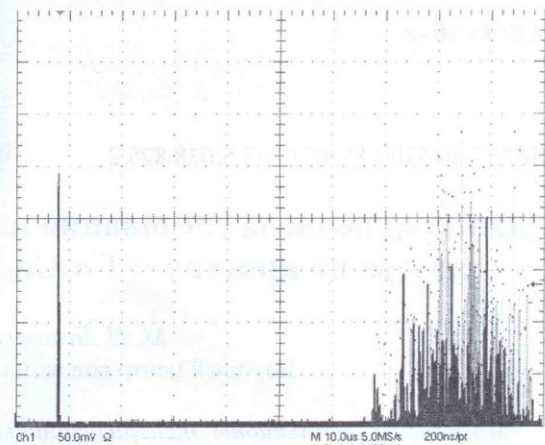
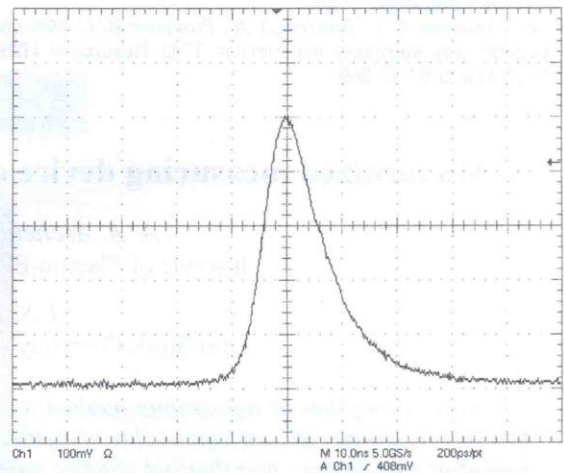
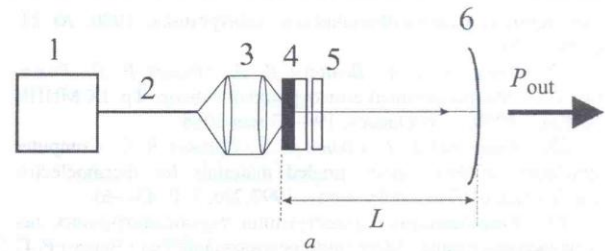


Рис. 1. Твердотельный лазер:

а — схема лазера; б — вид импульса, масштаб  $M = 10$  нс/дел;  
в — случайный разброс интервалов следования импульсов генерации,  $M = 10$  нс/дел

Джиттер периода импульсов проявляется как случайные изменения времени повторения или периода следования импульсов генерации лазера, т. е. временное расстояние между вершинами соседних импульсов изменяется случайным образом. Случайный разброс интервалов следования импульсов генерации лазера визуализировался на экране осциллографа, как показано на рис. 1, в, при работе последнего в режиме запоминания, когда каждый последующий импульс регистрирует-

ся на экране относительно предыдущего, служащего началом развертки.

Джиттер  $\sigma$  импульсов генерации лазера измерялся равным четвертой части интервала разброса импульсов на экране осциллографа и считался как стандартное отклонение периода следования импульсов от его среднего (ожидаемого) значения  $T$ . Частота  $F$  следования импульсов генерации также равна среднему значению, причем  $F = 1/T$ .

### Результаты эксперимента

При изменении поглощенной мощности  $P$  от 0,45 до 1 Вт частота  $F$  изменялась от 3 до 13 кГц. Анализ полученных результатов показывает, что в исследуемом диапазоне частот следования  $F$  импульсов генерации лазера  $F \in (3-13)$  кГц величина джиттера  $\sigma$  хорошо аппроксимируется функцией  $\sigma = A/F^\gamma$ , где  $A = 200$  мкс·кГц<sup>1,3</sup>, а  $\gamma = 1,3$ .

При  $P = 1$  Вт джиттер  $\sigma$  не превышает 10 % периода  $T$  следования импульсов. Кроме того, из рис. 2, а следует, что при увеличении поглощенной мощности  $P$  накачки частота генерации  $F$  увеличивается со скоростью, равной  $K_F^P = 17$  кГц/Вт.

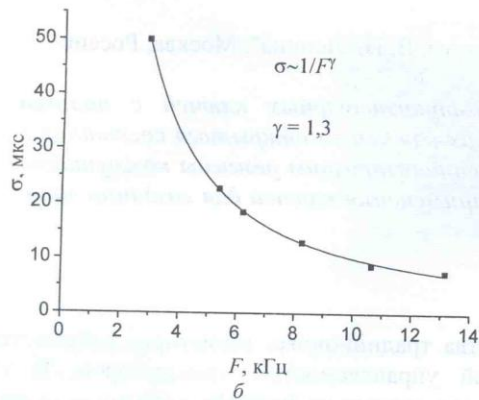
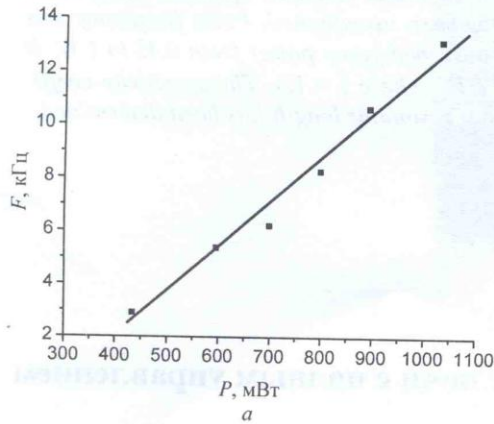


Рис. 2. Зависимости: а — частоты  $F$  следования импульсов генерации лазера от поглощенной мощности  $P$  накачки; б — джиттера  $\sigma$  импульсов генерации лазера от частоты  $F$

Из зависимостей, показанных на рис. 3, следует, что при увеличении поглощенной мощности накачки длительность импульса генерации уменьшается со скоростью  $K_\tau^P = -2,3$  нс/Вт, а изменение длины резонатора лазера приводит к изменению длительности импульса генерации со скоростью  $K_\tau^L = 2,4$  нс/см.

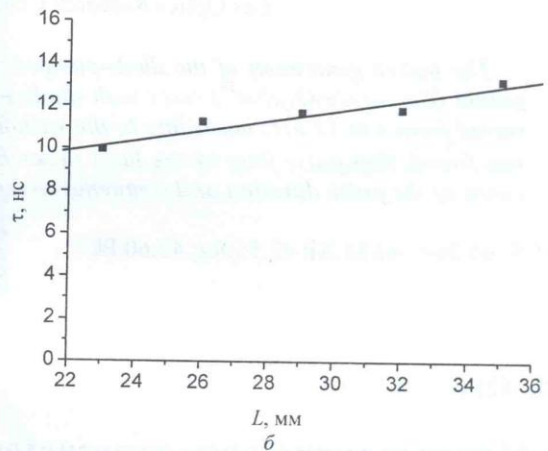
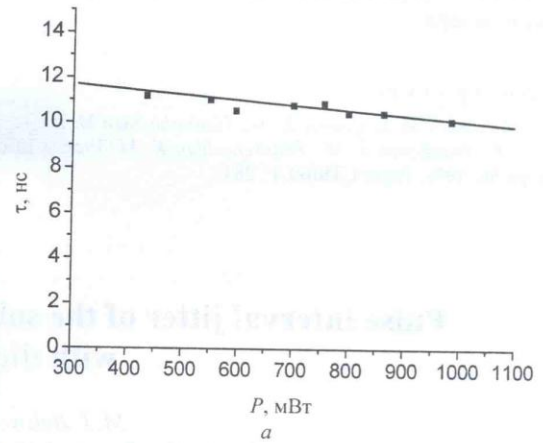


Рис. 3. Зависимости длительности импульса генерации лазера: а — от поглощенной мощности  $P$  накачки; б — от длины  $L$  резонатора

### Заключение

В работе исследован джиттер периода следования импульсов генерации неодимового лазера на кристалле кальций—галлий—германиевого граната  $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$  с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора. Частота  $F$  следования импульсов генерации изменялась от 3 до 13 кГц при изменении поглощенной мощности накачки от 0,45 до 1 Вт. Обнаружено, что джиттер импульсов генерации лазера зависит от частоты  $F$  как  $1/F^\gamma$ . При поглощенной мощности накачки  $\sim 1$  Вт длительность и энергия им-



пульса составляли 11 нс и 3,5 мкДж, соответственно, а величина джиттера не превышала 10 % от длительности периода следования импульсов. Получены коэффициенты, определяющие скорость изменения длительности  $\tau$  и частоты  $F$  импульсов генерации при изменении поглощенной мощности  $P$  накачки и длины  $L$  резонатора, позволяющие проводить практические оценки параметров генерации лазера.

#### Литература

1. Belovolov M. I., Dianov E. M., Timoschekhin M. I., Morosov N. P., Prokhorov A. M., Timoschekhin K. M. // Proc. CLEO/Europe'96. 1996. Paper CTh160. P. 281.
2. Jaque D., Caldino U., Romero J. J., Garcia Sole J. // Journal of Applied Physics. 1999. V. 86. P. 6627.
3. Jaque D., Romero J. J., Garcia Sole J. // Ibid. 2002. V. 92. P. 3436.
4. Шаталов А. Ф., Тимошечкин М. И., Беловолов М. И., Гладышев А. В.: Тез. докл. Всерос. науч. конф. "Лазеры. Измерения. Информация". — Санкт-Петербург, 2003. С. 88.
5. Беловолов М. И., Державин С. И., Машковский Д. А., Сальников К. С., Сысоев Н. Н., Тимошечкин М. И., Шаталов А. Ф. // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. С. 753.
6. Montes M., Heras C., Jaque D. // Optical Materials. 2006. V. 28. С. 408.
7. Воронько Ю. К., Кабаченко В. Я., Крысанова Л. И., Осико В. В., Соболев А. А., Тимошечкин М. И. // Неорганические материалы. 1983. Т. 19. С. 959.
8. Петрунин Г. И., Попов В. Г., Тимошечкин М. И. // Физика твердого тела. 1989. Т. 309. С. 139.

Статья поступила в редакцию 10 июля 2008 г.

## Pulse interval jitter of the solid-state $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ laser with diode pumping

M. I. Belovolov, A. F. Shatalov

Fiber Optics Research Center of the RAS, Moscow, Russia

*The pulsed generation of the diode-pumped solid-state neodymium calcium—gallium—germanium garnet ( $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ ) laser with diode pumping has been investigated. Pulse frequency was varied from 3 to 13 kHz according to the variation of the absorbed pump power from 0.45 to 1 W. It was found, that pulse jitter of the laser depends on  $F$  as  $1/F^\gamma$ , where  $\gamma = 1.3$ . The sensitivity coefficients of the pulse duration and frequency to the variation of resonator length has been determined.*

PACS: 06.20-r; 42.55.Xi; 42.55.Rz; 42.60.Pk

УДК 621.5

## Мощные тиристорно-транзисторные ключи с полным управлением

Ю. Т. Захаров

ФГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

*Приведены принципиальные схемы тиристорно-транзисторных ключей с полным управлением. Рассмотрены механизмы перехода таких ключей из открытого состояния в закрытое, отмечены особенности их управления, проанализированы режимы коммутации составных транзисторов. Обсуждена перспектива применения ключей для создания мощного современного электрооборудования.*

PACS: 85.30.-z

#### Введение

Развитие силовой электроники стимулирует разработку различного вида мощных ключей с полным управлением, в том числе тиристорно-транзисторных ключей, в которых мощностные

свойства традиционных тиристорных сочетаются с полной управляемостью транзисторов. В этих приборах основным силовым элементом является составной тиристор, функция же транзистора сводится к управлению последним в момент его выключения.