

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., Timoshechkin M. I., Morosov N. P., Prokhorov A. M., Timoshechkin K. M. // Proc. CLEO/Europe '96. 1996. Paper CThI60. 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 тиристоров 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.

Принципиальные схемы ключей приведены на рис. 1. Переход ключей из закрытого состояния в открытое осуществляется подачей управляющих импульсов на составные тиристоры. Обратный переход в закрытое состояние имеет свои особенности, связанные с конкретной схемой ключа. В соответствии со схемой 1 составные элементы связаны параллельно, и выключение тиристора в этом случае происходит при его шунтировании включенным транзистором. По схеме 2 тиристор и транзистор соединены последовательно, и переход тиристора в закрытое состояние происходит при выключении транзистора. Схема 3, по сути, представляет собой комбинацию первых двух, а переход ключа в закрытое состояние осуществляется в два этапа: на первом этапе включенный МОП-транзистор шунтирует тиристор Т1, отключая его, на втором — при снятии управляющего сигнала с МОП-транзистора размыкается цепь тиристора Т2, что, в свою очередь, приводит к его выключению.

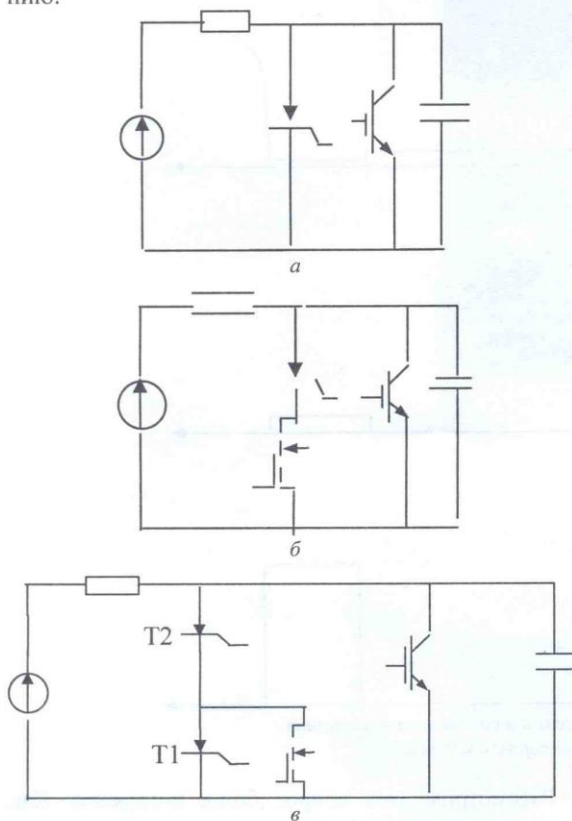


Рис. 1. Основные схемы тиристорно-транзисторных ключей:  
 а — схема 1; б — схема 2 (каскадная);  
 в — схема 3 (комбинированная)

Тиристорно-транзисторные ключи имеют более сложное управление в сравнении с одиночными. В этой связи целесообразно это управление осуществлять с помощью специальных драйверов,

поставляемых вместе с силовой частью. В этом случае на вход драйвера подаются запускающие импульсы от внешней схемы, а уже с выхода драйвера управляющие импульсы в соответствии с заданным алгоритмом управления поступают на составные элементы.

### Сравнение различных схем тиристорно-транзисторных ключей

Рассмотрим распределение токов и напряжений в ключах, собранных по различным схемам, а также обсудим режимы коммутации составных транзисторов. Составные тиристоры и транзисторы в схеме 1 (см. рис. 1) связаны параллельно, в связи с чем находятся под одинаковым напряжением, в то время как рабочий ток ключа полностью протекает через составной тиристор и до момента его выключения, и в принципе может в десятки раз превосходить ток, коммутируемый транзистором.

Иная ситуация имеет место в ключах, собранных по схеме 2 (см. рис. 1). В этом случае один и тот же ток протекает как через тиристор, так и через низковольтный коммутирующий транзистор, в то время как напряжение на каждом из элементов устанавливается в соответствии с его запирающей способностью. В ключах, составленных по схеме 3 (см. рис. 1), рабочий ток так же, как и в случае схемы 1, протекает только по тиристорной цепи, однако в отличие от схемы 1 напряжение распределяется между тиристором Т2 и МОП-транзистором.

Обсудим режимы коммутации составных транзистор в тиристорно-транзисторных ключах. Рассмотрим в этой связи эпюры токов и напряжений, приведенных на рис. 2 и имеющих место в тиристорно-транзисторных ключах, собранных по схеме 1 (см. рис. 1). Можно видеть, что включение составного транзистора происходит в момент времени, когда напряжение на нем составляет единицы вольт и, следовательно, реализуется мягкий режим коммутации. В сочетании с кратковременным периодом работы транзистора на номинальную нагрузку это обстоятельство приводит к выводу о том, что в тиристорно-транзисторных ключах реализуется мягкий режим работы в целом для составного транзистора в отличие от транзисторов, работающих автономно.

Завершая обсуждение режимов коммутации составных элементов, отметим, что к аналогичному выводу о мягком характере коммутации можно прийти и в отношении составных транзисторов в ключах, собранных и по другим схемам\*.

\* Захаров Ю. Т. Режимы коммутации составных элементов тиристорно-транзисторных ключей // 9-й симпозиум "Электротехника 2030. Перспективные технологии электроэнергетики" / ГУП ВЭИ, ТРАВЭК, 2007, 6.01.

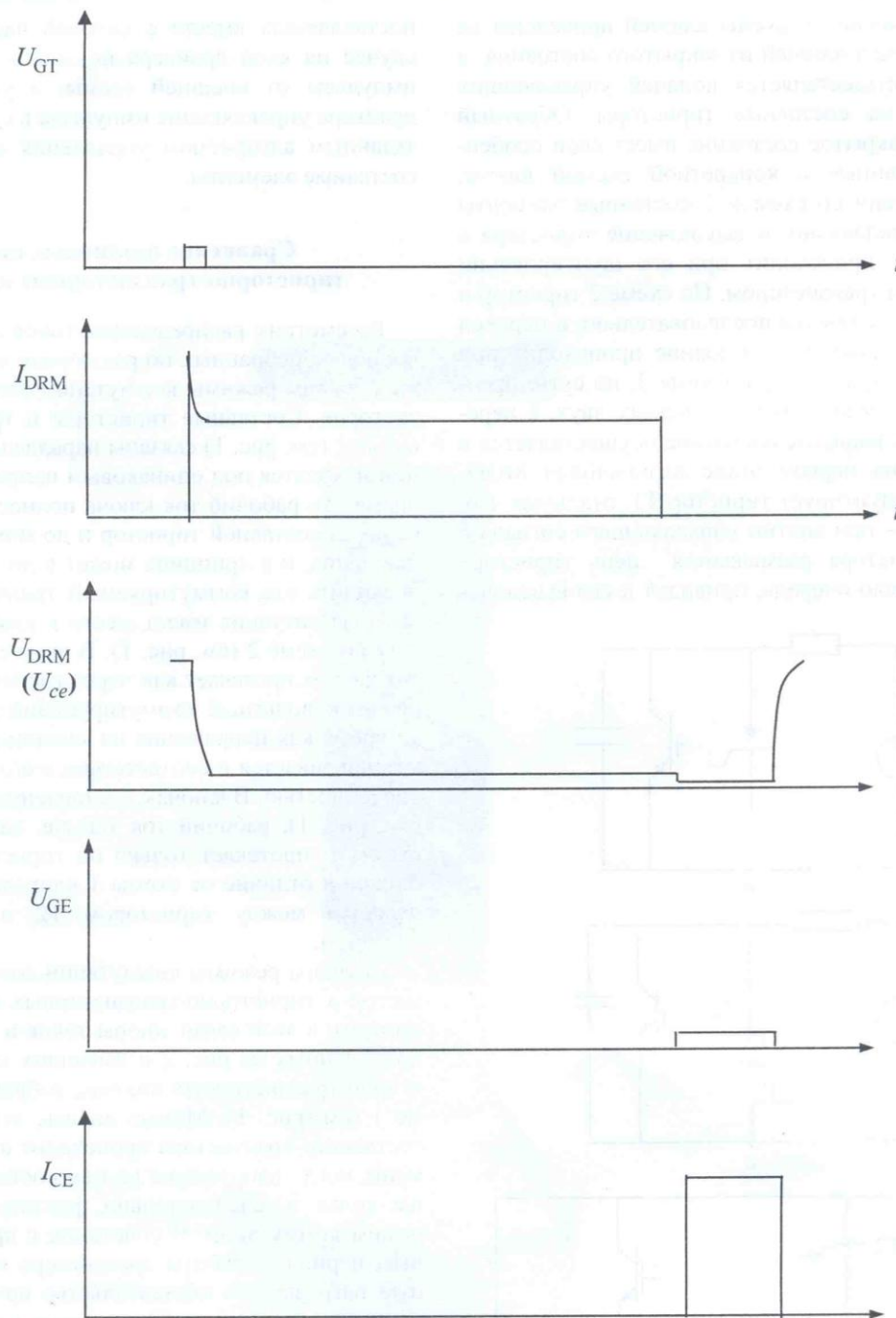


Рис. 2. Импульсы тока и напряжения в составных элементах тиристорно-транзисторных ключей

### Заключение

Перспективы и целесообразность применения ключей определяются тем, в какой степени улучшается тот или иной рабочий параметр устройства при замене автономно работавшего в нем транзистора на тиристорно-транзисторный ключ. Такими параметрами могут быть рабочий ток, напряжение, частота переключений, надежность прибора и др.

Рассмотрим этот вопрос более конкретно. Как уже отмечалось, в тиристорно-транзисторных ключах, собранных по схемам 1 и 3 (см. рис. 1), токи, протекающие в составных тиристорах, могут в десятки раз превосходить ток перед моментом выключения, откуда следует возможность применения этих ключей в мощных импульсных устройствах.

Предпосылки для разных применений следуют из факта мягкой коммутации составных транзисторов в наших ключах. В первую очередь это свя-

зано с возможностью повышения рабочих токов, выключаемых транзисторами, что в свою очередь открывает хорошие перспективы использования ключей в мощных пусковых устройствах асинхронных двигателей, рассчитанных на многократные перегрузки по току при их запуске. Другое возможное применение связано с созданием ис-

точников питания повышенной частоты для технологических лазеров. Повышенная в сравнении с автономными транзисторами надежность тиристорно-транзисторных ключей может явиться определяющим фактором при разработке современного транспортного электрооборудования.

*Статья поступила в редакцию 29 мая 2008 г.*

## Power controlled thyristor—transistor switches

*Yu. T. Zhakharov*

Lenin All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

*Basic circuits of the controlled thyristor—transistor switches are presented. Transition of the devices from on to off states are examined. The peculiarities of the control operation are noted. Regimes of the switching of composite transistor are examined. Perspectives of the switches for advanced electric equipment are discussed.*

PACS: 85.30.-z

\* \* \*