

# Разработка и исследование коммутаторов больших импульсных токов на основе фототиристоров

СЕРЕБРОВ Р.А., МАРТЫНЕНКО В.А., ФРИДМАН Б.Э., ХАПУГИН А.А.

В статье представлены результаты исследования коммутаторов больших импульсных токов, построенных на основе фототиристоров. Рассматриваются переходные процессы в полупроводниковом коммутаторе при разряде конденсатора на индуктивность и при разряде конденсатора на формирующую цепь, включающую в себя индуктор и кроубарные диоды. Установлены предельные токи для полупроводниковой структуры, при которых появляются термогенерационные пики на осциллограммах прямого падения напряжения. Исследован процесс включения фототиристора и показана необходимость применения форсирующих RC-цепей для обеспечения быстрого и устойчивого перехода полупроводниковой структуры в проводящее состояние. Рассмотрен переходный процесс при обратном восстановлении фототиристоров в разрядном контуре с индуктивностью и установлена необходимость применения снабберных цепей, обеспечивающих подавление импульсных перенапряжений. Для разрядного контура с кроубарными диодами рассмотрены детали переходного процесса переключения тока в кроубарные диоды и генерации импульсных перенапряжений при обратном восстановлении фототиристоров, а также выбраны параметры снабберных цепей для подавления этих перенапряжений. Результаты испытаний при коммутации импульсного тока до 100 кА подтвердили правильность принятых технических решений.

**Ключевые слова:** вольт-амперные характеристики, емкостные накопители энергии, испытание полупроводниковых устройств, мощные полупроводниковые приборы, системы импульсной мощности, токи короткого замыкания, фототиристоры.

Современное развитие мощной импульсной техники связано прежде всего с прогрессом в создании коммутаторов больших импульсных токов. До недавнего времени проблема сильноточной коммутации решалась с помощью искровых разрядников, характеризующихся большой перегрузочной способностью и относительной простотой схем запуска. Однако такие коммутаторы обладают ограниченным сроком службы из-за эрозии электродов; у них возможно самопроизвольное включение, «самоход». Применение полупроводниковых при-

*The results of research of heavy pulse currents switches built on Light Triggered Thyristors (LTT) are presented. Transients in a semi-conductor switch are analyzed at a capacitor discharge on an inductor and in PFN, which incorporates an inductor and crowbar diodes. Maximal currents for a semiconducting structure have been determined, at which thermo-generation peaks appear on oscillograms of forward voltage drop. The switch-on process of the LTT has been investigated and the need for application of speed-up R-C circuits for a fast and stable transition of the LTT semi-conducting structure to the conducting state has been shown. Transients at a reverse recovery of LTTs in a discharge circuit with an inductor are analyzed, and the snubbers providing suppression of pulse over-voltages and survivability of semi-conductors have been chosen. For PFN the current switching into the crowbar diodes and pulse over-voltage generation at a reverse recovery of LTTs have been analyzed, and the snubbers for suppression of these over-voltages have been chosen. The results of testing during switching of a pulse current up to 100 kA confirm the validity of the accepted technical solutions.*

**Key words:** capacitive energy storages, current-voltage characteristics, light triggering thyristors, pulse power systems, power semiconductor devices, short-circuit currents, semiconductor device testing.

боров для сильноточной коммутации имеет ряд преимуществ по сравнению с разрядниками — это высокая надежность, отсутствие самоходов, бездуговая коммутация, экологическая безопасность. К недостаткам полупроводниковых ключей относятся меньшая перегрузочная способность (по току и напряжению), ограниченная крутизна нарастания тока и возможность выхода из строя из-за воздействия перенапряжений. Для емкостных накопителей энергии с временами разрядного процесса порядка долей и единиц миллисекунд наиболее

подходящими являются полупроводниковые коммутаторы, построенные на основе фототиристоров [1, 2].

Для надежной работы коммутаторов при больших токах и высоких напряжениях следует обеспечить протекание коммутационных процессов в импульсных установках с учетом особенностей полупроводниковых приборов. В настоящей работе изучаются режимы работы полупроводниковых коммутаторов в импульсных установках и определяются условия надежной эксплуатации фототиристоров. Представлен опыт применения фототиристоров в разрядных контурах конденсаторных установок двух типов: в батарее противотока систем защитного вывода энергии ИТЭР и в источнике импульсного тока с формирующей цепью, включающей в себя индуктор и кроубарные диоды.

### Фототиристоры в разрядных контурах батарей противотока системы защитного вывода энергии ИТЭР

Батарея противотока предназначена для обеспечения гашения дуги, возникающей при размыкании контактов вакуумного прерывателя в контурах, содержащих сверхпроводящие магнитные системы ИТЭР. Конструкции и режимы работы разрядных контуров батарей противотока описаны в [3]. Во время коммутационного процесса при размыкании *VCB* (рис. 1,а) ток внешней цепи *I* протекает через расходящиеся контакты *VCB*. Напряжение заряда конденсатора *C* выбирается таким образом, чтобы амплитуда тока короткого замыкания конденсатора  $I_{C\max} = \frac{U_{C0}\sqrt{C}}{\sqrt{L_1}} > I$ . При раз-

ряде конденсатора *C* в момент времени *t*<sub>1</sub>, когда ток разряда конденсатора равен току во внешней цепи, происходит гашение дуги и выключение тока в *VCB*; ток переходит в цепь разрядного резистора (*DR*). Расчетные графики токов и напряжений, приведенные на рис. 1,б, поясняют переходные процессы при защитном выводе энергии в схеме рис. 1,а.

В момент времени завершения разряда конденсатора *t*<sub>2</sub> происходит выключение тока в фототиристорах. При этом помимо импульсных перенапряжений, возникающих при обратном восстановлении, к полупроводниковому коммутатору *T* прикладывается обратное напряжение  $U_{rev} = (L_1 + L_2) \frac{dI_C}{dt} \Big|_{t_2+}$ .

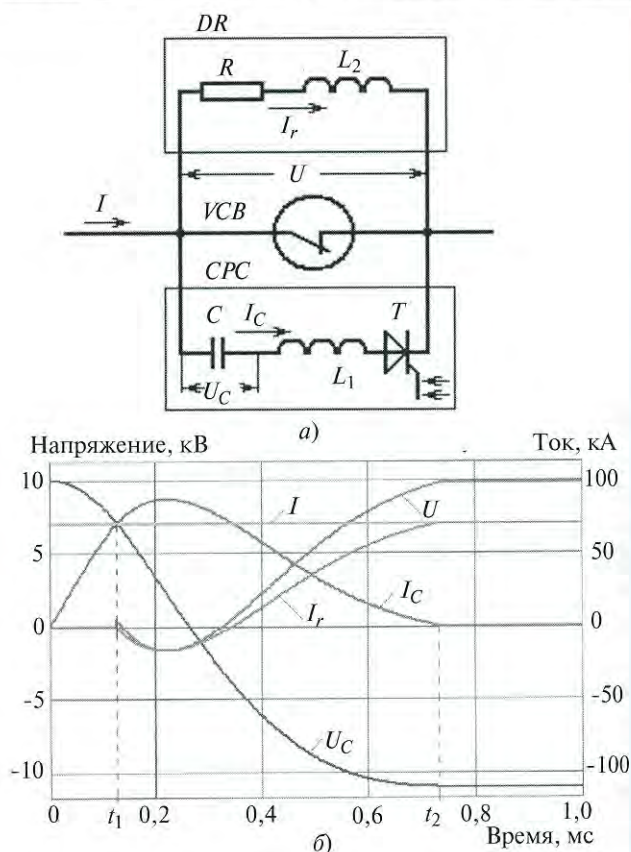


Рис. 1. Разрядные контуры (а) и переходный процесс (б) защитного вывода энергии ИТЭР: *VCB* – вакуумный размыкатель; *CPC* – конденсаторная батарея противотока; *DR* – разрядный резистор; *T* – сборка фототиристоров; *C* = 1,6 мФ, *L*<sub>1</sub> = 16 мкГн, *L*<sub>2</sub> = 2 мкГн, *R* = 0,14 Ом, *I* = 70 кА, *U*<sub>С0</sub> = 10 кВ [3]

Тестирование батареи противотока производится в режиме короткого замыкания. В этом режиме ток, проходящий через фототиристоры, имеет форму одной полуволны синусоиды; амплитуда импульса тока несколько больше, чем при работе в контуре защитного вывода энергии. При тестировании выключе-

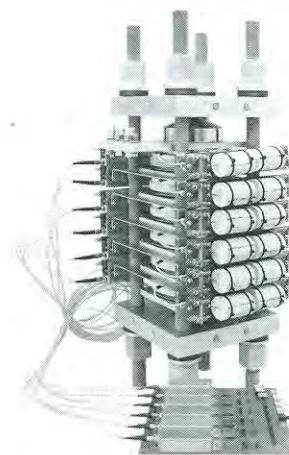


Рис. 2. Полупроводниковый коммутатор для батарей противотока (составлен из шести фототиристоров ТФИ193-2500-42, на переднем плане плата драйверов с шестью излучателями импульсов света)

ние фототиристоров сопровождается приложением к коммутатору напряжения отрицательно заряженного конденсатора, к которому добавляется импульс перенапряжения, вызванный обратным восстановлением полупроводникового ключа. Таким образом, при тестировании условия работы полупроводникового коммутатора являются более тяжелыми по сравнению с режимами работы в системе защитного вывода энергии ИТЭР.

**Фототиристоры в разрядном контуре источника импульсного тока с формирующей цепью**

Источники импульсного тока типа приведенных на рис. 3,а должны быть рассчитаны на работу в режиме короткого замыкания. Это наиболее тяжелый режим для полупроводниковых ключей, так как при этом действуют максимальные нагрузки на все элементы контура. Поэтому тестирование источников импульсного тока выполняют в режиме короткого замыкания.

Переходный процесс при коротком замыкании (рис. 3,б) может быть разделен на три стадии:

I. Разряд конденсатора *C* и заряд индуктивного накопителя *L*.

II. Переключение тока в крoубарный диод *D*.

III. Разряд индуктивного накопителя *L*.

Для современных конденсаторных установок характерны малые потери энергии в разрядных контурах. Это позволяет для простых оценок переходных процессов в контурах (рис. 3,а) пренебречь омическими потерями напряжения на первой и второй стадиях разрядного процесса. Тогда на стадии I при  $0 \leq t \leq t_1 \approx \frac{\pi}{2\omega}$

$$U_C(t) \approx U_0 \cos(\omega t); \quad I_1(t) \approx I_m \sin(\omega t),$$

где  $\omega \approx \frac{1}{\sqrt{(L+L_1)C}}$ ;  $I_m \approx \frac{U_0 \sqrt{C}}{\sqrt{L+L_1}}$ .

На стадии II при  $t_1 \leq t \leq t_2 \approx t_1 + \frac{\pi}{2\omega_1}$  начина-

ет проводить ток крoубарный диод *D* и имеет место переходный процесс в контуре, включающем в себя конденсатор *C* и диод *D*, который описывается дифференциальным уравнением

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 U_C}{dt^2} + \omega_1^2 U_C &= 0; \\ U_C|_{t=t_1} &= 0, \quad i_1|_{t=t_1} = I_m, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}$ .

Как правило, длительность стадии II мала,  $t_2 - t_1 \approx \frac{\pi}{2\omega_1} \ll t_1$ . Поэтому на стадии II ток в

индукторе *L* практически не меняется:  $I_3 = I_m = I_1 + I_2 = \text{const}$ . При этом решение уравнения (1) следующее:

$$I_1(t) \approx I_m \cos[\omega_1(t - t_1)];$$

$$U_C(t) \approx -I_m \sqrt{\frac{L_1}{C}} \sin[\omega_1(t - t_1)];$$

$$I_2(t) \approx I_m \{1 - \cos[\omega_1(t - t_1)]\}.$$

В момент окончания стадии II при  $t_2 \approx t_1 + \frac{\pi}{2\omega_1}$

$$I_1(t_2) = 0; \quad I_2(t_2) \approx I_m;$$

$$U_C(t_2) \approx -U_0 \sqrt{\frac{L_1}{L+L_1}}. \quad (2)$$

На стадии III затухающий импульс тока протекает в контуре *D-L*. Затухание тока оп-

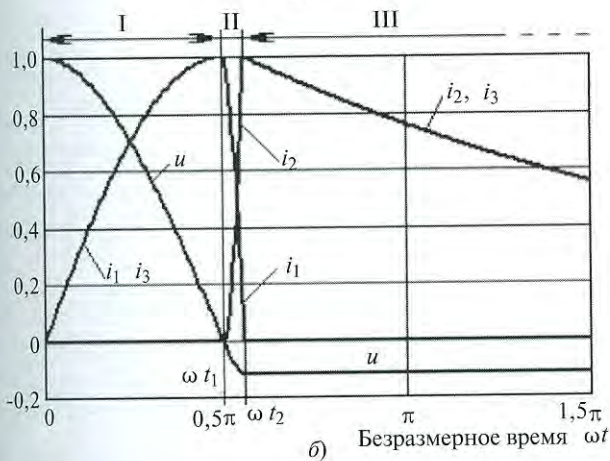
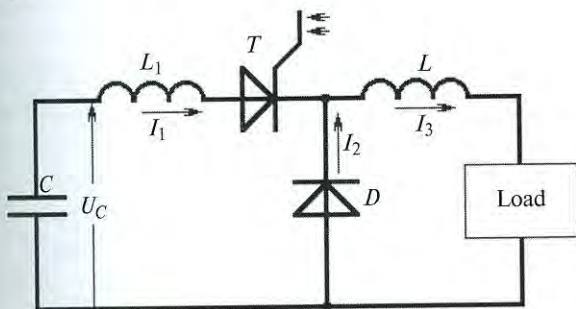


Рис. 3. Эквивалентная схема (а) и переходный процесс (б) в конденсаторной ячейке с формирующей цепью: а – Т – сборка фототиристоров; D – сборка крoубарных диодов; L – индуктор;  $L_1$  – индуктивность контура конденсатора и диодов D;  $\sqrt{L_1/(L+L_1)} = (t_2 - t_1)/t_1 = 0,128$ ; б – безразмерные функции:  $u = U_C/U_0$ ;  $i_1 = I_1/I_m$ ;  $i_2 = I_2/I_m$ ;  $i_3 = I_3/I_m$

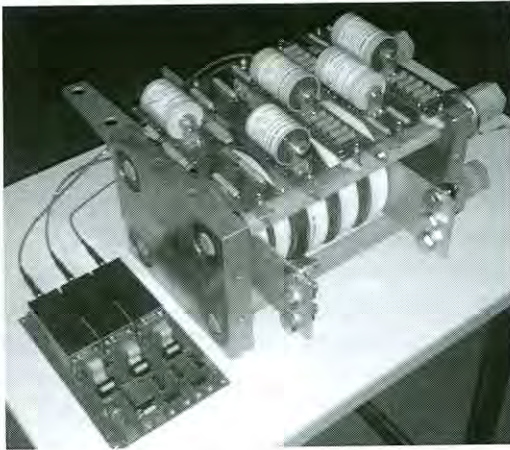


Рис. 4. Блок коммутатора конденсаторной ячейки (рис. 3,а), включающий в себя три фототиристора ТФИ193-2500-42 и два круговых диода Д193-2500-50 (слева находится плата драйверов с тремя излучателями импульсов света)

ределяется выделением энергии в проводниках индуктора [4].

На рис. 4 показан полупроводниковый коммутатор для конденсаторной ячейки.

**Нагрузочная способность фототиристоров**

При протекании больших импульсных токов в полупроводниковой структуре выделяется энергия  $W$ , могут произойти перегрев и выход из строя фототиристоров. При больших импульсных (ударных) токах вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводниковой структуры без учета переходных процессов включения приближенно описывается выражением

$$U = V_{T(TO)} + r_T i, \tag{3}$$

где  $V_{T(TO)}$  – пороговое напряжение;  $r_T$  – динамическое сопротивление полупроводникового прибора. Параметры  $V_{T(TO)}$  и  $r_T$  могут быть найдены в каталогах изготовителя или определены по прямой вольт-амперной характеристике фототиристора в открытом состоянии.

Энергия, выделяющаяся в полупроводниковой структуре в течение импульса, зависит от заряда  $Q = \int_0^{t_p} i dt$  и интеграла действия импульса

$$J = \int_0^{t_p} i^2 dt; \tag{4}$$

$$W = \int_0^{t_p} U i dt = V_{T(TO)} Q + r_T J,$$

где  $t_p$  – длительность импульса тока

Экспериментально определяли нагрузочную способность фототиристоров на стенде, эквивалентная схема которого приведена на рис. 5.

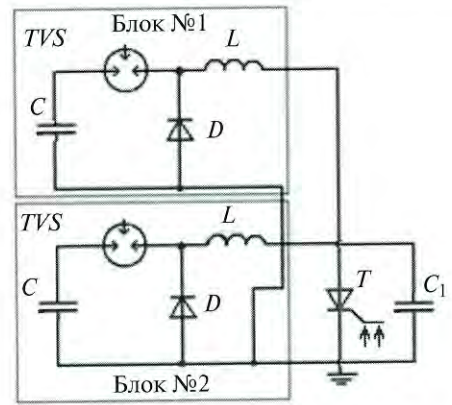


Рис. 5. Стенд для испытания полупроводниковых коммутаторов в режиме ударных токов: TVS – вакуумный разрядник;  $C_1 = 0,1$  мкФ; T – испытуемый полупроводниковый прибор

Испытуемый фототиристор подключали к выходу двух ячеек емкостного накопителя энергии с формирующей цепью, образованной круговыми диодами D и индуктором L. В качестве разрядного коммутатора в ячейках использовался вакуумный разрядник РВУ-43.

**Параметры блоков в схеме рис. 5**

- Напряжение, кВ . . . . . 5
- Запасаемая энергия, кДж . . . . .  $2 \times 50 = 100$
- Амплитуда импульса тока, кА . . . . .  $2 \times 50 = 100$
- Длительность фронта импульса тока, мкс . . . . . 530
- Постоянная времени спада импульса тока, мс. . . . . 16

При испытаниях фототиристоров на стенде импульсы света для запуска фототиристоров подавались с опережением на 10 мкс по отношению к импульсам запуска вакуумных разрядников. В опытах измерялось прямое падение напряжения на включенном фототиристоре. Характерные результаты испытаний одного из фототиристоров представлены в табл. 1 и на рис. 6.

Таблица 1

**Режимы испытаний фототиристора**

Номер опыта	1	2	3
Напряжение зарядки конденсаторов, $U_0$ , кВ	2,0	3,0	4,0
Амплитуда импульса тока $I_m$ , кА	36	54	73
Заряд $Q = \int_0^{t_p} i dt$ , Кл	263	403	564
Интеграл действия импульса тока $J = \int_0^{t_p} i^2 dt$ , $A^2 \cdot c$	$5 \cdot 10^6$	$11,5 \cdot 10^6$	$21,2 \cdot 10^6$
Энергия, выделившаяся в фототиристоре, $W = \int_0^{t_p} U i dt$ , кДж	0,84	1,82	3,74

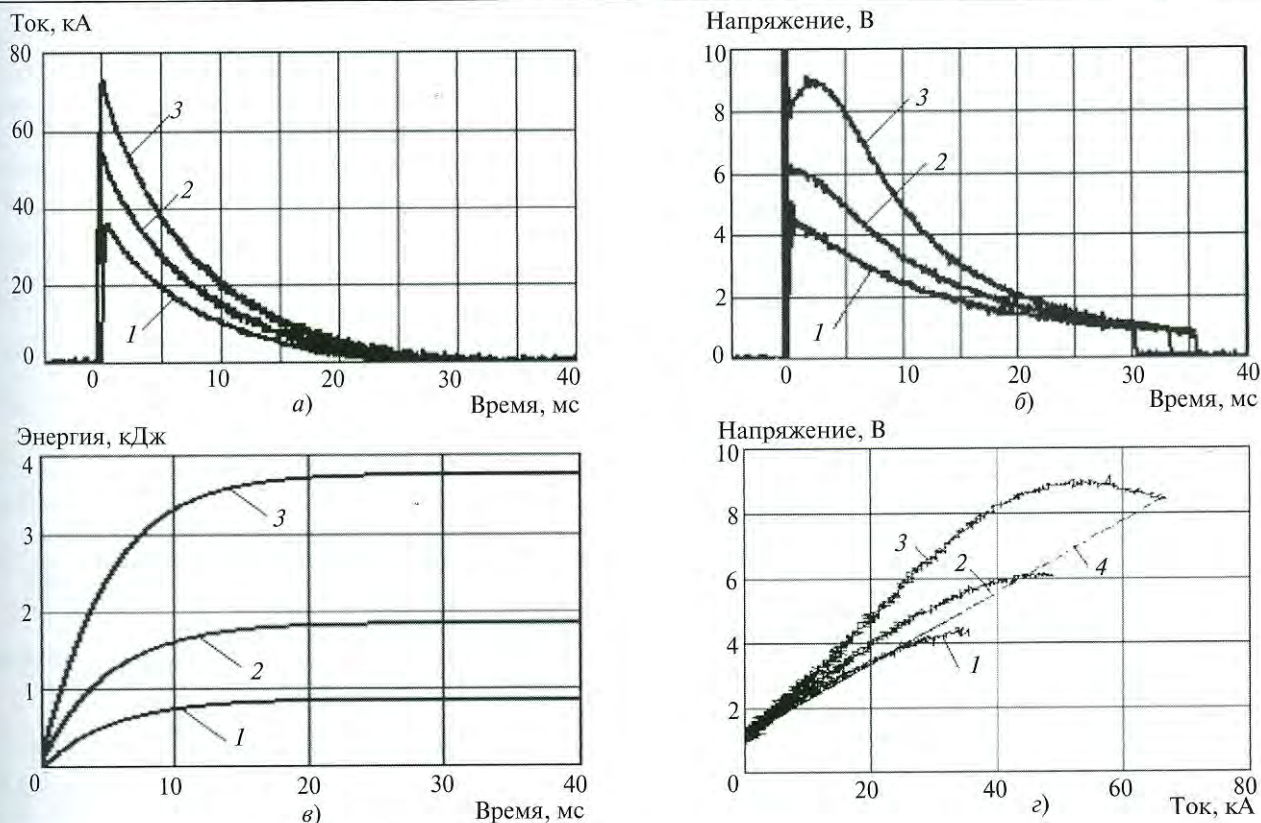


Рис. 6. Результаты испытаний фототиристора: а – ток  $I$ ; б – напряжение  $U$ ; в – энергия  $W$ ; г – ВАХ; 1–3 соответствуют номеру опыта в табл. 1; 4 – ВАХ, построенная для «холодного» фототиристора  $V_{T(TO)} = 1,15$  В,  $r_T = 0,11$  МОм

При максимальной нагрузке осциллограмма прямого падения напряжения (рис. 6,б, кривая 3) вследствие перегрева заметно сдвигается вправо, что является предвестником термогенерационного процесса в приборе. Этот процесс связан с джоулевым разогревом и накоплением тепла в кремниевой структуре при протекании импульса тока большой амплитуды. Дальнейшее небольшое увеличение тока приводит к появлению второго пика на кривой падения напряжения и тепловому разрушению полупроводниковой структуры подобно изображенному на рис. 7.

На осциллограмме напряжения (кривая 3 рис. 6,б) время наступления термогенерационного процесса составляет  $t_{tp} = 2,14$  мс, при этом  $Q_{tp} = 153$  Кл,  $J_{tp} = -9,5 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с, энергия  $W_{tp} = 1,26$  кДж. Полученные значения являются предельными, при превышении которых может произойти тепловое разрушение полупроводниковой структуры. Эксплуатация фототиристорov в таком режиме недопустима.

На рис. 6,в приведены зависимости от времени энергии  $W(t)$ , выделяющейся в полупроводнике. После появления второго пика на кривой  $V(t)$  при  $t > t_{tp} = 2,14$  мс (рис. 6,б) происходит резкое снижение прямого падения напряжения за счет быстрой модуляции прово-

димости канала термогенерированной плазмой. При этом энергия продолжает выделяться в полупроводниковой структуре, однако благодаря теплоотводу ее на медные электроды корпуса дальнейшего повышения температуры полупроводника не происходит.

ВАХ фототиристора приведены на рис. 6,г. Отклонения ВАХ (кривые 1, 2, 3) от линейной зависимости 4, соответствующей (3), объясняются процессами нагрева и охлаждения полупроводниковой структуры и прямой зависимостью динамического сопротивления  $r_T$  от температуры.

На рис. 7 представлены осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $U$  в опыте, в процессе которого фототиристор разрушился. В этом

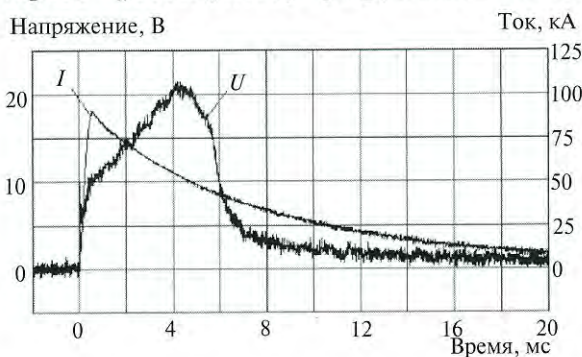


Рис. 7. Осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $U$  в опыте, в котором произошло разрушение фототиристора

опыте конденсаторные ячейки были заряжены до напряжения  $U_0 = 4,9$  кВ, амплитуда тока составляла  $I_m = 90$  кА. Окончательное повреждение произошло в момент времени  $t_{br} = 4$  мс; при этом заряд  $Q(t_{br}) = 292$  Кл, интеграл действия тока  $J(t_{br}) = 20,5 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ , выделившаяся в полупроводнике энергия  $W(t_{br}) = 4,2$  кДж.

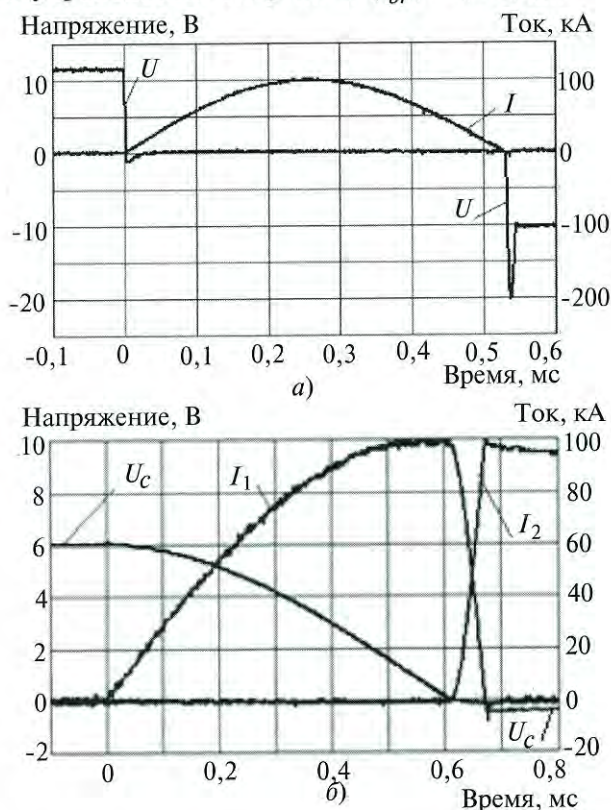


Рис. 8. Осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $U$  на сборке фототиристоров при тестировании блоков коммутаторов:  $a$  – разряд батареи противотока,  $U_0 = 12$  кВ;  $b$  – разряд конденсаторной ячейки с формирующей цепью (рис. 3,а),  $U_0 = 6$  кВ

Контроль отсутствия термогенерационных пиков на осциллограммах прямого падения напряжения является эффективным и надежным методом определения допустимости режимов ударных токов для полупроводниковых ключей. Этот метод был использован для обоснования режимов фототиристоров в батареях противотока системы защитного вывода энергии ИТЭР (рис. 8,а) и в конденсаторных ячейках с формирующей цепью (рис. 8,б).

На рис. 9 представлена временная зависимость мгновенной температуры в кремниевой структуре фототиристора при импульсном токе в батарее противотока ИТЭР, полученная расчетным путем с использованием программы Synopsys [5]. Максимальное приращение температуры кремниевой структуры при работе фототиристора в батареях противотока системы защитного вывода энергии ИТЭР не превышает  $70^\circ\text{C}$ . Это значительно меньше

максимально допустимых значений температур ( $\sim 400^\circ\text{C}$ ), при которых возникает термогенерированная плазма и существует опасность разрушения полупроводникового прибора.

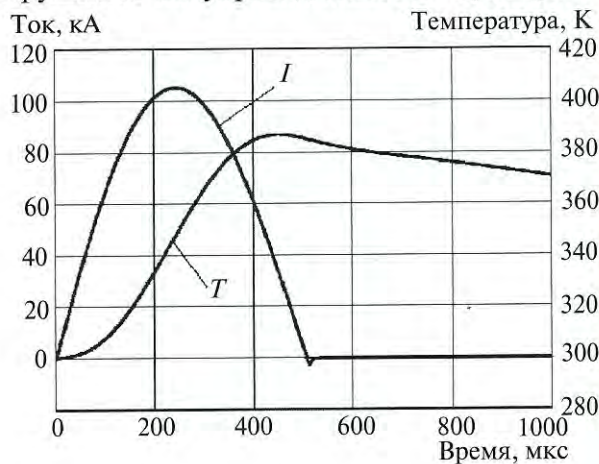


Рис. 9. Температура  $T$  в кремниевой структуре фототиристора при коммутации импульсного тока  $I$  амплитудой 105 кА

Сопоставление режимов фототиристоров в батарее противотока и конденсаторной ячейке с формирующей цепью с режимом, при котором начинается термогенерационный процесс и появляется второй пик падения напряжения (кривая 3 на рис. 6,б и 7), также показывает, что перегрева полупроводниковой структуры при работе в этих устройствах не происходит (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительные характеристики импульса тока

Характеристика	Начало термогенерационного процесса на кривой 3 рис. 6,б	Разряд батареи противотока (рис. 8,а)	Разряд конденсаторной ячейки (рис. 8,б)
Амплитуда, кА	73	100	100
Заряд, Кл	153	32, 6	44
Интеграл действия, $\text{A}^2 \cdot \text{с}$	$9,5 \cdot 10^6$	$2,57 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^6$
Энергия, выделившаяся в одном фототиристоре, Дж	1260	334,5*	610,6*

\* Значение энергии вычислено по (4) при  $V_{T(TO)} = 1,15$  В,  $r_T = 0,11$  МОм.

Включение фототиристора

При включении фототиристора скорость нарастания тока ограничена индуктивностью внешней цепи ( $L_1$  на рис. 1,а или  $L_1 + L$  на рис. 3,а). При малой скорости нарастания анодного тока наблюдается неустойчивость процессов перехода фототиристора в проводя-

шее состояние, возможно неравномерное деление напряжения между последовательно соединенными приборами и, как следствие, выход их из строя. Причина этого состоит в том, что при большой внешней индуктивности скорость нарастания анодного тока недостаточна для быстрого и эффективного включения усилителей запускающего сигнала внутри фототиристора.

Для обеспечения устойчивого и быстрого включения фототиристоры были применены форсирующие  $RC$ -цепи, которые подключались параллельно каждому полупроводниковому прибору. Постоянная времени форсирующей  $RC$ -цепи должна быть не менее времени

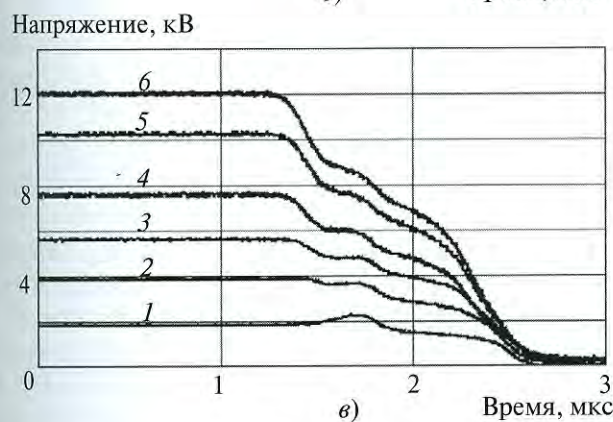
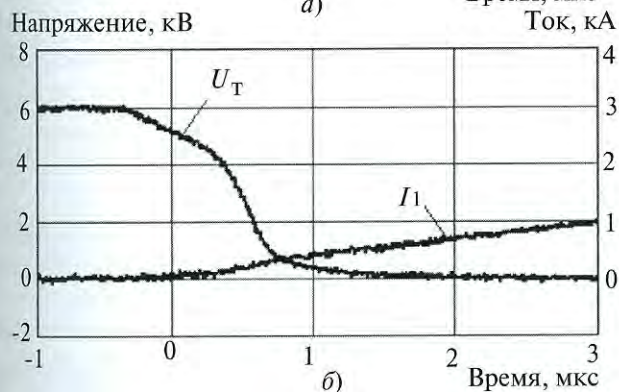
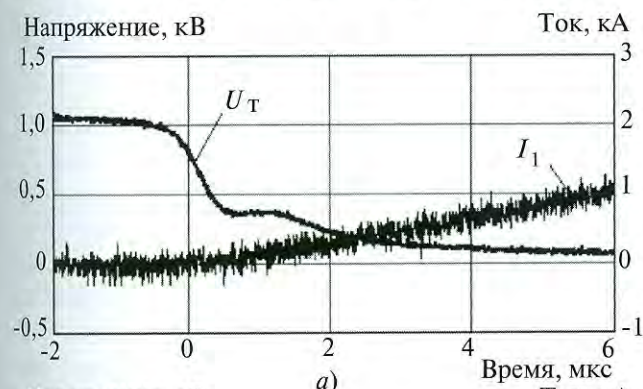


Рис. 10. Включение сборок фототиристоров: а – два фототиристора без форсирующих цепей; б – три фототиристора с форсирующими цепями ( $C=0,36$  мкФ,  $R=12$  Ом); в – шесть фототиристоров с форсирующими цепями ( $C=0,785$  мкФ,  $R=12$  Ом), 1, 2, ..., 6 – напряжение на одном, двух, ..., шести фототиристорах

включения фототиристора, сопротивление  $R$  выбирается таким образом, чтобы бросок анодного тока в момент включения не достигал опасных значений. На рис. 10 показаны осциллограммы, иллюстрирующие процесс включения фототиристоров без форсирующих  $RC$ -цепей (рис. 10,а) и с форсирующими  $RC$ -цепями (рис. 10,б, 10,в). На рисунках видно положительное влияние форсирующих  $RC$ -цепей на процесс включения фототиристоров.

Надежная коммутация разрядного тока без возмущений происходит при напряжениях, не превышающих половину предельного классификационного напряжения. Так, в конденсаторной батарее протivotока и в конденсаторной ячейке с формирующей цепью максимальное коммутируемое напряжение для одного фототиристора составляет 2 кВ при классификационном напряжении 4,2 кВ.

### Обратное восстановление фототиристоров

В момент выключения тока на электродах фототиристора появляются напряжение отрицательно заряженного конденсатора  $C$  и импульс перенапряжения, вызванный процессом обратного восстановления (запирания) фототиристоров в цепи с индуктивностью. При этом отрицательное анодное напряжение может превысить допустимые пределы и произойдет пробой полупроводниковой структуры.

Импульсные перенапряжения при обратном восстановлении полупроводниковых ключей подавляются введением параллельно включенных снабберных  $RC$ -цепей. Оценки параметров снабберных  $RC$ -цепей, необходимых для подавления перенапряжений, представлены в [6]. Для эффективного подавления перенапряжений сопротивление снабберной цепи должно быть малым, порядка долей ома или нескольких ом. Такая снабберная цепь может создавать опасные условия для включения фототиристора, так как при включении конденсатор снабберной цепи разряжается через полупроводниковую структуру. При этом через еще не полностью открытый полупроводниковый прибор проходит кратковременный импульс большого тока и возможно разрушение фототиристора. Для исключения разряда снабберной цепи при включении в [6] предложено использовать  $RCD$ -снабберные цепи, в которых диод блокирует предварительный заряд конденсатора снабберной цепи.

На рис. 11 представлена схема соединения фототиристора с форсирующей  $RC$ - и снабберной  $RCD$ -цепями. Предварительно заряженная

**Список литературы**

1. Ruff, M., Schulze H.-J. and Kellner U. Progress in the Development of an 8-kV Light-Triggered Thyristor with Integrated Protection Functions // IEEE Transactions on Electronic Devices. 1999. V. 46. No. 8. P. 1768–1774.

2. Мартыненко В.А., Тундыков А.С., Хапугин А.А., Гришанин А.В., Плотников А.В., Конохов А.В. Разработка и исследование мощных фототиристоров для импульсных применений // Сильная электроника. 2011. № 4.

3. Fridman B., Enikeev R., Kharcheva K., Kovrizhnykh N., Serebrov R. Counterpulse Capacitor Bank for 70 kA, 10 kV Commutation System // Digest of Technical Papers of PPPS. 2013. P. 784–789.

4. Fridman B. Transients in Pulsed Electrical Circuits with Massive Conductors // IEEE Transactions on Plasma Sciences. 2006. V. 34. No. 5. P. 1938–1943.

5. Synopsys. Socrates™ Device User Guide. Synopsys Inc., 2014.

6. Serebrov R., Enikeev R., Fridman B. Semiconductor Switches in a Counterpulse Capacitor Bank // IEEE Transactions on Plasma Sciences. 2013. V. 41. No. 1. P. 250–256.

**Серебров Роман Александрович** – научный сотрудник АО НИИЭФА им. Д.В. Ефремова. Окончил Санкт-Петербургский ГУ аэрокосмического приборостроения (ГУАП) в 2008 г.

**Мартыненко Валентин Александрович** – директор Научно-инженерного центра полупроводниковых при-

боров (НИЦ ПП) ОАО «Электровыпрямитель». Окончил электротехнический факультет Мордовского ГУ в 1965 г.

**Фридман Борис Эммануилович** – начальник лаборатории АО НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, профессор Санкт-Петербургского ГУ аэрокосмического приборостроения (ГУАП), доктор техн. наук. Окончил Ленинградский военно-механический институт в 1966 г. по специальности «Электромеханика, системы автоматического управления» и математико-механический факультет ЛГУ в 1973 г. Защитил кандидатскую диссертацию в Северо-Западном заочном политехническом институте по теме «Электродинамические процессы в системе индуктор–заготовка и их использование при магнитно-импульсной обработке цилиндрических деталей» в 1975 г. Защитил докторскую диссертацию в Институте проблем электрофизики РАН по теме «Генерирование мультимегаамперных импульсов тока для ускорения и сжатия твердых тел» в 1999 г.

**Хапугин Алексей Александрович** – заведующий сектором НИЦ ПП ОАО «Электровыпрямитель». Окончил факультет электронной техники Мордовского ГУ в 1998 г.