

Мощные тиристоры с прямым управлением светом

и лазерные волоконно-оптические модули управления для высоковольтных применений

Представлены результаты разработки серии высоковольтных тиристоров, управляемых светом (фототиристоров) и лазерных волоконно-оптических модулей (ВОМ) для высоковольтной передачи постоянного тока, статических компенсаторов энергии, преобразователей высоковольтных электроприводов, импульсной техники.

**Валентин Мартыненко
Алексей Хапугин
Алексей Гришанин
Александр Плотников
Валерий Масленников**

martin@moris.ru

Андрей Конюхов

conf@vei.ru

Введение

Одним из перспективных направлений развития элементной базы силовой электроники является создание высоковольтных тиристорных ключей, управляемых квантами света. Приборы такого типа, названные в соответствии с российскими стандартами фототиристорами, характеризуются целым рядом преимуществ по сравнению с тиристорами, управляемыми импульсами тока. Среди достоинств рассматриваемых устройств следует прежде всего отметить следующие: высоковольтная гальваническая развязка между цепью управления и силовой схемой преобразователя; стойкость к электромагнитным помехам, которые могут приводить к ложным включениям (особенно в системах, где неизбежны длинные кабели управления); точный временной контроль включения группы приборов; существенное упрощение системы запуска; сокращение количества элементов в схеме; простота и безопасность обслуживания устройства; большие интервалы между профилактическими работами и др.

Фототиристоры успешно используются в высоковольтных применениях, где требуется последовательное соединение тиристоров. Типичным примером являются линии передачи и вставки постоянного тока, статические компенсаторы реактивной мощности, преобразователи и устройства плавного пуска для высоковольтных электроприводов. Применение высоковольтных тиристоров с непосредственным световым управлением и интеграцией защиты от перенапряжений, а также использование оптоволоконных кабелей для распределения сигналов управления повышает надежность системы, снижает стоимость и размер преобразовательного оборудования, сокращает эксплуатационные расходы.

В последнее время наметилась хорошая перспектива применения высоковольтных фототиристоров в устройствах коммутации сверхбольших токов субмиллисекундной длительности для альтернативной

энергетики (средства электропитания в установках термоядерного синтеза), в ускорителях элементарных частиц, разнообразных электрофизических устройствах для получения интенсивных электрических и магнитных полей, генерации ударных волн в жидкостях, в исследованиях электрической прочности диэлектриков и сред и т. д.

Фототиристоры

ОАО «Электровыпрямитель» совместно с ФГУП ВЭИ разработало и освоило производство двух видов высоковольтных фототиристоров, один из которых может использоваться для работы в электрических сетях с частотой 50 или 60 Гц, а другой — для импульсных применений. Тиристоры имеют одинаковую конструкцию корпуса и отличаются только топологией кремниевых структур. Кроме этого, имеются отличия в оптических драйверах управления ВОМ, обусловленные различиями в режимах работы приборов в конкретных схемах применения.

Внешний вид фототиристора 193-й серии с диаметром кремниевой структуры 4" представлен на рис. 1. Здесь же показан оптический адаптер, соединяющий



Рис. 1. Внешний вид фототиристора ТФ193-2500

Таблица 1. Основные параметры высоковольтных сетевых (phase control) фототиристоров

Тип	V_{DRM} , В	V_{BO} , В	V_{RRM} , В	I_{TAV} , А	I_{TSM} , кА	$(dv_D/dt)_{crit}$, В/мкс	$(di_T/dt)_{crit}$, А/мкс	Корпус, мм
ТФ353-630				790	12	2000	300	75×50×35
ТФ273-1000	6000-6400	6200-6600	6600-7000	1360	24			112×78×40
ТФ183-2000				2115	40			120×86×35
ТФ193-2500	6800-7600	7000-7800	7200-8000	2520	55			145×100×40

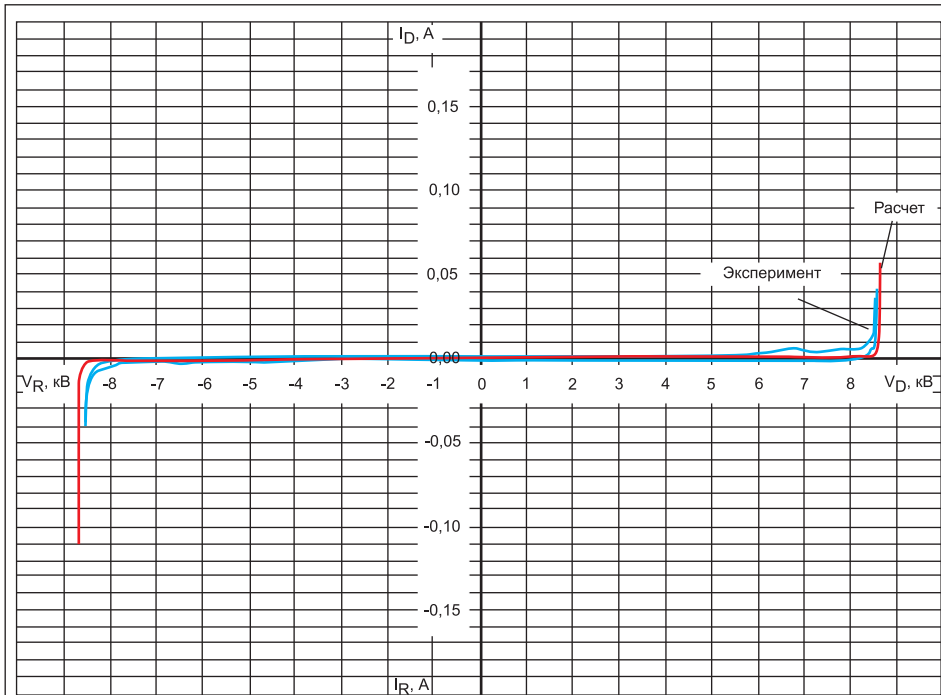


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные блокирующие вольт-амперные характеристики высоковольтного фототиристора в прямом и обратном направлениях при температуре $T_j = 25^\circ\text{C}$

фотоокно тиристора через оптоволоконный кабель и ST-разъем с лазерным волоконно-оптическим модулем.

В таблице 1 указаны основные параметры высоковольтных сетевых (phase control) фототиристоров, предназначенных для работы на частоте 50 Гц (60 Гц).

Важным в разработке этих приборов было достижение блокирующих напряжений, близких к расчетным значениям. С этой целью использовался радиационно-легированный кремний с малым разбросом удельного сопро-

тивления; разработана технология получения однородных диффузионных слоев и высоких времен жизни неосновных носителей заряда в базовых областях фототиристоров; проведено моделирование электрических полей на поверхности мезоструктур, и на этой осно-

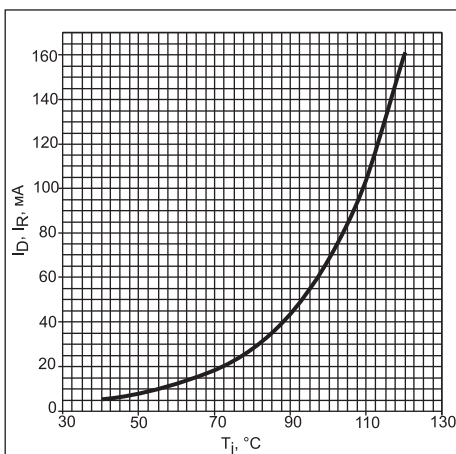


Рис. 3. Типичная температурная зависимость токов утечки обратных токов фототиристора ТФ183-2000

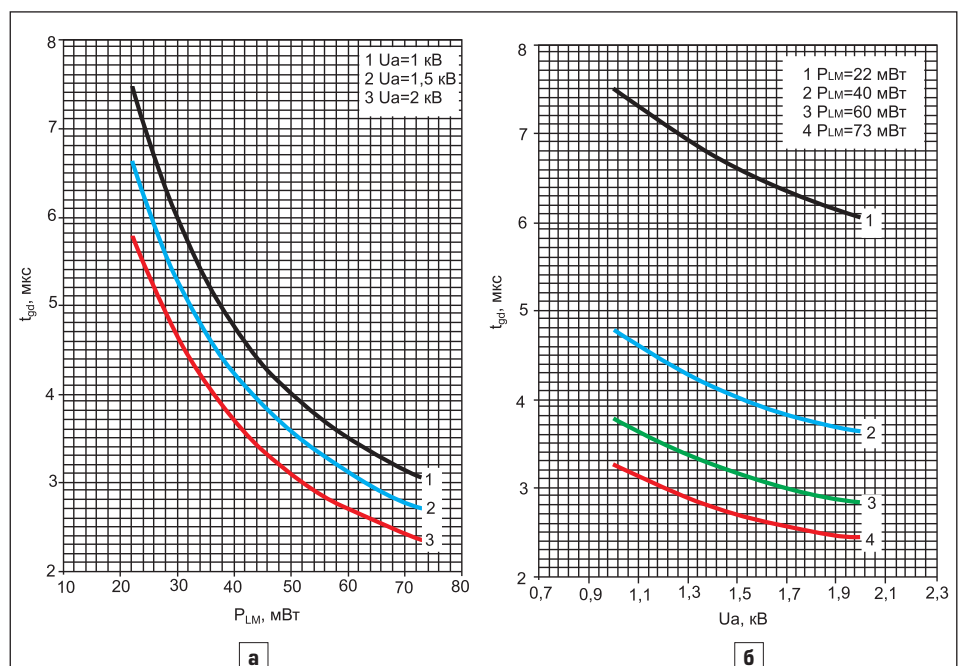


Рис. 4. Зависимость времени задержки включения фототиристоров ТФ183-2000: а) от оптической мощности управления; б) от анодного напряжения

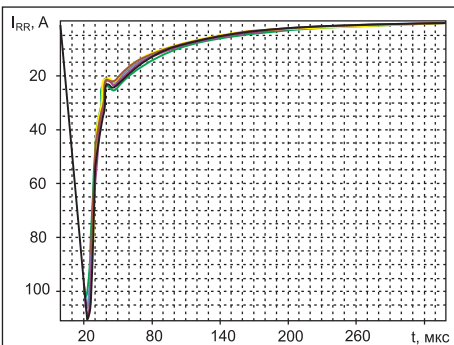
ве реализован на практике оптимальный край-вой контур для высоковольтных тиристоров с максимальным напряжением 8–9 кВ.

Блокирующие вольт-амперные характеристики высоковольтного фототиристора с повторяющим напряжением 7,4 кВ с край-вым контуром типа НЛХ [1] представлены на рис. 2. Измерения были проведены на переменном токе с частотой 50 Гц при комнатной температуре. Здесь же показаны расчетные ВАХ в прямом и обратном направлениях. Видно, что экспериментальные ВАХ достаточно близки к расчетным. Наблюдаемые небольшие петли на экспериментальных ВАХ объясняются емкостными токами при нарастании блокирующего напряжения и поверхностными состояниями.

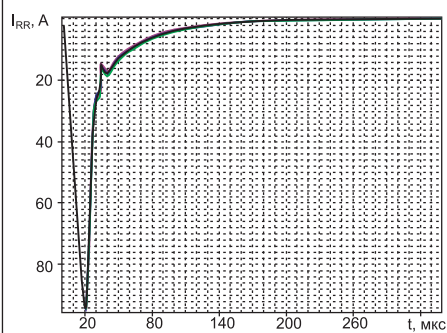
Типичная зависимость токов утечки и обратных токов фототиристора ТФ183-2000 от температуры изображена на рис. 3.

Процесс включения фототиристора характеризуется малыми временами включения, что было достигнуто выбранной топологией фоточувствительной области [1]. Исследования процесса показали, что времена задержки включения фототиристоров и их разброс сильно зависят от оптической мощности управления и анодного напряжения (рис. 4).

Представленные на рис. 3 и 4 зависимости могут быть полезными для расчета цепей управления и защиты при последовательном соединении в силовом блоке нескольких приборов. Для надежной работы тиристоров в сборках с последовательным соединением важным также является уменьшение разброса заряда обратного восстановления Q_{RR} . Это достигается с помощью доводочного облучения тиристорных структур ускоренными электронами с энергией до 9 МэВ на электронном ускорителе, который входит в состав технологической линии производства высоко-



а



б

Рис. 5. Токи через фототиристоры ТФ183-2000 (8 шт.) при обратном восстановлении: а) до доводочного облучения; б) после доводочного облучения



Рис. 6. Опытный образец модуля тиристорного ключа на основе фототиристоров ТФ193-2500

вольтных тиристоров и фототиристоров ОАО «Электровыпрямитель».

На рис. 5 показаны осциллограммы тока при обратном восстановлении группы фототиристоров ТФ183-2000 в количестве 8 шт. до (рис. 5а) и после (рис. 5б) доводочного облучения электронами.

На основе фототиристоров ТФ193-2500 разработан унифицированный модуль тиристорного ключа, который планируется использовать в качестве базового элемента преобразователей для электроэнергетики. В частности, он предназначен для работы в составе вентилей высоковольтных преобразователей для вставок постоянного тока. Внешний вид модуля тиристорного ключа представлен на рис. 6.

Вторым направлением развития тиристоров с прямым управлением светом является разработка импульсных фототиристоров [2, 3]. Импульсные фототиристоры — одни из перспективных твердотельных ключей для коммутации сверхбольших мощностей в микросекундном и субмиллисекундном диапазонах. В таблице 2 представлены основные параметры высоковольтных импульсных фототиристоров, предназначенных для

коммутации повторяющихся импульсов тока I_{TRM} .

Ключи на основе импульсных фототиристоров находят применение в аппаратуре для создания сверхмощных электромагнитных полей, для питания мощных лазеров и в других схемах импульсной энергетики. На базе импульсных фототиристоров ТФИ193-2500 разработана серия блоков коммутаторов, предназначенных для емкостных накопителей энергии на импульсные токи амплитудой 100 кА и напряжение 12 кВ.

На рис. 7 представлен нереверсивный блок БК6ТФИ-100000-12,0, который состоит из шести фототиристоров ТФИ193-2500-42, соединенных последовательно, плат управления и контроля состояния каждого фототиристора, снабженных цепей, драйвера одновременного запуска фототиристоров по оптоволоконному кабелю и стяжного приспособления на необходимое усилие сжатия.

Также разработан реверсивный блок БК12ТФИ-100000-12,0, состоящий из двенадцати фототиристоров ТФИ193-2500-42, соединенных последовательно в две группы по схеме полумоста со средним силовым выводом.

Таблица 2. Основные параметры высоковольтных импульсных фототиристоров

Тип	$V_{DR}, V_{R'} В$	$V_{DRM}, V_{RRM}, В$	$I_{TRM}, \sin 180 \text{ град. эл.}$		$(di_T/dt)_{crit}, А/мкс$		$(dv_D/dt)_{crit}, В/мкс$	Корпус, мм
			700 мкс	10 мс	1 Гц	50 Гц		
			А	кА				
ТФИ183-1600	5000-5400	7400-8000	55	17	5000	1000	1000-2000	120×86×35
ТФИ183-2000	4000-4300	6000-6600	65	20				120×86×35
ТФИ193-2000	4700-4800	7000-7200	90	25				145×100×40
ТФИ193-2500	3000-3400	4200-5000	110	30				145×100×40

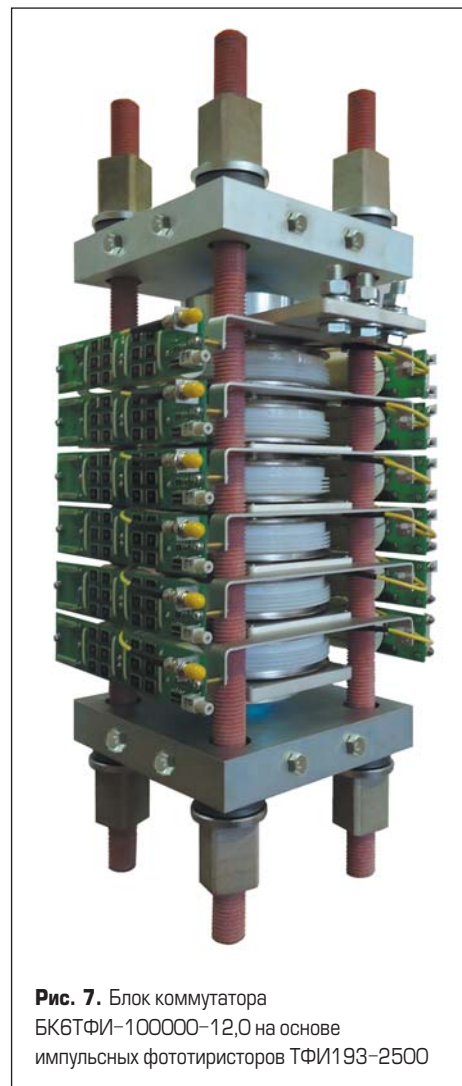


Рис. 7. Блок коммутатора БК6ТФИ-100000-12,0 на основе импульсных фототиристоров ТФИ193-2500



Рис. 8. Внешний вид лазерного волоконно-оптического модуля ИЛ-1М

Оптические драйверы управления

Включение фототиристора производится импульсом света ИК-диапазона с длиной волны 900–980 нм. Управляющий импульс передается к светочувствительной области кремниевой структуры тиристора от полупроводникового инжекционного лазерного диода (ЛД) через фотоокно и оптический адаптер по оптоволоконному кабелю. Длина кабеля составляет от 0,5 до 30 м, но может быть и больше, исходя из требований потребителей.

На основе ЛД разработан лазерный волоконно-оптический модуль ИЛ-1М (рис. 8), предназначенный, в основном, для импульсного применения, и его модификация ИЛ-1М1 для универсального применения (импульсный режим плюс режим работы на частотах 50, 60 и 6000 Гц).

На рис. 9 приведена электрическая блок-схема универсального лазерного драйвера ИЛ-1М1. Эти модули представляют собой законченные изделия, в состав которых входят: ЛД; фотодиод; печатная плата формирователя импульса запуска с блоком обработки сигналов диагностики; источники питающего напряжения; входной разъем, на который выведены сигналы запуска и питания; выходной оптический разъем типа ST. Контроль работоспособности ЛД в процессе работы

Таблица 3. Основные параметры драйверов управления

Параметр	Тип драйвера	
	ИЛ-1М	ИЛ-1М1
Выходная оптическая мощность, мВт	100–300, ограничивается исходя из средней мощности 2,5 мВт	100–300, ограничивается исходя из средней мощности 25 мВт
Длина волны излучения, нм	880–900	970–980
Нестабильность выходной оптической мощности в рабочем диапазоне температур, %	10	
Длительность выходного импульса, мкс	10–50, ограничивается из условия скважности не менее 60	10–400, ограничивается из условия скважности не менее 10
Частота повторения, Гц	до 50 (60)	до 6000
Длительность фронта оптического импульса, нс	не более 200	
Входной сигнал запуска	положительный уровень КМОП-логики	
Выходные сигналы диагностики	аналоговый выход: сигнал, пропорциональный измеряемой оптической мощности	два цифровых выхода: лог. «0» — $P_L > P_{min}$; лог. «1» — $P_L > P_{max}$
Напряжение питания, В	24	
Диапазон рабочих температур, °С	+5...+40	+5...+70
Габаритные размеры, мм	114×35×30	140×65×30

ВОМ осуществляется по двум выводам термометрии. На корпусе модуля могут быть установлены два индикаторных светодиода, сигнализирующих о нормальной работе модуля и отклонении выходной оптической мощности от минимально и максимально допустимых значений. Имеется также возможность регулировки подстроечным резистором выходной мощности оптического излучения.

Импульсы входного сигнала необходимой длительности (10–400 мкс) с уровнями КМОП-логики подаются на вход драйвера управления MOSFET. Драйвер предназначен для преобразования уровня КМОП в уровень, необходимый для управления затвором транзистора. Когда транзистор включается, через ЛД протекает ток, ограниченный резистором R1. Лазерное излучение вводится в оптоволоконно, часть его попадает в фотоприемник обратной связи и используется для диагностики. Компараторы диагностики распознают минимальный и максимальный уровни мощности излучения. Резистором R2 производится масштабирование, а выходные триггеры запоминают состояние уровня мощности прошедшего импульса. Таким образом, получаются два сигнала, и по состояниям лог. «0» или лог. «1»

можно судить о величине мощности излучения: $P_L > P_{min}$, $P_L > P_{max}$.

В процессе длительной работы лазерных диодов со временем из-за старения может происходить уменьшение выходной мощности излучения. Введение такой диагностики позволяет системе управления обнаружить старение лазерного диода и дать команду на включение дублирующего драйвера, не прерывая работу силового преобразователя. Основные параметры драйверов управления приведены в таблице 3.

Оптический драйвер ИЛ-1М предназначен, в основном, для импульсного применения и, в отличие от ИЛ-1М1, имеет меньшие габариты, что позволяет легко строить многоканальные системы управления для высоковольтных сборок с последовательно соединенными фототиристорами. Для примера на рис. 10 показан шестиканальный оптический драйвер управления на базе модулей ИЛ-1М для коммутатора БК6ТФИ-100000-12,0, состоящего из шести последовательно включенных фототиристоров ТФИ193-2500.

Применение более мощного лазерного диода в драйвере ИЛ-1М1 позволило увеличить длительность импульсов управления

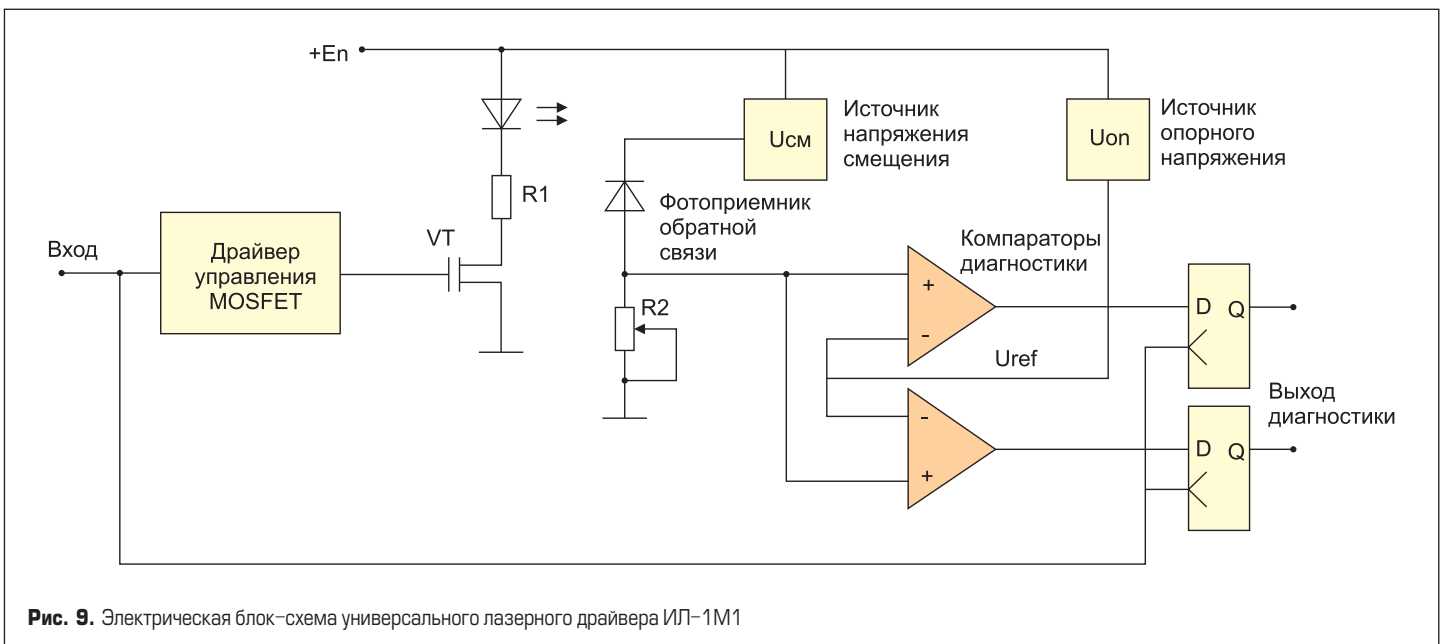


Рис. 9. Электрическая блок-схема универсального лазерного драйвера ИЛ-1М1



Рис. 10. Шестиканальная плата оптического драйвера для коммутатора импульсов тока субмиллисекундного диапазона

до 400 мкс и частоту следования до 6000 Гц, благодаря чему стало возможным использование оптических драйверов для управления фототиристорами в преобразователях линий передачи и вставок постоянного тока, компенсаторах реактивной мощности, импульсных коммутаторах, требующих длинных импульсов управления, и пр.

Дальнейшим шагом развития конструкции оптического драйвера является переход на автоматический контроль выходной мощности (АРС), что позволит расширить диапазон рабочих температур от -40 до $+70$ °С и увеличить ресурс работы лазерного диода. Применение гибридных технологий позволит значительно уменьшить габариты драйвера (до $40 \times 25 \times 10$ мм).

Литература

1. Мартыненко В., Хапугин А., Гришанин А., Чибиркин В., Конюхов А. и др. Разработка мощных фототиристоров с функциями самозащиты // Силовая электроника. 2009. № 5.
2. Chibirkin V. V., Martynenko V. A., Khapugin A. A., Konuchov A. V., Tundykov S. A., Grishanin A. V., Enikeev R. Sh., Serebrov R. A. Development and Investigations of Light Triggered Thyristors for Pulse Application // PCIM Europe 2011, 17–19 May 2011.
3. Мартыненко В., Тундыков С., Хапугин А., Гришанин А., Плотников А., Конюхов А. Разработка и исследование мощных фототиристоров для импульсных применений // Силовая электроника. 2011. № 4.