

Характеристики переключения мощных фототиристоров

С НОВЫМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ УПРАВЛЕНИЯ

В статье представлены характеристики включения новых мощных высоковольтных фототиристоров и информация об оптических драйверах управления, предназначенных для использования в различных силовых схемах, в том числе — выпрямителях, инверторах, ключах переменного тока, импульсных коммутаторах тока.

**Алексей Хапугин
Валентин Мартыненко
Александр Плотников**

martin@moris.ru

Андрей Конюхов

conf@vei.ru

Введение

При коммутации высоких мощностей мегаваттного диапазона наиболее перспективными силовыми ключами являются высоковольтные тиристоры с прямым управлением светом (Light Triggered Thyristors, LTT). Данные полупроводниковые приборы производятся сегодня на токи до 3500 А, напряжение до 8000 В. Они легко управляются инфракрасным светом с оптической мощностью несколько десятков милливатт, имеют прекрасные характеристики включения, низкие потери мощности в проводящем состоянии и при переключении. Узкий разброс таких параметров, как $t_{\text{д}}$, $V_{\text{ТМ}}$, $Q_{\text{т}}$ позволяет использовать эти приборы в последовательных и параллельных соединениях и успешно реализовывать различные энергетические проекты с общей мощностью до нескольких гигаватт, например HVDC. Кроме того, в импульсной энергетике находят применение LTT PP (LTT Pulse Power), вытесняя газоразрядные лампы и вакуумные разрядники.

В статье приведены результаты исследований характеристик включения мощных LTT и LTT PP с диаметром кремниевых элементов 90 и 101 мм, а также результаты разработки новых оптических драйверов управления на основе лазерных диодов с учетом различных условий применения тиристоров.

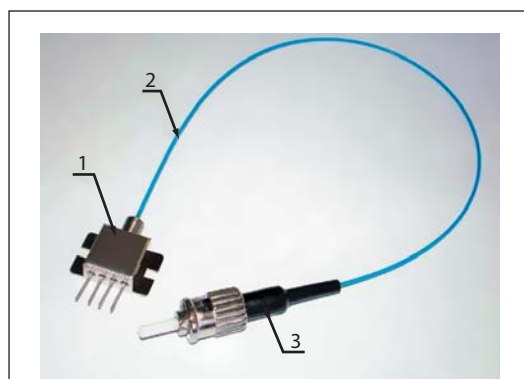


Рис. 1. Лазерный диод (внешний вид): 1 — корпус, 2 — выходной MM оптический световод в защитной оболочке, 3 — оптический разъем типа ST

Инжекционный лазерный диод

Ранее [1, 2] были представлены результаты расчетов исследований поглощения излучения в кремнии и зависимости времени задержки включения LTT от длины волны. Показано, что наилучшее включение тиристора светом происходит при длине световых волн 950–1050 нм. С учетом этого в качестве излучателя света для LTT были разработаны лазерные диоды (ЛД) и оптические драйверы на их основе.

Кристаллы ЛД изготавливались на основе MQW полупроводниковой гетероструктуры типа $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$, выращенной методом MOCVD газофазной эпитаксии. Ширина излучающей области кристалла ЛД составляет 50 мкм.

Излучатель света (рис. 1) разработан в компактном металлостеклянном корпусе, внутри которого размещены кристаллы ЛД и кремниевый фотодиода обратной связи (Si-PIN) для мониторинга выходной оптической мощности излучения.

Выход излучения из корпуса организован через многомодовый кварцевый оптический световод с диаметром сердцевины 200 мкм, оболочки — 220 мкм. На другом конце световод имеет оптический разъем

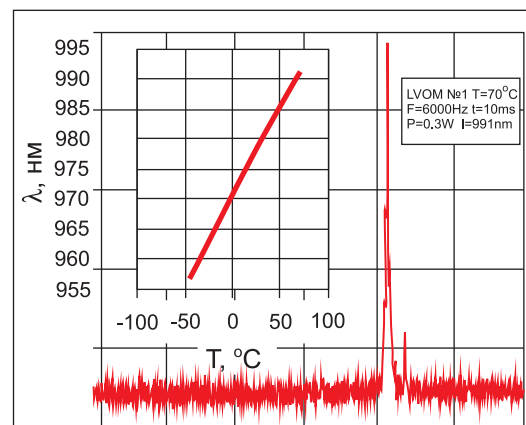


Рис. 2. Спектр излучения лазерного диода при +70 °C и зависимость максимума спектра излучения от температуры

типа ST для подключения оптического кабеля управления. Спектры излучения ЛД, измеренные в импульсном режиме ($f = 6000$ Гц, $t_p = 10$ мкс) при температурах $-45, +20, +70$ °C с помощью спектрометра МОРС-G, приведены на рис. 2.

Типичная ватт-амперная характеристика ЛД, измеренная при температурах $+20, +40$ и $+70$ °C в импульсном режиме, представлена на рис. 3.

Измеренная характеристика фототока встроенного Si-PIN-диода от тока накачки ЛД представлена на рис. 4. Как видно на рис. 4, на рабочем участке передаточной характеристики Si-PIN-диода имеется равномерный участок, близкий к линейной зависимости, который позволяет осуществлять мониторинг и стабилизацию выходной мощности излучения ЛД при изменении температуры окружающей среды.

Оптические драйверы управления

На основе этих ЛД разработаны три типа оптических драйверов управления для импульсного применения, а также для работы в схемах мощного выпрямителя, инвертора и ключа переменного тока. Основные характеристики драйверов управления представлены в таблице.

Рекомендуемое применение драйверов: тип 1 — для импульсных коммутаторов тока, тип 2 — для выпрямителей и инверторов, тип 3 — для управления переменным током. Следует отметить, что драйвер типа 3 является универсальным, так как может быть использован, кроме управления переменным током, также в импульсных схемах и в схемах преобразования электрической энергии AC/DC и DC/AC.

На рис. 5 показана функциональная электрическая схема оптического драйвера типа 2.

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 оптоволокно, часть его попадает

Таблица. Основные характеристики драйверов управления

Наименование параметров	Тип 1	Тип 2	Тип 3
Длина волны выходного излучения, нм	900–980	900–980	950–1000
Количество каналов излучения	1	1	1
Мощность импульсов выходного излучения, мВт	50–300	50–300	200–300
Средняя мощность излучения, не более, мВт	2,5	25	200–300
Длительность выходного импульса излучения, мкс	10–50	10–50	0,2–∞
Частота импульсов выходного излучения, Гц	50	6000	Пост.
Входной сигнал управления	Положительный фронт КМОП-логики		
Диапазон рабочих температур, °C	+5...+40	+5...+40	+5...+70
Размеры корпуса, мм	80×55×25	140×64×30	114×35×30
Разъем питания и запуска	D-SUB-9F	D-SUB-9F	IDC-10

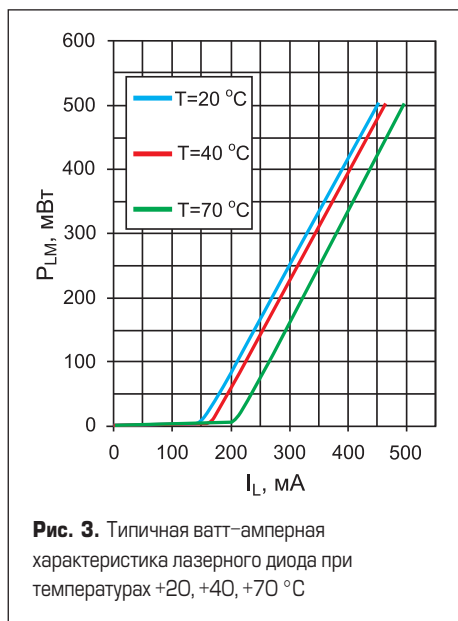


Рис. 3. Типичная ватт-амперная характеристика лазерного диода при температурах $+20, +40, +70$ °C

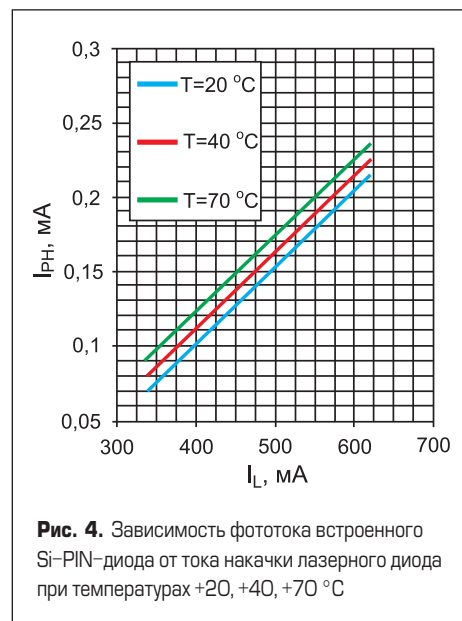


Рис. 4. Зависимость фототока встроенного Si-PIN-диода от тока накачки лазерного диода при температурах $+20, +40, +70$ °C

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: $PL > P_{min}$, $PL > P_{max}$. В процессе длительной работы ЛД со временем из-за старе-

ния может происходить уменьшение выходной мощности излучения. Введение такой диагностики позволяет системе управления обнаружить старение ЛД и дать команду на включение дублирующего драйвера, не прерывая работу силового преобразователя.

Экспериментальные результаты

С помощью этих драйверов исследовались характеристики включения мощных высоко-

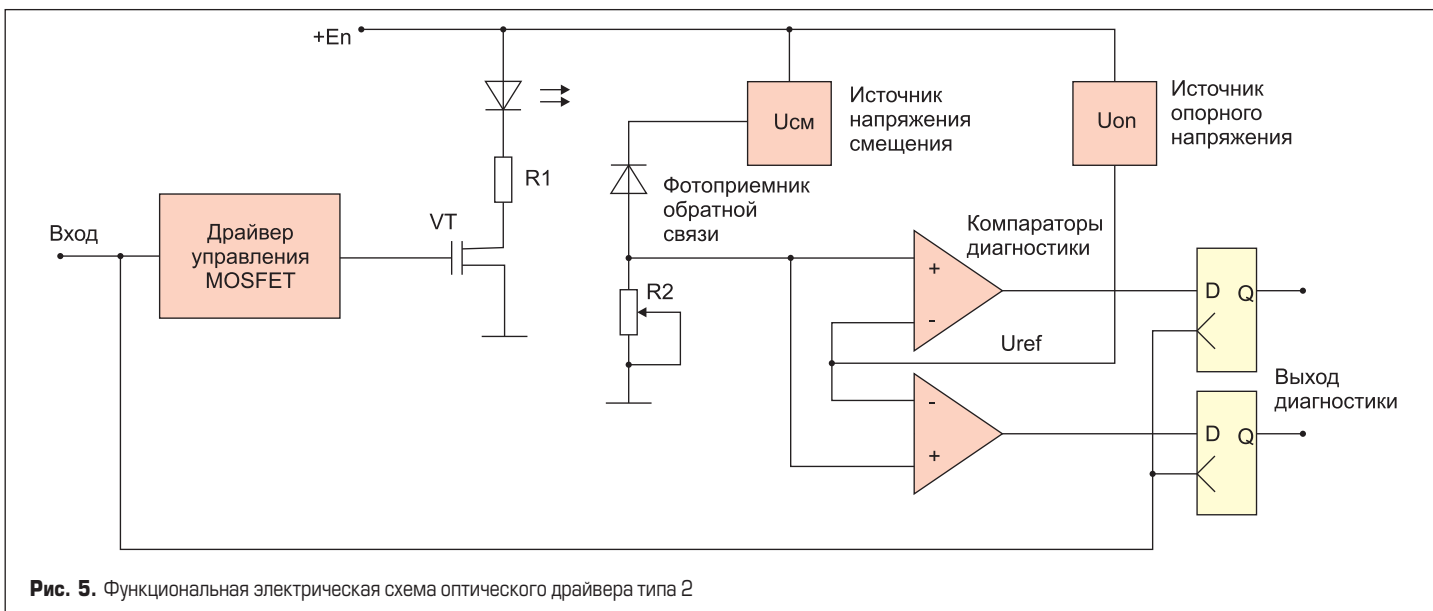


Рис. 5. Функциональная электрическая схема оптического драйвера типа 2

вольтных ЛТТ РР с блокирующим напряжением 5000 В, предназначенных для импульсных применений, и ЛТТ с блокирующим напряжением 8000 В для низкочастотных (50/60 Гц) применений в различных режимах измерений.

На рис. 6 представлена зависимость времени задержки включения ЛТТ РР (5000 В) от длины волны оптического излучения ЛД λ при $P_{LM} = 200$ мВт и блокирующем напряжении в прямом направлении $V_D = 100$ В.

На рис. 7 представлена зависимость времени задержки включения тиристоров (5000 В) от блокирующего напряжения в прямом направлении при $P_{LM} = 200$ мВт, $\lambda = 880$ нм и $\lambda = 980$ нм. На рисунке видно, что более близкая к оптимальному значению длина волны оптического из-

лучения (980 нм) дает более низкие значения времен задержки включения во всем диапазоне напряжений. Кроме того, при $\lambda = 980$ нм время задержки слабо зависит от анодного напряжения ($t_{gd} \approx 0,5$ мкс при $V_D = 4000$ В и $t_{gd} \approx 1,0$ мкс при $V_D = 100$ В). В случае, когда $\lambda = 880$ нм, время задержки резко возрастает с уменьшением анодного напряжения ($t_{gd} \approx 0,8$ мкс при $V_D = 4000$ В и $t_{gd} \approx 2,7$ мкс при $V_D = 100$ В). Исследования показали также, что мощность потерь при включении ЛТТ РР уменьшается с увеличением λ с 880 до 980 нм.

На рис. 8 и 9 показаны зависимости времен задержки включения тиристоров с блокирующими напряжениями 5000 и 8000 В от величины световой мощности новых оптических драйверов управления, работающих в спектре излучения 980 нм. Видно, что ЛТТ РР (5000 В) быстрее включаются, чем ЛТТ (8000 В) при всех указанных значениях P_{LM} и V_D , что связано с большей толщиной *n*-базы ЛТТ по сравнению с ЛТТ РР.

Закключение

Получены расчетные и экспериментальные зависимости времени задержки включения высоковольтных ЛТТ от длины волны и мощности оптического излучения, а также от величины прямого блокирующего напряжения, которые могут быть полезны при выборе режимов работы фототиристоров.

Представленные в данной статье образцы оптических драйверов управления успешно прошли испытания и находят сегодня применение в качестве важнейших элементов систем управления современных ЛТТ и ЛТТ РР в различных режимах работы. На рис. 10 представлен один из примеров применения новых тиристоров, управляемых светом, и оптических драйверов управления в высоковольтном блоке для коммутации импульсов тока до 120 кА ($t_p = 0,7$ мс) в комплекте с шестиканальной платой управления, изготовленной на основе оптического драйвера типа 1. Работоспособность этой системы проверена на 5000 включений.

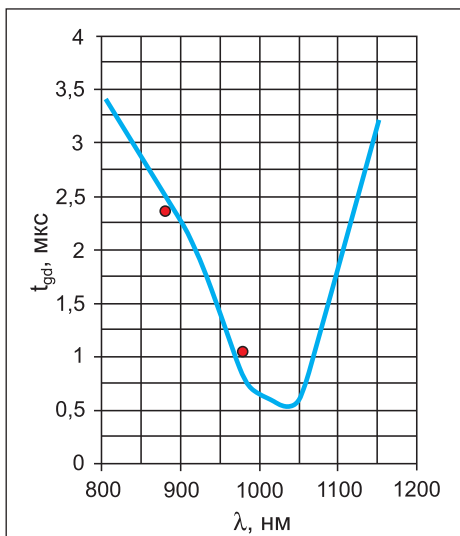


Рис. 6. Зависимость времени задержки включения ЛТТ РР от длины волны лазерного диода при $P_{LM} = 200$ мВт, $V_D = 100$ В. Сплошная кривая – расчет, точки – результаты измерений

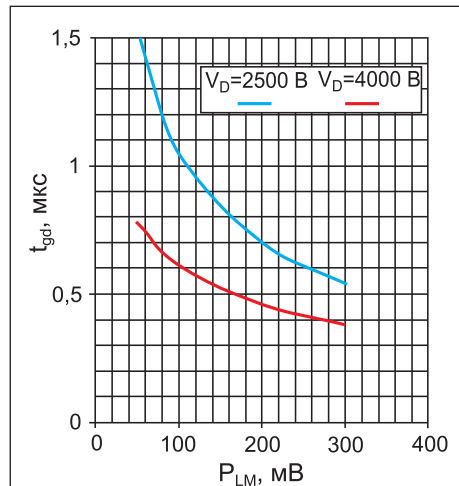


Рис. 8. Зависимость времени задержки включения ЛТТ РР (5000 В) от мощности оптического излучения и анодного напряжения при $\lambda = 980$ нм

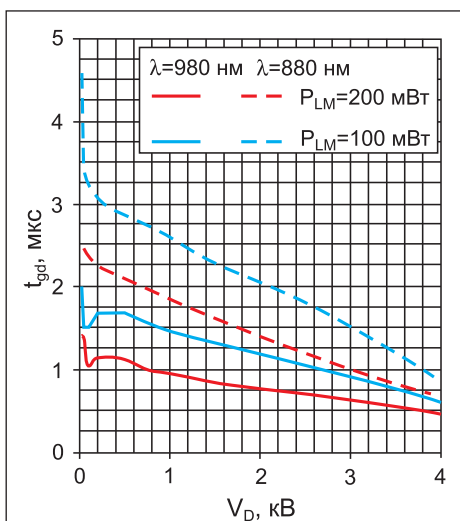


Рис. 7. Зависимость времени задержки включения ЛТТ РР от анодного напряжения и длины волны лазерного диода при значениях P_{LM} 100 и 200 мВт

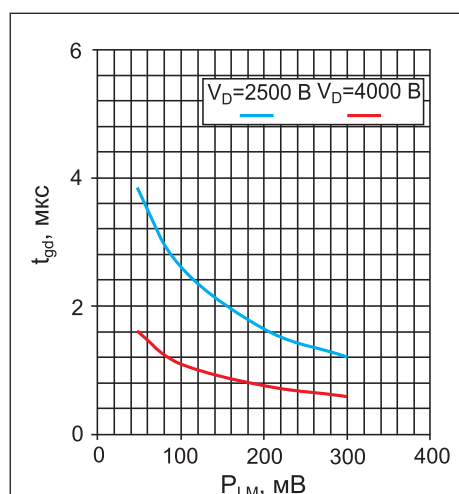


Рис. 9. Зависимость времени задержки включения ЛТТ (8000 В) от мощности оптического излучения и анодного напряжения при $\lambda = 980$ нм

Литература

1. Мартыненко В. А., Хапугин А. А., Гришанин А. В., Конюхов А. В. и др. Разработка мощных фототиристоров с функциями самозащиты // Силовая электроника. 2009. № 5.
2. Grishanin A. V., Martynenko V. A., Khapugin A. A., Konuchov A. V. et al. Novel Light Triggered Thyristors for Phase Control and Pulsed Power Applications // Bodo Power systems. June, 2012.

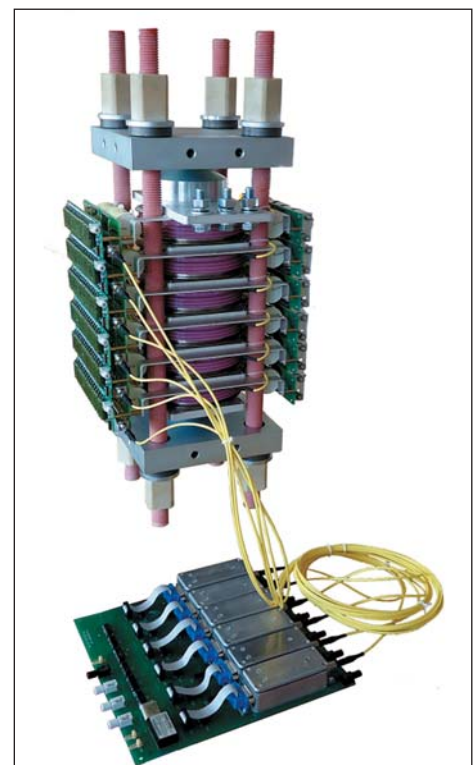


Рис. 10. Силовой высоковольтный блок с шестью последовательно включенными ЛТТ РР (5000 В) для импульсных применений на ток до 120 кА с шестиканальной платой управления на основе оптического драйвера типа 1