

УДК 621.373.8

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ДРАЙВЕРА ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЗАТВОРА ИМПУЛЬСНЫХ Nd:YAG ЛАЗЕРОВ

К.В. МЕЛЬНИКОВ

ООО "Лазеры и информационные технологии"
Скорины, 14, Минск, 220114, Беларусь

Поступила в редакцию 14 января 2010

Рассмотрены схематические решения построения драйверов управления электрооптическим затвором, собранным по оптической схеме с четвертьволновой пластиной. Проанализированы различные варианты построения драйвера управления на основе схемы Аркадьева–Маркса. Представлено разработанное устройство управления модулятором добротности и его выходные параметры.

Ключевые слова: модуляция добротности, управление электрооптическим затвором, ячейка Поக்கельса.

Введение

Одним из основных режимов работы твердотельных лазеров является режим генерации "гигантского" импульса. В данном режиме в твердотельном лазере осуществляется активная либо пассивная модуляция добротности резонатора [1–3]. Для случая активной модуляции в резонатор помещают модулятор (переключатель) добротности, который работает как управляемый оптический затвор — под воздействием управляющего сигнала изменяется оптическое пропускание затвора, а, следовательно, внутрирезонаторные потери. Возможно использование следующих типов модуляторов добротности при использовании активной модуляции [1, 3]:

- оптико-механические;
- электрооптические;
- акустооптические.

В данной статье рассмотрены особенности работы электрооптических модуляторов добротности твердотельных лазеров. Оптический кристалл модулятора добротности данного типа должен обладать высокой контрастностью [2]. Схема управления модулятором добротности должна обеспечивать открывание электрооптического затвора (минимальные потери в резонаторе лазерной системы) в момент генерации "гигантского" импульса и максимальные потери в резонаторе во время "молчания".

Оптическая схема

Современным вариантом построения электрооптического затвора является использование оптической схемы ячейки Поக்கельса с четвертьволновой пластинкой. Данная схема приведена на рис. 1.

Использование вышеупомянутой схемы позволяет избегать наличия постоянного запирающего смещения на двулучепреломляющем кристалле. Присутствие высоковольтного запирающего смещения способствует протеканию электрохимических процессов в кристалле модулятора, что, в конечном итоге, приводит к его повреждению.

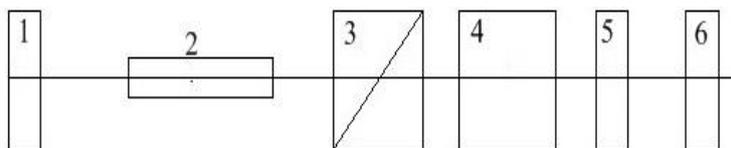


Рис. 1. Оптическая схема четвертьволновой ячейки Погкельса с фазосдвигающей пластинкой: 1 — выходное зеркало; 2 — активный элемент; 3 — поляризатор; 4 — электрооптический кристалл; 5 — четвертьволновая пластинка; 6 — глухое зеркало

Графики управляющего напряжения и выходной мощности излучения лазера для электрооптического затвора, построенного по данной схеме, приведены на рис. 2.

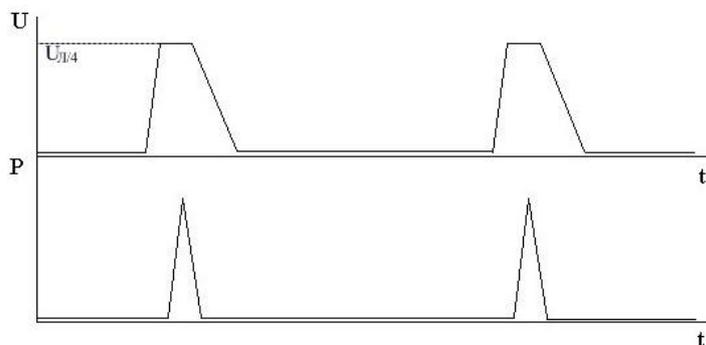


Рис. 2. Управляющее напряжение кристалла электрооптического затвора и выходное излучение лазера для схемы с фазовой пластинкой.

Недостатком данной оптической схемы является некоторое усложнение процесса юстировки по сравнению со схемой, не содержащей четвертьволновой пластинки. Кроме того, требуемая точность изготовления фазовой пластинки достаточно высокая. Однако отсутствие постоянного запирающего напряжения амплитудой в несколько киловольт является существенным достоинством данного технического решения.

Электрическая схема

Для управления кристаллом электрооптического затвора электронная схема драйвера должна обеспечить поступление на электроды кристалла высоковольтного импульса амплитудой в несколько киловольт и длительностью фронта 7–50 нс [2]. Также весьма существенным параметром является длительность импульса. При недостаточной длительности отпирающего импульса возможен эффект постгенерации лазера, который может привести к выходу из строя элементов оптической схемы излучателя [1, 2]. Требуемые величины длительности высоковольтного импульса описаны в [4, 5].

К другим техническим требованиям относятся:

- возможность регулировки четвертьволнового напряжения кристалла [3];
- минимальный джиттер между фронтами импульса запуска драйвера и импульсом на электродах кристалла;
- повышенная надежность работы в условиях агрессивной среды;
- предотвращение пьезоэлектрического "звона" кристалла и т.п.

Возможные построения драйверов электрооптического затвора для описанной оптической схемы следующие:

- мощный ключ с высоковольтным трансформатором, обеспечивающим требуемую величину напряжения;
- мощный ключ, нагруженный на высоковольтный трансформатор, который возбуждает формирующую линию с линейным либо нелинейным характеристическим сопротивлением (однородную либо неоднородную);
- генератор высоковольтного импульса, использующий схему Аркадьева–Маркса;
- высоковольтный ключ.

Схема, использующая мощный ключ с высоковольтным трансформатором, обладает существенным недостатком. На ней достаточно сложно получить длительность фронта импульса менее 40–50 нс. Схема подобного драйвера описана в [6]. Другая схема, использующая трансформатор, описана в [7]. В этой схеме длительность фронта импульса составила порядка 100 нс.

Схема, использующая длинную линию для формирования импульса, является более предпочтительной, особенно при использовании длинной линии с неравномерным волновым сопротивлением. Такое решение позволяет минимизировать количество пассивных компонентов в устройстве, тем самым уменьшив габаритные и стоимостные показатели устройства. Однако при использовании повышающего трансформатора в данной схеме основной недостаток предыдущей схемы — затягивание фронтов сигнала в трансформаторе — не устраняется. Если же использовать непосредственное возбуждение формирующей линии высоковольтным ключом, исчезает преимущество относительно низковольтного (сотни вольт) напряжения питания данной схемы и переход к киловольтному питанию.

Принцип действия генератора Аркадьева–Маркса состоит в параллельном заряде батареи конденсаторов и дальнейшей их коммутации для последовательного разряда, что позволяет использовать недорогие низковольтные компоненты для получения импульсов высокого напряжения. В качестве элементов переключения в данной схеме высоковольтного генератора можно использовать неуправляемые разрядники, управляемые разрядники, биполярные транзисторы в лавинном режиме работы, лавинные транзисторы, мощные высоковольтные полевые транзисторы. Генератор Аркадьева–Маркса на разрядниках описан в [1].

Недостатком использования разрядников является то, что значения напряжения срабатывания разрядника для постоянного и изменяющегося подаваемого напряжений существенно отличаются. Так, в зависимости от скорости нарастания входного напряжения, момент срабатывания разрядника с номинальным постоянным напряжением разряда в 1000 В при нарастании входного напряжения со скоростью 100 В/мкс может достигать 1400–1500 В., что делает сложным задачу как срабатывания драйвера в момент времени с достаточно жестким допуском, так и минимизации джиттера устройства.

Использование биполярных транзисторов в режиме лавинного пробоя является достаточно неплохим решением для обсуждаемой схемы. Простейшим вариантом является используемая фирмой "Continuum" схема, подобная описанной в [1], в которой вместо разрядников использованы одиночные биполярные транзисторы в лавинном режиме. Первый транзистор является запускающим, остальные жестко установлены в лавинном режиме с токоограничивающим резистором в цепи базы. При этом требуется, чтобы напряжение питания транзисторов было близко к напряжению лавинного пробоя. Отсюда вытекает недостаток схемы — невозможность получить регулировку выходного напряжения в больших пределах. Главным достоинством схемы является отсутствие значительных питающих напряжений (в разных вариантах исполнения данной схемы напряжения питания колеблются от 350 до 700 В). Типичное выходное напряжение данной схемы лежит в пределах 3200–3500 В.

Однако некоторые применения требуют регулировки амплитуды выходного импульса в пределах 3200–5300 В. Для построения подобного генератора высоковольтного импульса требуется перейти от одиночного лавинного транзистора в качестве коммутирующего элемента схемы Аркадьева–Маркса к линейке лавинных транзисторов. В схемах, описанных в [8, 9], использовано данное решение, при этом в линейке схемы [8] включено по 3 транзистора, линейка схемы [9] содержит 8 транзисторов.

Для лавинного транзистора ток в нагрузке описывается выражением

$$I_n = U_{кбо} - U_{кзо} / Z_n.$$

Используя данное соотношение, можно выбирать наиболее подходящие биполярные транзисторы для работы в лавинном режиме [9].

Кристалл электрооптического затвора достаточно хорошо моделируется емкостью, то есть можно считать, что схема работает на емкостную нагрузку. Откуда, зная требуемое время разряда нагрузочной емкости (допустим, 10 пФ), легко подсчитать величину тока, кото-

рый для емкости кристалла, не превышающей 10 пФ, и требуемом напряжении порядка 5 кВ находится в пределах 5 А.

В работах [8, 9] возможность регулировки выходного напряжения не рассматривалась. Обе схемы были выполнены по указанному принципу — генератор Аркадьева-Маркса с линейкой транзисторов в лавинном режиме в качестве коммутирующих элементов. В обоих описанных устройствах использовано по 5 линеек, также упомянуто, что увеличение количества линеек свыше 6 не приводило к существенному улучшению результатов [8].

Увеличение диапазона рабочих напряжений линеек лавинных транзисторов в схеме генератора высоковольтного импульса может быть достигнуто путем включения части транзисторов в усилительном режиме. При этом один либо пара транзисторов в линейке работает в режиме с закороченной базой (либо с токоограничивающим резистором в цепи базы), а 2–4 остальных транзистора имеют взвешенный трансформаторный запуск. При этом, как показывают эксперименты, схема, построенная из 4 линеек по 6 транзисторов начинает выдавать длительность фронта импульса на нагрузке 10 пФ менее 10 нс начиная с уровня выходного напряжения 2900 В, и работает уверенно до уровней 5200–5300 В. В нижней части диапазона питающих напряжений запускаемые транзисторы работают в режиме усилителей со сверхбольшим коэффициентом усиления, транзисторы же с закороченной базой обеспечивают обострение фронта импульса. По мере увеличения напряжения питания, запускаемые транзисторы переходят в режим классического лавинного пробоя, обеспечивая тем самым увеличение диапазона выходных напряжений.

С учетом вышеизложенного был спроектирован блок управления электрооптическим затвором на основе схемы Аркадьева-Маркса, содержащей 4 линейки по 4 лавинных транзистора в каждой. Линейка лавинных транзисторов содержит 3 транзистора в режиме усилителя со сверхбольшим коэффициентом усиления, и один в режиме лавинного ключа с закороченной базой.

Фронт выходного импульса данного драйвера, работающего на нагрузку емкостью 22 пФ, представлен на рис. 2

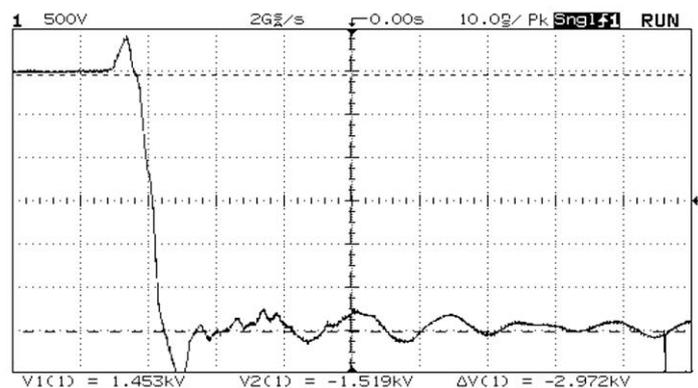


Рис. 2. Фронт выходного импульса модуля управления электрооптическим затвором

Длительность фронта импульса составляет порядка 5 нс при амплитуде 3 кВ. Для снятия оциллограмм использовался осциллограф типа Hewlett-Packard HP54616B с пробником Elditest GE3421.

Использование обычных транзисторов в лавинном режиме часто приводит к существенному ухудшению надежности устройств. Дополнительные причины ухудшения надежности таковы:

- разброс лавинных параметров, слабо контролируемых в процессе производства обычных биполярных транзисторов;
- возможность возникновения вторичного пробоя;
- возможность дополнительной локализации тока, вызванной неравномерным пробоем коллекторного перехода;
- температурная нестабильность параметров.

Улучшить надежность схем можно посредством использования лавинных транзисторов, что, однако, приводит к существенному увеличению стоимости изделия. Анализ возможных вариантов выбора лавинных транзисторов приведен в [10].

В [4] была сделана попытка использовать в качестве высоковольтных ключей схемы генератора Маркса высоковольтные полевые транзисторы (MOSFET). Поскольку лавинный режим в данном случае крайне не рекомендован, транзисторы работали в качестве усилителей со сверхбольшим коэффициентом усиления. Как показали результаты работы, использование более 4-х каскадов схемы Аркадьева–Маркса не дает существенного улучшения выходного напряжения, что, очевидно, связано с увеличенными относительно биполярных транзисторов в лавинном режиме токами утечки мощных высоковольтных полевых транзисторов.

Заключение

Использование схемы Аркадьева–Маркса для построения блоков управления электрооптическими затворами имеет ограничения по числу каскадов генератора, причем оптимальное число каскадов лежит в пределах 4–5. Применение в качестве высоковольтных ключей линейки лавинных транзисторов дает дополнительные преимущества в увеличении диапазона регулировки выходного напряжения при совместном использовании элементов линейки как в усилительном, так и в ключевом режиме. Использование элементов высоковольтного ключа только в усилительном режиме не предоставляет существенных преимуществ. Представленный драйвер управления электрооптическим элементом, в котором реализованы вышеупомянутые тезисы, обеспечивает малую длительность переднего фронта управляющего импульса (не хуже 5 нс) при работе на относительно высокую емкость кристалла нагрузки (не менее 22 пФ). По сравнению с драйвером фирмы "Continuum" обеспечивает существенно больший диапазон регулировки выходного высоковольтного импульса (3200–5300 В против 3200–3500 В у аналога) при одинаковых значениях джиттера.

DESIGN SPECIFICS OF ELECTROOPTIC Q-SWITCH DRIVER FOR PULSED Nd:YAG LASER

K.V. MELNIKOV

Abstract

Schematic design of Q-Switch Drivers for Pockels Cell based optical arrangement with quarterwave plate is considered. Schematic solutions of Q-Switch driver design based on Marx Bank Generator are analyzed. Parameters of constructed Q-Switch Driver are presented.

Литература

1. *Koechner W.* Solid-State Laser Engineering. Berlin 1999
2. *Тарасов Л.В.* Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М., 1981
3. *Микаэлян А.Л., Тер-Микаэлян М.Л., Турков Ю.Г.* Оптические генераторы на твердом теле. М., 1967
4. *Melnikov K., Biruchinsky S.* // ICUMT-2009. St. Petersburg. Oct. 2009.
5. *Мельников К.В.* // РНТК "Оптика неоднородных структур". Могилев, 2004.
6. *Barnes N.P., Nichols C.* // NASA Tech Briefs. July 1999
7. *Song I.S., Choi Y.S., Park Y.C., Kang E.C.* US Patent 5,457,416. Oct. 10. 1995
8. *Liu J., Shan B., Chang Z.* // Rev. of Sci. Instr. 1998. Vol. 69., N 8. P. 3066–3067.
9. *Rai V.N., Shukla M., Khardekar R.K.* // Meas.Sci. Technol. 1994. Vol. 5. P. 447–449.
10. *Дьяконов В.П.* Лавинные транзисторы и тиристоры. Теория и применение. М., 2008.