

**ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 621.373.8

**МЕТОДИКА МИНИМИЗАЦИИ МАССОГАБАРИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЗАТВОРА ДЛЯ  
ИМПУЛЬСНЫХ Nd:YAG ЛАЗЕРОВ**

К.В. МЕЛЬНИКОВ

*ООО «Лазеры и Информационные Технологии»  
Скорины, 14, Минск, 220114, Беларусь**Поступила в редакцию 15 сентября 2010*

Предложена методика разработки схемы и учета конструктивных особенностей модуля управления электрооптическим затвором для импульсных Nd:YAG лазеров, имеющая целью минимизацию массогабаритных параметров устройства. Представлены основные технические характеристики разработанного с использованием данной методики модуля управления затворами из кристаллов KD\*P и LiNbO<sub>3</sub>.

*Ключевые слова:* модуляция добротности, управление электрооптическим затвором, ячейка Погкельса

**Введение**

Одним из основных режимов работы твердотельных лазеров является режим модуляции добротности резонатора, позволяющий получить на выходе лазера мощные «гигантские» импульсы излучения длительностью 5–100 нс. [1]. В настоящее время для такого режима генерации в основном используются электрооптические затворы (ЭОЗ) на кристаллах KD\*P и LiNbO<sub>3</sub>, которые в отличие от пассивных, акустооптических и оптико-механических затворов обеспечивают минимальные длительности (5–20 нс.) и джиттер ( $\pm 1$  нс) генерируемых импульсов, максимальные эффективность и стабильность выходного излучения лазера [1, 2].

Целью данной работы является разработка малогабаритного высокоэффективного и надежного драйвера для ЭОЗ импульсного Nd:YAG лазера на основе кристалла LiNbO<sub>3</sub>.

**Оптическая схема лазеров с ЭОЗ**

Для получения режима «гигантского» импульса в резонаторе твердотельного лазера можно использовать следующие оптические схемы [1]:

- полуволновая схема, требующая полуволнового напряжения;
- «классическая» четвертьволновая схема, использующая четвертьволновое напряжение запириания, для открывания ЭОЗ сбрасываемое до нулевого уровня (Off-type);
- четвертьволновая схема, использующая фазовую пластинку. Такая схема использует нулевой уровень напряжения для обеспечения запертого состояния резонатора, и подачу четвертьволнового напряжения для отпириания затвора (On-type).

Возможные оптические схемы построения лазеров с ЭОЗ представлены на рис. 1.

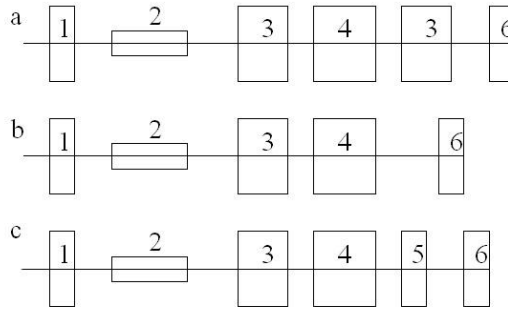


Рис.1. Оптические схемы построения лазеров с ЭОЗ:

*a* – полуволновая схема включения ЭОЗ; *b* – «классическая» (Off-type) четвертьволновая схема включения ЭОЗ с запирающим смещением; *c* – четвертьволновая (On-type) схема включения ЭОЗ с фазовой пластинкой; 1 – выходное зеркало; 2 – активный элемент; 3 – поляризатор; 4 – электрооптический кристалл; 4 – четвертьволновая пластина; 5 – глухое зеркало

Четвертьволновая схема ЭОЗ по сравнению с полуволновой существенно выигрывает по требуемым уровням рабочего напряжения, а также не требует использования дополнительного поляризатора. Типичные значения управляющего напряжения  $U_{\lambda/4}$  для кристаллов KD\*P и LiNbO<sub>3</sub> составляет 3–6 кВ [1]. Величина  $U_{\lambda/2}$  соответственно в 2 раза больше.

«Классическая» реализация четвертьволнового ЭОЗ с точки зрения минимизации габаритов позволяет использовать меньшее количество оптических компонентов по сравнению с остальными схемами построения затворов. Габариты же электронного модуля управления для обоих вариантов реализации четвертьволнового ЭОЗ не имеют существенных различий. По указанным причинам для построения затвора Nd:YAG лазера была выбрана «классическая» четвертьволновая схема. Графики развития генерации выходной мощности излучения лазера с электрооптическим затвором, построенного по данной схеме, приведены на рис. 2.

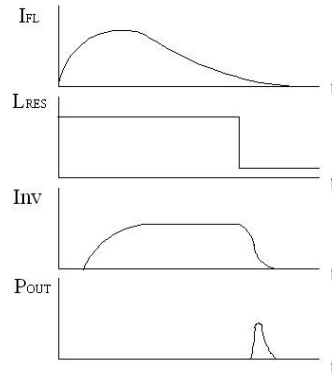


Рис. 2. Развитие генерации «гигантского» импульса в лазере с ЭОЗ:

$I_{FL}$  – ток, протекающий через лампу накачки;  $L_{RES}$  – потери в резонаторной системе лазера;  $Inv$  – параметры инверсной населенности резонатора;  $P_{OUT}$  – выходная мощность лазера

Недостатками данной схемы построения ЭОЗ являются присутствие на кристалле электрооптического элемента постоянного запирающего напряжения амплитудой в несколько киловольт, которое может вызывать электрохимические процессы в электрооптическом кристалле вплоть до его повреждения.

### Электрическая схема модуля управления ЭОЗ

С учетом рассмотренных требований схематическое решение должно обеспечить следующие требования, предъявляемые к модулю управления электрооптическим затвором:

- обеспечение регулируемого высоковольтного выходного напряжения  $U_{\lambda/4}$ ;
- длительность фронта управляющего импульса в диапазоне 10–20 нс.;

- джиттер не хуже  $\pm 1$  нс.;
- минимально возможные габариты устройства с учетом требований стандартов для высоковольтной техники.

Возможные построения выходных каскадов электрооптического затвора для вышеупомянутой оптической схемы следующие [3, 4]:

- 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.

С точки зрения уменьшения размеров, первые два варианта имеют существенные недостатки, вызванные относительно большими габаритами применяемых в них индуктивных элементов. Генератор Аркадьева-Маркса, несомненно, имеет определенные преимущества в случае работы с кристаллами  $KD^*P$ , особенно при использовании четвертьволновой оптической схемы с фазовой пластинкой. Однако, в случае работы в классической «четвертьволновой» схеме ЭОЗ, данное решение требует использования двух отдельных либо совмещенных высоковольтных источников, а также обладает либо меньшей надежностью, либо более высокой стоимостью в сравнении со следующим рассматриваемым вариантом.

Схема с высоковольтным ключом в качестве выходного каскада представляется наиболее интересной с точки зрения возможностей миниатюризации. В последние несколько лет производителями электронных компонентов был выпущен ряд высоковольтных МОП-транзисторов (MOSFET), позволяющих разрабатывать достаточно надежные высоковольтные устройства. Структурная схема такого модуля управления ЭОЗ представлена на рис. 3.

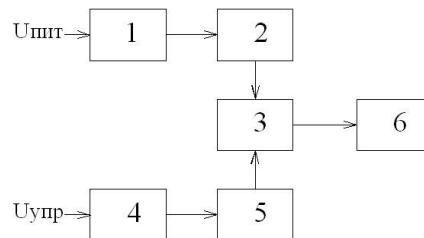


Рис. 3. Структурная схема модуля управления ЭОЗ: 1 – высоковольтный преобразователь (DC-DC converter); 2 – умножитель напряжения; 3 – высоковольтный ключ на полевых транзисторах MOSFET array HV switch); 4 – входные цепи управления; 5 – каскад запуска высоковольтного ключа; 6 – кристалл ЭОЗ.

Многие производители лазерной техники (в частности, южнокорейский «Lutronic», словенская «Fotona») проектируют свои модули управления ЭОЗ в соответствии с представленной на рис. 3 структурной схемой. Модуль управления электрооптическим элементом, разработанный автором на базе данной схемы, без применения методики минимизации, представлен на рис. 4.

Данный модуль по требованию заказчика имеет два отдельных регулируемых высоковольтных источника – источник напряжения запирающего кристалла и источник питания высоковольтного ключа. Такое решение более универсально. Оно позволяет использовать в качестве элементов электрооптического затвора кристаллы как  $KD^*P$ , так и  $LiNbO_3$ . Модуль позволяет работать с уровнями запирающего напряжения до 5.3 кВ, амплитуда импульса сброса может достигать 5.5 кВ при длительности фронта 12–15 нс. на нагрузке 10 пФ. Габаритные размеры модуля составляют 120 x 70 x 35 мм.

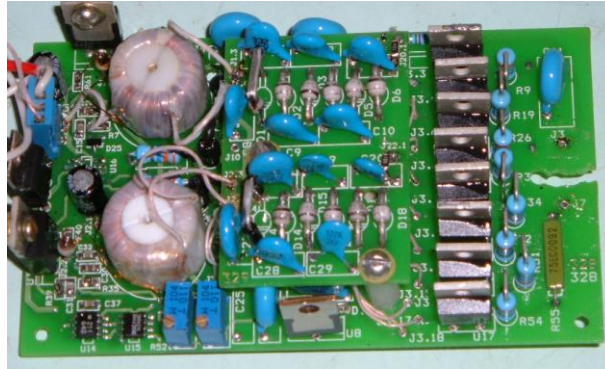


Рис. 4. Модуль управления ЭОЗ с высоковольтным ключом на основе линейки полевых транзисторов, разработанный по «классической» схеме

Для проведения минимизации можно применить следующие методы:

- схемная минимизация;
- конструктивная минимизация.

Схемная минимизация включает в себя следующие шаги:

- оптимизацию построения системы в целом, выбор оптимальных режимов работы;
- оптимизацию схемы высоковольтного источника напряжения;
- оптимизацию схемы высоковольтного ключа;
- оптимизацию схемы запуска.

Конструктивная минимизация включает в себя следующие приемы:

- максимально возможное использование SMD-компонентов (компонентов поверхностного монтажа);
- выбор элементной базы последнего поколения с максимально возможной степенью миниатюризации;
- пространственное разнесение высоковольтных контактов;
- оптимизация индуктивных элементов.

Первый способ, которым можно воспользоваться для минимизации источника питания, неочевиден. Тем не менее, разделение источника питания дает нам определенные преимущества. Вместо того, чтобы работать с напряжением от 0 В до 4 кВ, мы изменяем режим работы на работу от  $-2$  кВ до  $+2$  кВ. Данное решение позволяет, во-первых, уменьшить расстояния на печатной плате между проводом 0 В и высоковольтными проводами  $\pm 2$  кВ, а также использовать электронные компоненты, рассчитанные на меньшее напряжение (соответственно, имеющие меньшие габариты). Во-вторых, от очень часто используемой схемы обратноходового преобразователя напряжения (flyback DC-DC конвертера) с умножителем напряжения на выходе мы можем перейти к «чистому» обратноходовому преобразователю. Экономия на площади, используемой под схему умножителя напряжения, как минимум компенсирует площадь, занимаемую вторым преобразователем. Требуемая мощность двух «половинных» преобразователей примерно вдвое меньше таковой для одиночного источника высокого напряжения, что позволяет использовать сердечники трансформаторов меньшего типоразмера.

Кроме того, дополнительным преимуществом разделенного высоковольтного источника является то, что схема позволяет работать с ЭОЗ на основе кристаллов  $\text{LiNbO}_3$ . Типичным представителем изделий на кристаллах данного типа является электрооптический элемент МНЛ-05, производящийся в Российской Федерации.

Оптимизация схемы высоковольтного ключа на основе линейки полевых транзисторов (MOSFET) со «взвешенным» запуском производится выбором оптимального режима работы и комплектующих, обладающих минимальными размерами.

Ток через высоковольтный ключ определяется по формуле

$$I_{HVSW} = CdU_C/dt \quad (1)$$

откуда можно определить импульсный ток, протекающий через высоковольтный ключ, требуемый для обеспечения необходимой скорости отпираания ЭОЗ. Кристалл  $\text{LiNbO}_3$  электрооптического затвора МНЛ-05, согласно спецификации производителя, обладает емкостью до 60 пФ.

Реальные образцы кристаллов последнего поколения обладают емкостью порядка 20–30 пФ. Полуволновое напряжение для кристалла ниобата лития зависит от геометрических размеров кристалла и определяется формулой [5]:

$$U_{\lambda/2} = \lambda h / (n_0^3 r_{33} l) \quad (2)$$

где  $h$  – толщина кристалла;  $l$  – длина кристалла;  $r_{33}$  – электрооптическая постоянная, примерно равная  $3 \cdot 10^{-11}$  м/В;  $n_0$  – показатель преломления обыкновенной волны кристалла.

Из (2) можно получить требуемый уровень четвертьволнового напряжения для кристалла ниобата лития. Оно составляет примерно 1700–1800 В для случая используемого кристалла МНЛ-05. Для компенсации пьезоэлектрического эффекта в кристаллах ниобата лития используется управляющее напряжение с переполюсовкой. Уровень отрицательного напряжения, в соответствии со спецификацией производителя, составляет порядка 1200–1500В.

Требуемая величина времени включения добротности для наиболее распространенных лазеров на кристаллах Nd:YAG должна составлять  $\sim 10$ –20 нс, при более коротком времени включения добротности порядка 2–3 нс. (типичное время двойного обхода резонатора) имеет место субструктура генерируемого импульса с периодом порядка  $\tau_0$  – времени двойного обхода резонатора [2]. При более длительном времени включения ЭОЗ в диапазоне 30-50 нс. возрастают внутрирезонаторные потери, при дальнейшем увеличении времени включения добротности возможна генерация нескольких импульсов [6].

С целью уменьшения разрядного тока высоковольтного ключа (в целях минимизации размеров модуля управления ЭОЗ) используем максимально возможную длительность включения добротности – 20 нс.

В соответствии с (1), высоковольтный ключ должен обеспечить протекание импульсного тока величиной порядка 4А.

Поскольку время включения добротности существенно меньше описанного в [7], цепь запуска не требует особенно высоких скоростей, и должна обеспечить относительно быстрый заряд емкостей  $C_{311}$  элементов линейки полевых транзисторов, формирующих высоковольтный ключ. В данном устройстве реализован взвешенный запуск элементов линейки высоковольтного ключа на основе распределенного трансформатора.

Конструктивные приемы по минимизации габаритов описаны выше.

Созданный на основе представленной методики модуль управления четвертьволновым ЭОЗ на основе кристалла LiNbO<sub>3</sub> представлен на рис. 5.

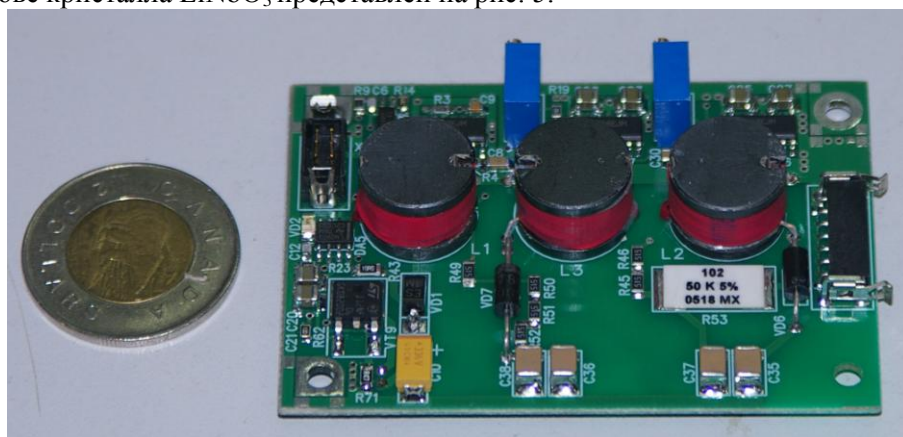


Рис. 5. Модуль управления четвертьволновым ЭОЗ на основе кристалла LiNbO<sub>3</sub>, созданный с применением методики минимизации массогабаритных параметров

Осциллограммы управляющего напряжения на кристалле электрооптического элемента и выходного излучения лазера представлены на рис. 6.

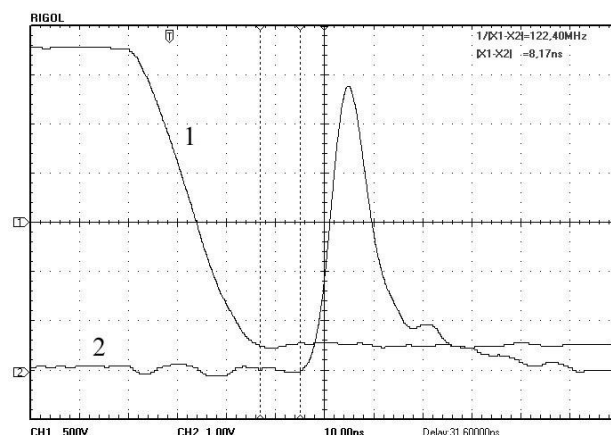


Рис. 6. Осциллограммы импульса напряжения на кристалле ЭОЗ (1) и выходное излучение лазера (2)

### Заключение

Использование представленной в данной работе методики минимизации массогабаритных параметров модуля управления ЭОЗ на основе кристалла ниобата лития позволило создать устройство управления, обладающее следующими техническими параметрами:

- габариты	75×52×16 мм
- вес, г.	не более 50
- напряжение положительного смещения, кВ	1,0...2,0
- напряжение отрицательного смещения, кВ	1,0...2,0
- длительность фронта импульса сброса на нагрузку 20пФ, нс	не более 20
- максимальная емкость нагрузки, пФ	60
- джиттер, нс	±1
- максимальная частота повторения импульсов, Гц	100
- диапазон напряжения питания, В	18 – 36
- диапазон рабочих температур, С	-32...+55

## SIZE AND WEIGHT MINIMIZATION PROCEDURE OF PULSED ND:YAG LASER ELECTROOPTIC Q-SWITCH DRIVER

K.V. MELNIKOV

### Abstract

Electrooptic Q-Switch Driver size and weight minimization procedure is presented. Schematic and assembling solutions are considered. Based on the procedure Q-Switch Driver has been designed. The presented Q-Switch Driver parameters are given.

### Литература

1. *Koechner W.* Solid-State Laser Engineering, Springer-Verlag, Berlin, 2006.
2. *Тарасов Л.В.* Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М., 1981.
3. *Melnikov K., Biruchinsky S.* // Distinctive Features of a Control of a Pockels Cell Based Q-Switch used in Nd:YAG FPSS Lasers. ICUMT. St. Petersburg, 2009.
4. *Мельников К.В.* // Докл. БГУИР. 2010. № 3 (49). С. 46–50.
5. *Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е.* Лазеры на неодимовом стекле. М. 1990.
6. *Микаэлян А.Л., Тер-Микаэлян М.Л., Турков Ю.Г.* Оптические генераторы на твердом теле. М. 1967.
7. *Терновский Д.С., Тогатов В.В.* // Научно-технический вестник СПбГУ. ИТМО. 2008. № 57, С. 55–63.