

# ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 621.373.826

## УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ИМПУЛЬСА ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРА НА Yb–Er-СТЕКЛЕ С ЗАТВОРОМ НА ЭФФЕКТЕ НАРУШЕНИЯ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

© 2009 г. А. Б. Губин; Ю. Б. Пирожков; Е. С. Сергеев

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

E-mail: es\_sergeev@mail.ru

Проведено измерение задержки срабатывания по сечению рабочей зоны оптомеханического затвора на эффекте нарушения полного внутреннего отражения. Показано влияние задержки срабатывания на форму импульса генерации лазера на Yb–Er-стекле при различных параметрах управляющих сигналов. Для заданных конфигурации лазера и конструкции затвора указаны условия получения минимальной длительности импульса генерации при фиксированной выходной энергии.

*Ключевые слова:* НПВО-затвор, лазер на Yb–Er-стекле.

Коды OCIS: 140.0140, 140.3540.

*Поступила в редакцию 13.05.2009.*

### Введение

Лазерные затворы на основе эффекта нарушения полного внутреннего отражения (НПВО) уже достаточно давно применяются для модуляции добротности твердотельных лазеров (ТТЛ) моноимпульсного режима работы [1]. К их достоинствам можно отнести высокое пропускание в открытом состоянии (более 98%), отсутствие температурной зависимости начального пропускания и времени переключения, возможность использования в широком спектральном диапазоне от УФ до дальнего ИК (при соответствующем выборе материала), малые размеры и вес, низкие управляющие напряжения (100–400 В), высокую лучевую прочность. Недостатком затворов НПВО является относительно большое время переключения (200–300 нс) при относительно невысоком контрасте (начальное пропускание обычно выше 20%), что ограничивает их применение в ТТЛ с большим коэффициентом усиления (более  $0,2 \text{ см}^{-1}$ ) [1].

На сегодняшний день затворы НПВО в основном нашли применение в миниатюрных и малогабаритных лазерах ближнего и среднего ИК диапазонов [2, 3], в частности, в лазерах на

основе иттербий-эрбиевого стекла с длиной волны 1,54 мкм. В последнее время интерес к лазерам данного типа продолжает возрастать в связи с их использованием в малогабаритных дальнометрах, при этом актуальной задачей является обеспечение стабильной формы импульса генерации при фиксированной выходной энергии. Выполнение этих требований возможно при минимизации факторов, негативно влияющих на динамику срабатывания затвора. Неоптимальная форма модуляционной характеристики (МХ) затвора (зависимости коэффициента пропускания от времени в пределах цикла модуляции) может приводить к увеличению длительности лазерного импульса, искажению его формы, появлению повторных импульсов и к снижению эффективности. Подобные отклонения не допустимы, в частности, в лазерной дальнометрии, так как приводят к увеличению погрешности при измерении дистанции или к обнаружению ложных целей.

Несмотря на большое количество публикаций, касающихся применения затворов НПВО для модуляции добротности ТТЛ, особенности работы затворов НПВО, включая влияние их характеристик на динамику генерации лазера,

недостаточно полно отражены в литературных источниках. Так, многие авторы не принимают во внимание то обстоятельство, что в силу конструктивных особенностей срабатывание затворов данного типа происходит неодновременно по его апертуре. Попытки учесть это обстоятельство предприняты в ряде работ [4, 5]. Однако использованные в данных работах приближения описывают идеализированную ситуацию без учета конструктивных особенностей и ряда физических факторов.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование временных характеристик затворов НПВО и оценка их влияния на генерацию лазера.

### Конструкция затворов НПВО и принцип управления

В данной работе исследовался вариант затвора НПВО, серийно выпускаемого “ЛОМО”. Конструктивно затвор состоит из двух одинаковых стеклянных призм Дове, соединенных по краю и разделенных в центральной зоне воздушным зазором. К одной из призм приклеен пьезоэлемент, на который подаются управляющие импульсы напряжения. Принцип управления затвором, подробно описанный в [6], позволяет обеспечить время включения порядка 200–300 нс. Подача импульса напряжения положительной полярности на пьезоэлемент приводит к расширению зазора между призмами, после чего начинается

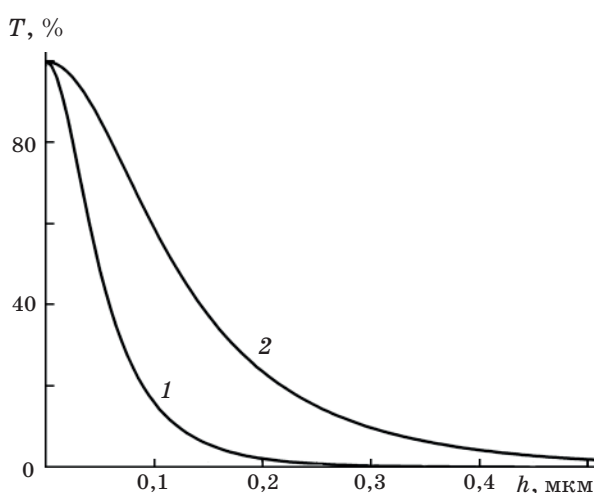


Рис. 1. Теоретическая зависимость коэффициента пропускания затвора от толщины воздушного зазора. 1 –  $\lambda = 0,63$  мкм, 2 –  $\lambda = 1,54$  мкм.

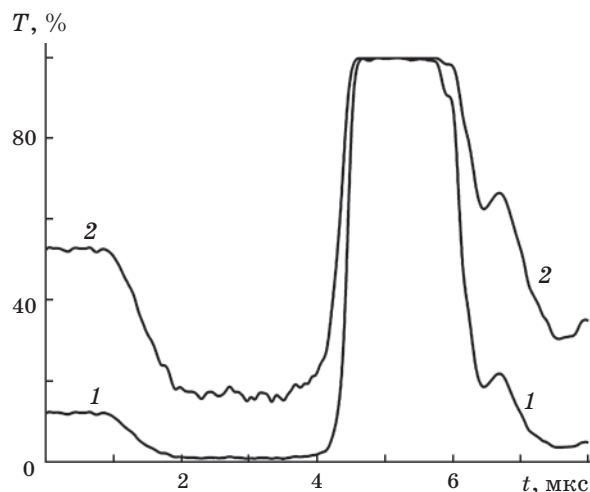


Рис. 2. Модуляционная характеристика затвора. 1 –  $\lambda = 0,632$  мкм, 2 –  $\lambda = 1,54$  мкм.

колебательный процесс, приводящий к смыканию зазора. Сброс управляющего напряжения в определенный момент времени приводит к резкому увеличению скорости смыкания зазора, в результате чего формируется фронт МХ затвора. Затвор предназначен для модуляции излучения, поляризованного в плоскости падения, при этом лазерный пучок входит в затвор под углом Брюстера. Угол падения излучения на зазор составляет примерно  $67^\circ$ . Зазор имеет поперечные размеры  $6 \times 12$  мм и толщину 0,1 мкм. Зависимость пропускания от ширины зазора определяется по формулам, приведенными в [1]. На рис. 1 приведены зависимости коэффициента пропускания затвора от ширины зазора для длин волн излучения  $\lambda = 0,63$  и 1,54 мкм, а на рис. 2 – характерные МХ для соответствующих длин волн.

### Исследование задержки срабатывания

Рассмотрим динамику смыкания зазора затвора НПВО, используя приближение, применяемое авторами работы [4]. При этом предполагается, что толщина воздушного зазора  $h$  до момента соприкосновения в центре зазора описывается зависимостью

$$h(X, t) = h(0, t) + (h(0, t) - h_0)X^2/X_{\max}^2, \quad (1)$$

где  $X = \{x, y\}$  – одна из поперечных координат зазора,  $X_{\max}$  – полуширина зазора по координате  $X$ ,  $h_0$  – исходная (стационарная) толщина зазора,  $t$  – время.

Зависимость  $h(0, t)$  в простейшем случае можно представить в виде

$$h(0, t) = h(0, 0) - v_h t, \quad (2)$$

где  $v_h$  – скорость смыкания затвора.

При этом для тех точек, где соприкосновение уже произошло,  $h(X, t) = 0$ . За момент времени  $t = 0$  целесообразно принять момент времени, когда  $h(X, 0) = h_0$ . Под длительностью фронта переключения  $\tau_{\text{п}}$  в дальнейшем будем понимать интервал времени, за который коэффициент пропускания для данной длины волны увеличивается от начального значения  $T_0$ , соответствующего толщине зазора  $h_0$ , до значения  $T_1$ . В нашем случае на длине волны  $0,63$  мкм  $T_0 = 16\%$ , значение  $T_1$  принято равным  $95\%$ , чему соответствует  $T_0 = 59\%$  и  $T_1 = 99\%$  на длине волны  $1,54$  мкм. В дальнейшем все результаты измерений и расчетов соответствуют длине волны  $0,63$  мкм.

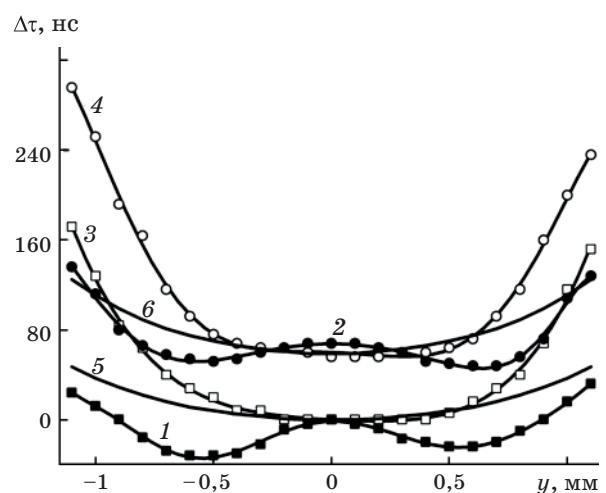
В рамках данного приближения считается, что скорость смыкания затвора до и после соприкосновения остается неизменной, а поверхности призм, образующих зазор, деформируются неупруго в точках соприкосновения и это не влияет на динамику смыкания в других точках по  $X$ . Ясно, что данное приближение является достаточно грубым, но может удовлетворительно описывать динамику смыкания до момента соприкосновения в центре зазора, т. е. при  $h(0, t) > 0$ .

Так как толщина зазора до момента смыкания имеет параболическую зависимость от координаты  $X$  и скорость смыкания меняется от центра к краям зазора по этой же зависимости, скорость переключения на краях будет меньше чем в центре и задержка переключения, измеренная по одному и тому же уровню пропускания, будет увеличиваться от центра к краям зазора. В результате при измерении в широком зондирующем пучке фронт МХ может быть уширен по сравнению с измерением в узком пучке за счет усреднения по координате  $X$ .

Необходимо также отметить, что на задержку срабатывания по сечению затвора могут влиять различные факторы, связанные с конструкцией затвора и принципом управления: исходная неплоскостность поверхностей призм, образующих зазор, деформация призмленного блока, неоднородность приклейки пьезоэлемента, гашение скорости смыкания зазора при соприкосновении призм и др.

На первом этапе работы исследовалась динамика изменения коэффициента пропускания группы однотипных затворов НПВО по сечению

зазора. Излучение стабилизированного He–Ne-лазера с длиной волны  $0,63$  нм фокусировалось в зону зазора, где диаметр пучка лазера составлял примерно  $0,25$  мм. Сканирование по зоне зазора осуществлялось путем перемещения затвора по двум координатам в плоскости, перпендикулярной оси пучка. Сигнал регистрировался с помощью быстродействующего фотоприемника на основе кремниевого рpn-фотодиода с приемной площадкой размером  $2 \times 2$  мм и постоянной времени  $12$  нс, а также цифрового осциллографа TDS-220 с полосой пропускания  $100$  МГц. Предварительно были измерены МХ различных затворов данного типа в центре затвора при  $x = 0$  и  $y = 0$ . Управление затвором осуществлялось с помощью импульсов напряжения длительностью  $\tau_{\text{упр}} \approx 2,5$  мкс и амплитудой, изменяющейся в пределах от  $100$  до  $150$  В. При этом длительность импульса управления подстраивалась для достижения минимальной длительности фронта МХ. Типовая МХ затвора приведена на рис. 2. На рис. 3 приведены зависимости задержки срабатывания затворов от координаты  $y$  (кривые 5, 6), иллюстрирующие применение приближения (1), (2) с учетом измеренной скорости  $v_h$ . Было обнаружено, что параметр  $v_h$  практически линейно растет с увеличением амплитуды управляющего напряжения  $U$  в диапазоне от  $100$  до  $150$  В, а длительность фронта,



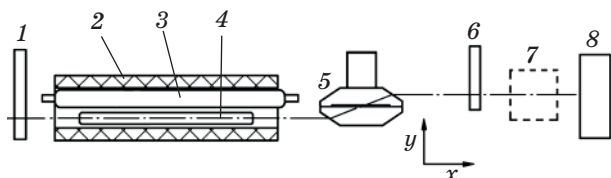
**Рис. 3.** Зависимости задержки срабатывания затворов от координаты  $y$  по сечению пучка генерации. 1, 2 – затвор № 1; 3, 4 – затвор № 2; 5, 6 – расчет по формулам (1) и (2). Уровень срабатывания по пропусканию на длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм: 1, 3, 5 –  $60\%$ ; 2, 4, 6 –  $90\%$ .

соответственно, обратно пропорциональна напряжению. Отмечено, что наблюдается некоторое отклонение от зависимости 2 для центральной зоны затвора даже в моменты времени, предшествующие смыканию зазора.

Далее были проведены измерения МХ по сечению для группы затворов и отобраны 2 затвора (№ 1 и № 2) с различной зависимостью  $h(y, t)$ , где  $y$  – координата по сечению пучка в направлении длины зазора. МХ данных затворов при  $x = 0$  и  $y = 0$  соответствовала приведенной на рис. 2. Задержка срабатывания затвора № 1 изменялась немонотонно от центра к краю по длине зазора и не превосходила по абсолютной величине 35 нс в зоне размером  $\pm 2,75$  мм от центра зазора, которая соответствовала ширине лазерного пучка 2 мм. Задержка срабатывания затвора № 2 в той же зоне резко увеличивалась к краю и достигала примерно 130 нс на краях. Зависимости задержки срабатывания по  $y$  для двух выбранных затворов, представлены на рис. 3 (кривые 1–4). При сканировании по  $x$  (по ширине зазора) задержка не превышала 20 нс на расстоянии  $\pm 1$  мм от центра (1/3 ширины зазора).

### Исследование длительности и формы импульса генерации

На втором этапе исследовались временные характеристики генерации лазера на иттербий-эрбиевом стекле с двумя выбранными затворами. Схема макета экспериментальной установки представлена на рис. 4. Глухое зеркало резонатора 1 имело радиус кривизны  $r = 1500$  мм и коэффициент отражения более 99,5% на длине волны  $\lambda = 1,54$  мкм, выходное зеркало 6 имело коэффициент отражения 87% и было просветлено с обратной стороны. Расстояние между зеркалами составляло 80 мм. Активный элемент 4 диаметром  $d_{аэ} = 2$  мм и длиной 30 мм был изготовлен



**Рис. 4.** Схема макета экспериментальной установки. 1 – глухое зеркало, 2 – диффузный отражатель, 3 – лампа накачки, 4 – активный элемент, 5 – НПВО-затвор, 6 – выходное зеркало, 7 – фотоприемник, 8 – измеритель энергии.

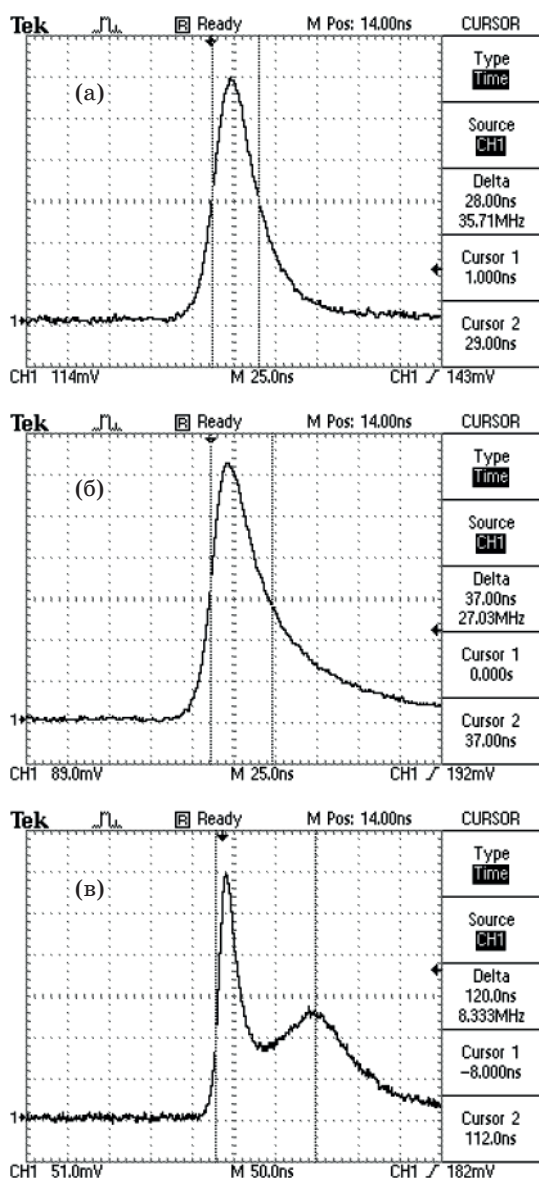
из хром-иттербий-эрбиевого фосфатного стекла ЛГС-ХМ (производства ИПЭ РАН) с концентрацией эрбия  $1 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup> и имел просветляющее покрытие на рабочих гранях с коэффициентом отражения менее 0,25%. Система накачки включала диффузный отражатель 2, внутри которого располагались активный элемент и лампа накачки 3. Схема накачки была оптимизирована с целью обеспечения равномерности распределения накачки и эффективности запаса энергии в активном элементе. Распределение поглощенной энергии в активном элементе рассчитывалось методом Монте-Карло, а затем на основе решения системы балансных уравнений [7] определялось пространственное распределение коэффициента усиления. Средний по сечению активного элемента в зоне  $0,8d_{аэ}$  коэффициент усиления составил  $0,05$  см<sup>-1</sup>, а его максимальное отклонение от среднего значения не превышало 8%. НПВО-затвор 5 осуществлял модуляцию добротности лазера при работе на проход через зазор, входная и выходная грани были ориентированы под углом Брюстера к оси излучения. Блок питания обеспечивал формирование разряда через лампу накачки (свободный разряд с отсечкой по достижении требуемой энергии накачки) и формирование импульсов управления затвором по окончании импульса накачки. Выходная энергия лазера регистрировалась с помощью измерителя энергии лазерных импульсов Ophir NOVA PE-50E0 8. Измерение длительности импульсов проводилось с помощью фотоприемника на основе InGaAs pin – фотодиода 7 с постоянной времени 2 нс. Все измерения проводились в однократном режиме генерации при фиксированной выходной энергии 12 мДж. Затвор устанавливался в лазер так, чтобы отклонение центра зазора от оси резонатора не превышало 0,05 мм, после чего проводилась юстировка резонатора по максимуму выходной энергии. Длительность импульса измерялась по уровню 0,5 амплитуды. Для измерения интегральной длительности импульса генерации  $\tau_{ген}$  (усредненной по сечению пучка) перед фотоприемником устанавливался диффузный рассеиватель.

Диаметр пучка излучения, измеренный с помощью диафрагмы по уровню 90% полной энергии, составлял около 1,7 мм, превышая примерно в 3 раза диаметр пучка основной моды.

При выделении с помощью внутррезонаторной диафрагмы нулевой поперечной моды как с затвором № 1, так и с затвором № 2 на выходе лазера при напряжении управления затвором  $U = 150$  В и длительности импульса управления

затвором  $\tau_{упр} = 2,5$  мкс формировался симметричный импульс с длительностью 25 нс.

При установке в резонатор лазера затвора № 1 при номинальных параметрах управления ( $U = 150$  В,  $\tau_{упр} = 2,5$  мкс) и энергии накачки 7 Дж без диафрагмы формировался импульс генерации симметричной формы с длительностью 28 нс (рис. 5а). При установке в резонатор лазера затвора № 2 без дополнительной диафрагмы картина генерации заметно изменялась. Длительность импульса при оптимальных параметрах управления составляла 35 нс.



**Рис. 5.** Форма импульса генерации. а – с затвором № 1,  $U = 150$  В,  $\tau_{упр} = 2,5$  мкс,  $\tau_{ген} = 28$  нс; б – с затвором № 1,  $U = 100$  В,  $\tau_{упр} = 2,5$  мкс,  $\tau_{ген} = 37$  нс; в – с затвором № 2,  $U = 100$  В,  $\tau_{упр} = 2,5$  мкс.

При изменении длительности импульса управления затвором на  $\pm 1$  мкс от оптимального значения с обоими затворами вначале происходило увеличение длительности импульса за счет затягивания его спада. При этом с затвором № 1 максимальная длительность импульса составила 37 нс. С затвором № 2 – длительность импульса увеличивалась до 47 нс, а затем формировались повторные импульсы генерации с амплитудой вплоть до 50% от амплитуды основного импульса, суммарная длительность импульса при этом могла превышать 120 нс. В обоих случаях уширение импульса сопровождалось некоторым падением энергии генерации, что требовало увеличения энергии накачки.

С затвором № 1 при изменении напряжения управления затвором от 80 до 150 В при оптимальной длительности импульса управления длительность импульса генерации уменьшалась с 37 нс (рис. 5б) до 28 нс. С затвором № 2 при напряжении 100 В и менее формировался повторный импульс (рис. 5в), при увеличении напряжения от 100 до 150 В длительность лазерного импульса уменьшалась с 45 до 35 нс. В обоих случаях изменение длительности импульса и напряжения управления в указанных диапазонах приводило к изменению длительности фронта МХ в центре затвора в диапазоне от 350 до 250 нс.

## Обсуждение

Результаты измерения задержки срабатывания затворов по сечению показывают, что она может значительно превышать значения, полученные с помощью (1), обычно используемым различными авторами. По измерениям различных затворов данной конструкции эта задержка может изменяться от 20 до 150 нс на 1/3 максимального размера зазора при средней длительности фронта 250–300 мкс. При типичных значениях задержки 50 нс обеспечивается стабильная генерация в лазерах на иттербий-эрбиевом стекле при длительности лазерного импульса 25–30 нс. Однако в некоторых случаях эта задержка может быть сравнима с длительностью фронта МХ (как в случае затвора № 2). Это предъявляет повышенные требования к юстировке лазеров (особенно многомодовых) с НПВО-затворами, контролю и отбору затворов по задержке срабатывания. Кроме того, требуется учет данного фактора при выборе соотношения между шириной зазора и диаметром лазерного пучка.

Проверка в составе лазера двух затворов с существенно отличающимися задержками срабатывания по сечению пучка генерации (порядка 35 нс для затвора № 1 и порядка 130 нс для затвора № 2) показало заметное влияние задержки на динамику генерации лазера. Разность длительности импульса для двух затворов при оптимальных настройках составила порядка 7 нс. Такая картина объясняется многомодовым характером излучения лазера. В первом случае, при равномерном распределении энергии накачки по сечению активного элемента и достаточно равномерном срабатывании затвора по сечению, условия развития поперечных мод излучения почти одинаковы. При этом длительность импульса генерации близка к длительности импульса в режиме генерации основной поперечной моды 25 нс. Во втором случае развитие генерации в периферийной части по сечению пучка замедляется в результате задержки срабатывания затвора, что и приводит к увеличению длительности импульса и появлению повторных срабатываний. Это подтверждает измерение задержки и длительности импульса генерации по сечению при сканировании фотоприемника по апертуре пучка. В периферийной части пучка импульс был несколько задержан относительно центра пучка и слегка уширен. Вторичные импульсы также наблюдались преимущественно в периферийной зоне пучка. Подобный механизм работает и при изменении параметров импульсов управления, подаваемых на пьезоэлемент затвора, и связан, видимо, как с увеличением фронта МХ, так и с увеличением задержки по сечению пучка. Очевидно, существенное влияние на динамику генерации оказывает и динамика смыкания затвора вблизи точки перегиба между фронтом и “полкой” МХ.

### Выводы

Установлено, что распределение задержки срабатывания НПВО-затворов по сечению может иметь сложную зависимость и достигать значений, сравнимых с длительностью фронта МХ на расстояниях значительно меньших поперечного размера зазора затвора. Задержка в затворе исследуемого типа может колебаться от 20 до

150 нс на расстоянии от центра, равном 1/3 максимального размера зазора по ширине и длине, при этом типичное значение составляет порядка 50 нс. Установлено, что при максимальной задержке на краю апертуры пучка 50 нс и менее и длительности фронта МХ менее 300 нс в лазере на иттербий-эрбиевом стекле формируется гладкий моноимпульс длительностью 25–30 нс. При увеличении задержки и фронта МХ происходят уширение импульса генерации и возникновение вторичных импульсов. При этом для НПВО-затворов с относительно большой задержкой срабатывания по сечению зазора требования к стабилизации сигналов электронного интерфейса должны быть более жесткими.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жильцов В.И., Кромский Г.И., Макаров В.Н., Рождествен В.Н., Сапрыкин Л.Г., Фелелов А.П., Хоменко С.И. Быстродействующий модулятор добротности лазера на эффекте нарушенного полного внутреннего отражения // ОМП. 1988. № 2. С. 1–3.
2. Денкер Б.И., Осико В.В., Сверчков С.Е., Сверчков Ю.Е., Фелелов А.П., Хоменко С.И. Высокоэффективные лазеры на эрбиевом стекле с модуляцией добротности затвором на основе нарушенного полного внутреннего отражения // Квант. электрон. 1992. Т. 19. № 6. С. 544–547.
3. Eichler H.J., Liu B., Kayser M., Khomenko S.I. ErYAG-laser at 2.94  $\mu\text{m}$  Q-switched by a FTIR-shutter with silicon output coupler and polarizer // Optical materials. 1996. V. 5. № 4. P. 259–265.
4. Bufetova G.A., Nikolaev D.A., Seregin V.F., Scherbakov I.A., Tsvetkov V.B. Long pulse Lasing with Q-switching by FTIR shutter // Laser Physics. 1999. V. 9. № 1. P. 314–318.
5. Назаров В.В., Парахуда С.Е., Храмов В.Ю. Особенности использования динамического градиентного отражателя в резонаторе твердотельного моноимпульсного лазера // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 1. С. 49–53.
6. Батов Ю.Н., Малинин С.М., Симин С.А., Шапиро Л.Л. Способ управления модулятором оптического излучения // Патент РФ № 2022433. 1994.
7. Батов Ю.Н., Губин А.Б., Пирожков Ю.Б., Шапиро Л.Л. Тепловой баланс в малогабаритных импульсных лазерах на эрбиевых стеклах с диодной накачкой // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 9. С. 5–10.