

ТЕРМООПТИЧЕСКИЙ ЗАТВОР И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА

A method of the Q-factor active modulation for pulsed lasers has been considered using a thermooptic gate, the operation of which is based on the phase transition "nematic liquid crystal – isotropic liquid". The generation modes of Nd-laser with thermooptic gate have been studied.

Возможность применения термооптических жидкокристаллических (ЖК) затворов для активной модуляции добротности твердотельных лазеров показана в работах [1,2]. В данной статье приведены результаты исследования режимов генерации неодимового лазера с таким ЖК-модулятором.

Затвор (рис.1) представляет собой тонкую жидкокристаллическую ячейку. В ней слой жидкого кристалла (3) размещается между стеклянными пластинами (1) с напыленными прозрачными электродами (2), к которым подводится напряжение. Зазор между пластинами фиксируется прокладками изолятора (4). Такая ячейка и поляризатор размещаются в резонаторе лазера.

В основу действия затвора положено специфическое свойство жидкокристаллического материала: резкое изменение оптических характеристик при нагревании вблизи точки фазового перехода нематический жидкий кристалл – изотропная жидкость (НБК–ИЖ). Первоначально ЖК-ячейка поддерживается при температуре на 5°С ниже температуры фазового перехода. Поддержание температурного режима осуществляется с помощью пропускания постоянного тока по электродам. Выбор параметров ячейки обеспечивает минимум оптического пропускания в исходном состоянии. По мере нагрева кристалла величина оптической анизотропии уменьшается до нуля при переходе жидкого кристалла в изотропную жидкость. Такое состояние соответствует максимуму оптического пропускания, т.е. открытому затвору.

Расчеты проводились для кристалла МББА (4-метоксибензилиден-4-бутиланилин), характерные параметры которого: температура просветления $T_{пр} = 45^\circ\text{C}$, величина оптической анизотропии $\Delta n(42^\circ\text{C}) = 0,16$, коэффициент температуропроводности $\kappa = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [3]. Толщина слоя ЖК при 100%-ой глубине модуляции оптического поглощения $d = 1,66 \text{ мкм}$, площадь ячейки $S = 1 \text{ см}^2$.

Для расчета оптического отклика ячейки на нагревание численными методами исследовалось решение уравнения теплопроводности и динамика открытия затвора. Уравнение теплопроводности решалось методом источников и стоков, который позволял учесть время нагрева электродов. Использовалась модель непрерывного источника, согласно которой с момента времени $t = 0$ в плоскости x' начинает выделяться количество теплоты, равное в единицу времени на единицу площади $\rho C \varphi(t)$. На основании этой модели температура в момент времени t представляется в следующем виде:

$$T(t) = \frac{1}{2\pi\kappa^{1/2}} \int_0^t \exp\left(-\frac{(z-z')^2}{4\kappa(t-t')}\right) \frac{\varphi(t') dt'}{(t-t')^{1/2}}, \quad (1)$$

$$\varphi(t') = \frac{I_0^2 R}{\rho C S} e^{-t'/\tau}, \quad (2)$$

где τ – длительность импульса тока (в расчетах предполагалось, что импульс тока формируется при разряде конденсатора), I_0 – сила тока в начальный момент разряда, R – общее сопротивление электрической схемы, ρ – плотность, C – теплопроводность, S – площадь ЖК-ячейки.

Зависимость величины оптической анизотропии от температуры $\Delta n(T)$ для кристалла МББА приведена в [4]. Соответственно коэффициент поглощения затвора γ уменьшается по мере роста температуры (с учетом фазового набега в слое ЖК [3]):

$$\gamma(T) = \sin^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \langle \Delta n(T) \rangle\right), \quad (3)$$

С учетом (3), коэффициент потерь k_n в резонаторе лазера изменяется следующим образом:

$$k_n = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{1-\gamma(I')} + k, \quad (4)$$

где L – длина резонатора, k – коэффициент пассивных потерь и потерь на излучение.

Расчеты показывают, что при оптимальном выборе параметров ячейки время открытия затвора лежит в диапазоне от 200 до 400 нс. Так, в случае поглощения кристаллом МБА количества теплоты 10^{-2} Дж при модуляции излучения Nd-лазера ($\lambda = 1,06$ мкм) время просветления ячейки при 100%-ной глубине модуляции оптического поглощения составляет 220 нс (рис. 2).

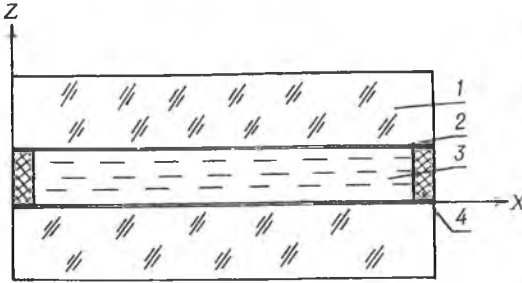


Рис.1. Схема ЖК-модулятора

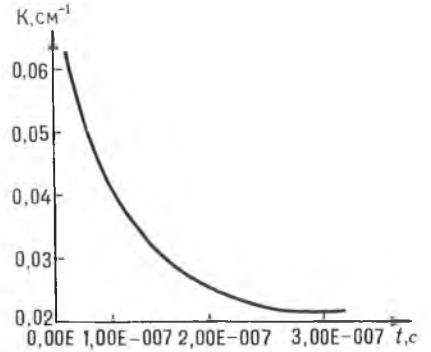


Рис.2. Зависимость коэффициента потерь от времени

Для моделирования процессов генерации Nd-лазера численными методами решалась система балансных уравнений [5], преобразованная с учетом того, что $\frac{1}{\tau_c} = \frac{c_0}{n} K_n$ и $V_\alpha B N_2 = \frac{c_0}{n} K_{yc}$, где τ_c – время жизни фотона, c_0 – скорость света, n – показатель преломления кристалла Nd:YAG, V_α – объем, занимаемый модой внутри активной среды, B – скорость вынужденного излучения, N_2 – населенность верхнего лазерного уровня. Система уравнений описывала генерацию одномодового одночастотного лазера, причем учитывалось, что коэффициент потерь в резонаторе изменяется в соответствии с (4):

$$\begin{cases} \frac{\partial K_{yc}}{\partial t} = \Pi_H (K_{yc}^{max} - K_{yc}) - K_{yc} (Bq + \frac{1}{\tau}), \\ \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{c_0}{n} (K_{yc} - K_n) q, \end{cases} \quad (5)$$

где Π_H – скорость возбуждения, τ – время жизни метастабильного уровня, q – полное число фотонов в резонаторе.

Форма импульса накачки аппроксимировалась полиномом второй степени [6]:

$$\Pi_H = 2\Pi^{max} \left(\frac{2t}{\tau_H} \right) - \Pi^{max} \left(\frac{2t}{\tau_H} \right)^2, \quad (6)$$

где Π^{max} – максимальная скорость возбуждения, τ_H – длительность импульса накачки.

В результате расчетов были получены зависимости мощности генерации от времени для различных начальных условий. Исследовалось влияние на генерационные характеристики лазера следующих параметров: длительности импульса накачки, времени задержки включения затвора, скорости просветления затвора.

Моноимпульс максимальной мощности и минимальной длительности генерируется при условии резкого уменьшения уровня потерь в резонаторе в тот момент времени, когда коэффициент усиления имеет максимальное значение. Таким образом, на выходные характеристики излучения заметное влияние оказывает выбор времени задержки открытия затвора относительно момента начала импульса накачки. В результате расчетов было определено, что при использовании затвора, который просветляется за 220нс, импульсной лампы ИНП 3/25А (в импульсе излучается 6,5Дж), длительности импульса накачки 60мкс и времени задержки 58мкс, которое соответствует максимальному коэф-

коэффициенту усиления, генерируется моноимпульс длительностью 15нс и мощностью 13,5МВт (рис.3,а). Этот импульс принимается в качестве образца и все последующие импульсы, полученные при изменении какого-либо из начальных условий, сравниваются с данным. Незначительное уменьшение времени задержки приводит к уширению импульса и уменьшению его выходной мощности, поскольку в таком случае затвор открывается в момент, когда коэффициент усиления еще не достиг своего максимального значения. При значительном уменьшении времени задержки, например до 40мкс, возможна многоимпульсная генерация (рис.3,б). Каждый импульс формируется в тот момент времени, когда мгновенное значение коэффициента усиления равно мгновенному значению коэффициента потерь. Более медленное просветление жидкокристаллической ячейки (260нс) приводит к уширению импульса (17нс) и уменьшению его выходной мощности (12,5МВт). Причем если время открытия затвора превышает 400нс, то возможна генерация многократных импульсов. Увеличение длительности импульса накачки также приводит к уменьшению выходной мощности и уширению импульса, что связано с обеднением верхнего лазерного уровня из-за спонтанного излучения. Например, при импульсе накачки в 100 мкс, а это время сравнимо со временем жизни на метастабильном уровне, генерируется импульс длительностью 20нс и мощностью 10МВт. Использование менее мощной лампы накачки ИНП 3/100 (2,5Дж), как и следовало ожидать, приводит к генерации менее мощного (3,8МВт) и более широкого (30нс) импульса.

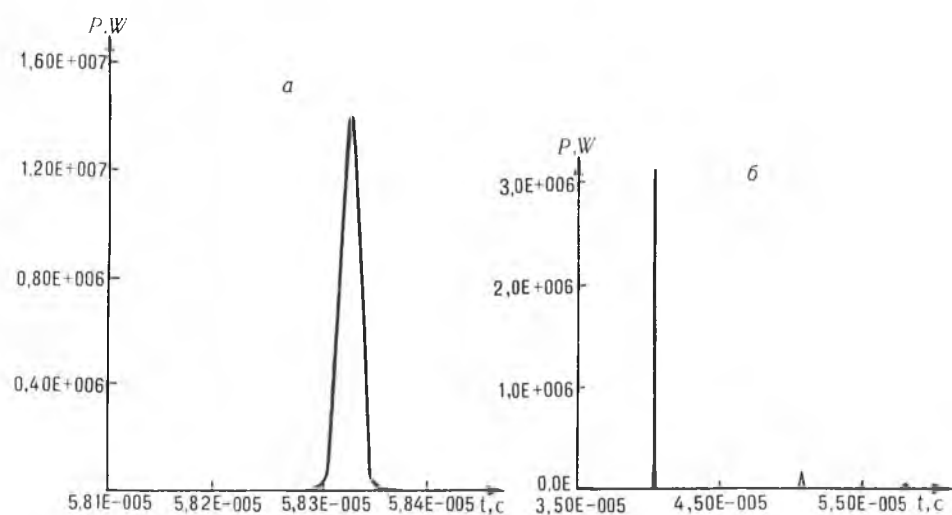


Рис.3. Зависимость выходной мощности от времени:
а) моноимпульс; б) многоимпульсная генерация.

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что термооптический затвор на жидком кристалле может успешно применяться для активной модуляции добротности импульсных твердотельных лазеров (типа лазера на неодиме). Он позволяет получать моноимпульсы длительностью не более 20нс и мощностью свыше 10МВт. Такие затворы во многих случаях могут конкурировать с электрооптическими, механическими, акустооптическими модуляторами излучения благодаря достаточной скорости включения (200–400нс), низкому управляющему напряжению (менее 1кВ), быстрому восстановлению первоначального состояния (частота повторения более 100Гц) при сравнительно невысокой стоимости.

1. Ермаков В. В., Сташкевич И. В. // Современные проблемы лазерной физики и спектроскопии: Тез. докл. Гродно, 1993. С.233.
2. Карней И. Б., Сташкевич И. В. // Тез. докл. межд. конференц. по лазерной физике и спектроскопии. Гродно, 1995. С.114.
3. Капустин А. П. Экспериментальные исследования жидкокристаллических материалов. М., 1978.
4. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М., 1978.
5. Звелто О. Принципы лазеров. М., 1990.
6. Импульсные источники света / Под ред И.С.Маршака. М., 1978.