

Миниатюрные диодно-накачиваемые лазеры на иттербий-эрбиевых стеклах с модуляцией добротности оптическими затворами на нарушенном полном внутреннем отражении

С.В.Гагарский, Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, А.А.Корчагин, В.В.Осико, К.В.Приходько, С.Е.Сверчков

Предложена оптическая схема, позволяющая получать при помощи затвора на нарушенном полном внутреннем отражении режим активной модуляции добротности в микролазерах на эрбиевом стекле с продольной накачкой. При непрерывной накачке мощностью 320 мВт получена пиковая мощность гигантских импульсов 500–600 Вт с частотой следования 1 кГц и длительностью 10–12 нс. На лазере с поперечной импульсной накачкой линейкой лазерных диодов мощностью 100 Вт при помощи затвора на нарушенном полном внутреннем отражении получены импульсы с энергией до 7.5 мДж и длительностью 30 нс.

Ключевые слова: диодная накачка, миниатюрный лазер, модуляция добротности.

Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к лазерам на иттербий-эрбиевых стеклах с накачкой излучением диодных InGaAs-лазеров. Этот интерес объясняется широтой возможных применений таких лазеров для связи, локации и дальнометрии, а также безопасностью для зрения длины волны их излучения (1.54 мкм), компактностью и потенциальной (при массовом производстве) дешевизной.

Конструктивно описанные до сих пор лазеры с диодной накачкой на иттербий-эрбиевых стеклах можно довольно четко разделить на два типа: микролазеры с продольной непрерывной накачкой излучением одного (реже нескольких) лазерных диодов и лазеры с поперечной импульсной накачкой. Для преобладающего большинства применений лазеров обоих типов требуется модуляция добротности резонатора.

Характерное усиление в лазерах с импульсной поперечной диодной накачкой составляет десятки процентов на проход, а в лазерах с непрерывной продольной диодной накачкой – единицы процентов. Следует также отметить, что в эрбиевом стекле (как в трехуровневой активной среде) предельно достижимый коэффициент усиления определяется (в первом приближении) концентрацией активных частиц, не превышающей, как правило, $(1 - 1.5) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, вследствие малого усиления среды весьма существенной проблемой при создании лазеров на эрбиевом стекле является выбор модулятора добротности, обладающего достаточно малыми потерями.

В связи с этим до недавнего времени единственным способом модуляции добротности в продольно-накачи-

ваемых микролазерах было введение в резонатор механических устройств типа вращающихся дисков с прорезями или колеблющихся камертонов [1,2]. Однако получаемые таким образом гигантские импульсы имели большую длительность и сопровождались паразитными пиками. В последнее время появились сообщения о пассивной модуляции эрбиевых микролазеров при помощи полупроводниковых зеркал с насыщающимся поглощением [3], а также просветляющегося фильтра на основе кристалла $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$, легированного кобальтом [4].

В настоящей работе исследуется возможность активной модуляции добротности миниатюрных эрбиевых лазеров как с продольной, так и с поперечной диодной накачкой с помощью оптических затворов на нарушенном полном внутреннем отражении (НПВО). Преимущества НПВО-затворов для модуляции добротности лазеров с низким коэффициентом усиления известны. Это – низкие оптические потери (не более 1–2% на проход) и возможность модуляции излучения любой поляризации. Ограниченное быстродействие НПВО-затворов, как правило, несущественно в лазерах со слабым усилением и, следовательно, с большой длительностью формирования гигантского импульса.

1. Микролазеры с продольной диодной накачкой

Как отмечалось выше, достижимый в лазерах такого типа коэффициент усиления составляет единицы процентов. В связи с этим помещение НПВО-затвора в резонатор такого лазера обычным образом приведет к потерям, сравнимым с коэффициентом усиления активной среды или превышающим его, и сделает сколько-нибудь эффективную генерацию невозможной. Во избежание чрезмерных оптических потерь нами предлагается оптическая схема лазера, изображенная на рис. 1. Лазер содержит активный элемент (АЭ) 1 из иттербий-эрбиевого лазерного стекла, представляющий собой плоскопараллельную

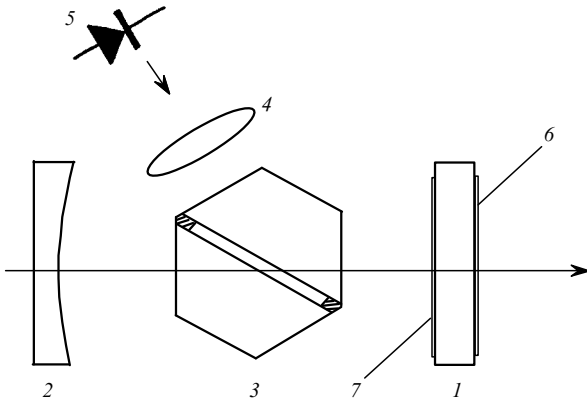


Рис. 1. Оптическая схема микролазеров с продольной диодной накачкой:

1 – АЭ; 2 – глухое сферическое зеркало; 3 – НПВО-затвор; 4 – фокусирующая система; 5 – полупроводниковый излучатель; 6 и 7 – выходное и промежуточное зеркала.

пластинку, на внешнюю (правую) поверхность которой нанесено дихроичное выходное зеркало 6, отражающее излучение накачки ($\lambda = 0.93 - 0.98$ мкм). На внутреннюю (левую) поверхность АЭ нанесено промежуточное дихроичное зеркало 7, пропускающее накачку и отражающее определенную часть генерируемого излучения. Зеркало 7 необходимо для снижения чувствительности лазера к оптическим потерям в модуляторе добротности, поскольку при его наличии лишь часть излучения лазера в процессе обхода резонатора проходит сквозь НПВО-затвор.

НПВО-затвор 3 представляет собой две жестко скрепленные призмы из плавленного кварца. Между призмами имеется зазор толщиной порядка 0.5 мкм, который может быть быстро (за сотни наносекунд) «схлопнут» при помощи пьезоэлементов, укрепленных на призмах. Две грани затвора, находящиеся в резонаторе лазера, просветлены на $\lambda = 1.54$ мкм. Желательно также наличие просветляющего покрытия на длине волны накачки на грани, обращенной к лазерному диоду.

Следует отметить, что в предлагаемой схеме оптический НПВО-затвор выполняет две функции: модулирует добротность резонатора и осуществляет пространственно-временное разделение пучков излучения накачки и генерации. Как видно из рис. 1, излучение накачки диодного лазера 5 проходит через фокусирующую систему 4, отражается от рабочей поверхности НПВО-затвора (в закрытом состоянии) и попадает на АЭ. Накачка, таким образом, может осуществляться непрерывно, за исключением коротких (единицы микросекунд) промежутков времени, когда затвор открыт. В это время излучение накачки свободно проходит сквозь затвор, а в резонаторе лазера формируются гигантские импульсы за счет энергии, ранее запасенной в активной среде. Кратковременность открытого состояния затвора по сравнению с временем жизни верхнего лазерного уровня эрбия (~ 7 мс) делает указанные потери излучения накачки совершенно несущественными.

Нанесенное на АЭ промежуточное зеркало 7 и глухое зеркало 2 образуют интерферометр Фабри – Перо. Внутренние потери этого интерферометра определяются, в основном, характеристиками НПВО-затвора в открытом состоянии. Можно показать, что максимальный коэффициент отражения такого интерферометра выражается формулой

$$R_{\max} = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2}}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2}},$$

где R_1 – коэффициент отражения промежуточного зеркала на длине волны генерации; R_2 – эквивалентный (с учетом потерь излучения при двойном проходе через затвор) коэффициент отражения глухого зеркала. Из формулы следует, что комбинация двух зеркал даже при наличии потерь, вносимых затвором, позволяет достигать коэффициентов отражения, превышающих 99%. Следует отметить, что изготовление обычных диэлектрических зеркал с коэффициентами отражения порядка 99.7% и выше для $\lambda = 1.54$ мкм, обладающих при этом достаточной лучевой стойкостью, встречает большие технологические трудности. Отсутствие необходимости в таких зеркалах является важным достоинством описываемой схемы.

Для генерационных экспериментов нами было использовано силикоборфосфатное лазерное стекло с концентрацией ионов $[Yb^{3+}] = 4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и $[Er^{3+}] = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [5]. Толщина АЭ составляла 0.8 мм. Накачка осуществлялась одним диодным InGaAs-лазером, излучающим на длине волны 0.93 мкм, которой соответствует коэффициент поглощения в лазерном стекле около 10 см^{-1} . Мощность падающего на АЭ излучения накачки составляла 320 мВт, поперечные размеры накачиваемой области равнялись $\sim 150 \times 150$ мкм. Конфигурация резонатора была близка к полуконфокальной (вогнутые зеркала имели радиусы кривизны 5 см и коэффициенты отражения около 99.5%). Остальные параметры двух микролазеров, собранных по схеме рис. 1, приведены в таблице.

В эксперименте с первым микролазером, суммарный коэффициент пропускания зеркал на АЭ которого был меньше достижимого в нем усиления, наряду с гигантскими импульсами наблюдалась свободная генерация, происходившая в промежутки времени между моментами срабатывания затвора. Наличие свободной генерации, т.е. затравочного излучения в резонаторе лазера, приводит к резкому уменьшению длительности формирования гигантских импульсов, которая становится меньше времени переключения затвора из закрытого в полностью открытое состояние (в данном случае – около 0.5 мкс). Поскольку гигантские импульсы формируются до полного открывания затвора, генерация представляет собой несколько (4–5) импульсов относительно большой длительности (30–40 нс).

Неполная прозрачность затвора во время генерации этих импульсов приводит к дополнительным потерям энергии за счет отражения от его рабочей поверхности. В нашем эксперименте излучение с энергией, равной 30%

Параметры микролазеров с продольной накачкой.

Микролазер	λ (мкм)	T_6 (%)	T_7 (%)	Δt (мс)	P_m (мВт)	Характер излучения
1	1.54	1.8	4.5	1	6	Серия из 4–5 импульсов общей длительностью ~ 1 мкс, $\tau = 20-40$ нс
	0.93	5	95			
2	1.54	2.5	8	7	0.8	Одиночные импульсы, $\tau = 10-12$ нс
	0.93	6	97			

Примечание. Здесь T_6 и T_7 – пропускания выходного зеркала 6 и промежуточного зеркала 7 (см. рис. 1); Δt , P_m и τ – интервал между импульсами, средняя мощность генерации в режиме гигантских импульсов и их длительность.

энергии, излучаемой через выходное зеркало, отражалось в сторону, противоположную диодному лазеру, и равной 19% – в сторону диодного лазера.

В эксперименте со вторым микролазером, суммарное пропускание зеркал на АЭ которого превышало коэффициент усиления в нем, свободная генерация возникнуть не могла, и при модуляции добротности формировались одиночные гигантские импульсы длительностью 10–12 нс с пиковой мощностью 500–600 Вт. Во время генерации таких импульсов НПВО-затвор практически находился в полностью открытом состоянии: от его рабочей поверхности отражалось излучение, энергия которого не превышала 1% энергии, излучаемой через выходное зеркало лазера. Таким образом, для формирования коротких мощных гигантских импульсов коэффициент отражения промежуточного зеркала следует выбирать таким, чтобы возникновение свободной генерации на нанесенных на АЭ зеркалах было невозможно.

2. Лазер с поперечной импульсной накачкой линейкой диодных лазеров

Как отмечалось выше, достижимые коэффициенты усиления в лазерах с импульсной поперечной диодной накачкой могут составлять десятки процентов, поэтому для модуляции добротности нет необходимости в построении схем, аналогичных изображенной на рис.1. Однако выходные характеристики таких лазеров сильно зависят от потерь, вносимых модуляторами добротности того или иного типа. Как показали сравнительные испытания НПВО-затвора и электрооптического затвора на основе кристалла ВВО, первый значительно более эффективен для лазеров на эрбиевом стекле с импульсной поперечной диодной накачкой [6].

Источником накачки служила линейка диодных лазеров на InGaAs длиной 1 см. Максимальная выходная мощность составляла 100 Вт (при токе 120 А), длительность импульса накачки была равна 4.8 мс. АЭ, представлявший собой полированный цилиндр $\varnothing 2 \times 10$ мм с просветленными плоскопараллельными торцами из силикоборфосфатного стекла с концентрацией активаторов $[Yb] = 4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, $[Er] = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, располагался вблизи диодной линейки параллельно ей (на расстоянии около 100 мкм). Часть цилиндрической поверхности АЭ, непосредственно не освещенная диодами, была обернута серебряной фольгой, обеспечивавшей отражение прошедшего сквозь АЭ излучения накачки обратно в лазерный элемент. Мер для принудительного охлаждения АЭ не принималось. Плоскопараллельный резонатор лазера имел длину 5 см, коэффициент отражения выходного зеркала в режиме свободной генерации (без НПВО-затвора в резонаторе) составлял 91.2%, в режиме модуляции добротности – 87.5%.

На рис.2 представлены выходные характеристики лазера при частоте следования импульсов 1.3 Гц. При максимальной энергии накачки выходная энергия в режиме

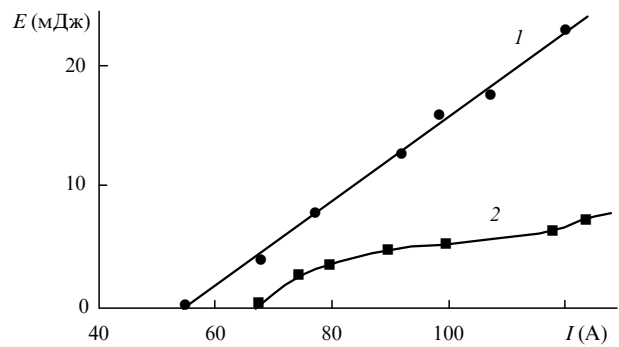


Рис.2. Зависимости выходной энергии лазера с поперечной накачкой от тока через линейку диодов при свободной генерации (1) и в режиме модуляции добротности (2).

свободной генерации достигала 23 мДж, а в режиме модуляции добротности – 7.5 мДж при длительности импульсов по полувысоте 30 нс. В режиме модуляции добротности структура излучения при выходной энергии 4 мДж и менее соответствовала ТЕМ₀₀-моду. Перегиб на экспериментальной кривой при выходной энергии около 5 мДж объясняется появлением в выходном излучении мод высшего порядка. Полученные выходные характеристики вплотную приближаются к требованиям, предъявляемым к лазерам для портативных дальномеров с радиусом действия 10–15 км.

Работа частично поддерживалась РФФИ (грант № 99-02-17632).

1. Tanguy E., Pocholle J.P., Feugnet G., Larat C., Schwarz M., Brun A., Georges P. *Mechanically Q-switched codoped Er-Yb glass laser under Ti:sapphire and laser diode pumping*. <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/recherche/perso/tanguy/articles/EI1.html>.
2. Tanguy E., Formont S., Pocholle J.P. *Compact eye-safe rangefinder*. <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/recherche/perso/tanguy/articles/ODIMAP97.html>.
3. Fluck R., Keller U., Gini E., Melchior H. In: *Optical Society of America Trends in Optics and Photonics Series* (Washington, 1998, v.19, pp.146–148).
4. Thony P., Ferrand B., Molva E. In: *Optical Society of America Trends in Optics and Photonics Series* (Washington, 1998, v.19, pp.150–154).
5. Denker B., Kertesz I., Konjaev V., Nikolskii M., Osiko V., Sverchkov S. In: *Optical Society of America Trends in Optics and Photonics Series* (Washington, 1997, v.10, pp.473–475).
6. Wu R., Myers J.D., Hamlin S.J. In: *Optical Society of America Trends in Optics and Photonics Series* (Washington, 1997, v.10, pp.159–161).

SV.Gagarskii, B.I.Galagan, B.I.Denker, A.A.Korchagin, V.V.Osiko, K.V.Prikhod'ko, S.E.Sverchkov. Diode-pumped ytterbium-erbium glass microlasers with optical Q-switching based on frustrated total internal reflection.

An optical system is proposed in which a switch based on frustrated total internal reflection (FTIR) is used to vary actively the Q factor of longitudinally pumped erbium glass microlasers. Continuous pumping (with a power of 320 mW) generated giant pulses, of 500–600 W peak power and of 10–12 ns duration, at a repetition rate of 1 kHz. An FTIR switch in a laser transversely pulse-pumped by a linear laser-diode array delivering 100 W produced pulses of up to 7.5 mJ energy and of 30 ns duration.