

# Гольмиевый лазер с акустооптическим фильтром на парателлурите

А.В.Мухин, С.Д.Великанов, В.Д.Глуходедов, Н.Г.Захаров, Ю.Н.Фролов

*Представлены результаты экспериментальных исследований твердотельного гольмиевого лазера (Ho:YAG) с внутрирезонаторным акустооптическим фильтром на парателлурите. Экспериментально определена мощность генерации лазера в непрерывном и импульсно-периодическом режимах. Показано, что применение акустооптического фильтра в резонаторе Ho:YAG-лазера позволяет решить несколько таких важных задач, как получение импульсно-периодического режима генерации, перестройка длины волны, а также получение линейно-поляризованного излучения.*

**Ключевые слова:** гольмиевый лазер, акустооптический фильтр, центральная частота, мощность управляющего сигнала.

## 1. Введение

Твердотельный гольмиевый лазер (Ho:YAG) представляет большой интерес для различных научных, промышленных, медицинских и технологических применений [1]. Это объясняется тем, что спектр излучения таких лазеров попадает в одно из окон прозрачности атмосферы и находится в безопасном для глаз диапазоне длин волн [2]. Гольмиевый лазер может использоваться для решения целого ряда прикладных задач, включая накачку параметрических генераторов света (ПГС) на кристалле  $ZnGeP_2$  [3] – эффективных источников излучения ближнего и среднего ИК диапазонов.

Для получения максимальной эффективности преобразования в ПГС гольмиевый лазер должен удовлетворять нескольким требованиям. К их числу относятся стабильность амплитуды лазерных импульсов и линейная поляризация излучения. В работе [4] показано, что для получения генерации Ho:YAG-лазера на одной длине волны требуется внутрирезонаторная спектральная селекция. В отсутствие селектирующих элементов генерация может реализовываться на двух конкурирующих длинах волн, что приводит к существенной нестабильности амплитуды выходных импульсов излучения. В качестве спектрального селектора чаще всего применяется эталон Фабри–Перо, представляющий собой кварцевую пластинку толщиной 100 мкм [1].

В большинстве практических схем гольмиевого лазера импульсно-периодический режим реализуется с помощью акустооптического модулятора на кристаллическом кварце [2, 4]. К недостаткам данного устройства следует отнести низкую эффективность модуляции (~50%)

при относительно высокой мощности управляющего высокочастотного сигнала. В некоторых случаях используют электрооптические модуляторы, работающие при управляющих напряжениях порядка киловольт [5].

Для получения линейно поляризованного излучения гольмиевого лазера чаще всего используют дихроичное зеркало с оптическим покрытием, которое вносит дискриминацию для излучения с нерабочей поляризацией (для получения излучения с поляризацией, близкой к линейной, дискриминация должна быть не менее 50%). При этом изготовление такого зеркала представляет собой определенные технологические трудности.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований гольмиевого лазера с внутрирезонаторным акустооптическим фильтром (АОФ) на парателлурите, предназначенным для получения импульсно-периодического режима генерации. На основе проведенного обзора литературы можно сделать вывод, что в данной работе впервые сообщается об использовании АОФ на парателлурите для модуляции добротности, а также спектральной и поляризационной селекции излучения гольмиевого лазера. Вместе с тем известно, что метод управления спектральными и поляризационными характеристиками излучения с помощью АОФ давно и успешно применяется в различных типах лазеров [6–8]. Использование АОФ на парателлурите позволяет получить стабильное по амплитуде линейно поляризованное излучение гольмиевого лазера на одной длине волны без применения дополнительных внутрирезонаторных элементов.

## 2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Продольная накачка кристалла Ho:YAG осуществлялась излучением непрерывного тулиевого лазера с длиной волны 1.908 мкм. Пучок накачки дважды проходил через активный элемент длиной 30 мм с концентрацией легированных ионов  $Ho^{3+}$  1 ат.% и практически полностью поглощался в нем. Резонатор гольмиевого лазера формировался тремя зеркалами: плоским глухим зеркалом З1 с высоким коэффициентом отражения на длинах

А.В.Мухин, С.Д.Великанов, В.Д.Глуходедов, Н.Г.Захаров, Ю.Н.Фролов. Институт лазерно-физических исследований ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: myhin-aleksei@yandex.ru

Поступила в редакцию 26 февраля 2016 г., после доработки – 29 июня 2016 г.

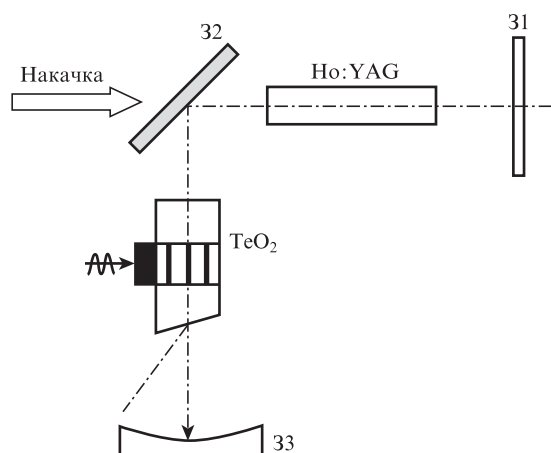


Рис.1. Схема установки.

волн от 1.9 до 2.1 мкм, дихроичным зеркалом 32 с высоким отражением на длинах волн генерации (около 99%) и высоким пропусканием на длине волны накачки (около 92%), выходным сферическим зеркалом 33 с коэффициентом отражения около 60% на длине волны генерации и радиусом кривизны 200 мм. Физическая длина резонатора равнялась 100 мм. Согласно проведенным расчетам диаметр основной моды в кристалле с учетом наводимой тепловой линзы составлял  $\sim 0.55$  мм. Диаметр пучка на выходе резонатора был равен 0.8 мм. Пучок накачки фокусировался в пятно диаметром 0.6 мм (все диаметры приведены по уровню энергии  $e^{-2}$ ).

В выходное плечо резонатора между дихроичным (32) и выходным (33) зеркалами помещался АОФ. Кристалл парателлурита имел длину 28 мм. Размер пьезопреобразователя был равен  $17 \times 1.8$  мм. Оптическая ось АОФ составляла угол  $\sim 14^\circ$  с фронтом акустической волны [9]. Угол падения лазерного излучения на фронт акустической волны равнялся  $\sim 20^\circ$ . Рабочие грани кристалла были просветлены в области длин волн  $\lambda = 2$  мкм. Выходная грань кристалла была скошена под небольшим углом. Вследствие этого угол между дифрагированным и прошедшим лазерными пучками на выходе кристалла составлял  $\sim 7^\circ$ . Оптическая ось резонатора была «замкнута» на дифрагированный пучок, и генерация возникала только при «открытом» АОФ. Длина волны генерации определялась частотой управляющего сигнала, подаваемого на АОФ.

В первой серии экспериментов были определены значения параметров управляющего сигнала для длин волн генерации Ho:YAG-лазера. Для этого гольмиевый лазер с помощью эталона настраивался на необходимую длину волны. Во второй серии экспериментов АОФ помещался в резонатор для получения импульсно-периодического режима генерации и перестройки длины волны.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В табл.1 приведены экспериментальные значения частот управляющего сигнала, необходимые для получения генерации Ho:YAG-лазера на определенных длинах волн. Значения центральной частоты найдены аппроксимацией экспериментальных зависимостей. Измерения проводились при комнатной температуре. Необходимо отметить, что увеличение температуры кристалла на  $20^\circ\text{C}$  приводило к сдвигу частоты на 50 кГц.

Табл.1. Частоты управляющего сигнала для различных длин волн генерации Ho:YAG-лазера.

Длина волны (мкм)	Центральная частота (МГц)
2.091	49.40
2.097	49.28
2.123	48.66

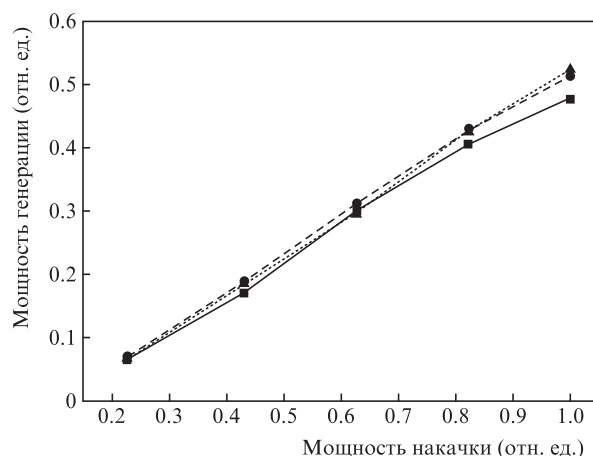
Для уменьшения случайной погрешности измерения эффективности АОФ проводились по двухканальной оптической схеме. Мощность управляющего сигнала не превышала 2 Вт. Максимальная эффективность АОФ, реализуемая в экспериментах, была равна 97%. Согласно экспериментальным данным акустическая полоса пропускания АОФ составила  $\sim 160$  кГц. Спектральная полоса пропускания АОФ на полувысоте равнялась  $\sim 7$  нм [10].

На рис.2 приведена зависимость мощности непрерывной генерации Ho:YAG-лазера от мощности накачки. Мощность генерации на длине волны  $\lambda = 2.091$  мкм оказалась несколько меньше, чем на  $\lambda = 2.097$  и 2.123 мкм. Максимальная плотность мощности на выходе лазера на этих длинах волн оказалась практически одинаковой и составила  $2.6 \text{ кВт/см}^2$ , а соответствующая эффективность преобразования была равна 52%. Дифференциальная эффективность преобразования превышала 60%. Исследования степени поляризации показали, что выходное излучение Ho:YAG-лазера было полностью линейно поляризованным в вертикальной плоскости. Это объясняется тем, что дифрагированный пучок на выходе АОФ также был поляризован в вертикальной плоскости.

Исследования спектра генерации показали, что генерация реализовывалась на одной длине волны, зависящей от частоты управляющего сигнала, подаваемого на АОФ. При изменении частоты управляющего сигнала в соответствии с табл.1 была получена перестройка длины волны генерации. При этом следует отметить, что без АОФ генерация случайным образом реализовывалась на двух длинах волн: 2.091 и 2.097 мкм.

На рис.3 представлена зависимость средней мощности импульсно-периодической генерации Ho:YAG-лазера от мощности накачки. Частота следования импульсов составляла 10 кГц и была выбрана, исходя из соображений о лучевой прочности покрытий зеркал резонатора.

Регистрация средней мощности и энергии показала, что все выходное излучение генерировалось в виде корот-

Рис.2. Зависимости мощности генерации Ho:YAG-лазера в непрерывном режиме от мощности накачки для длин волн  $\lambda = 2.091$  (■), 2.097 (●) и 2.123 мкм (▲).

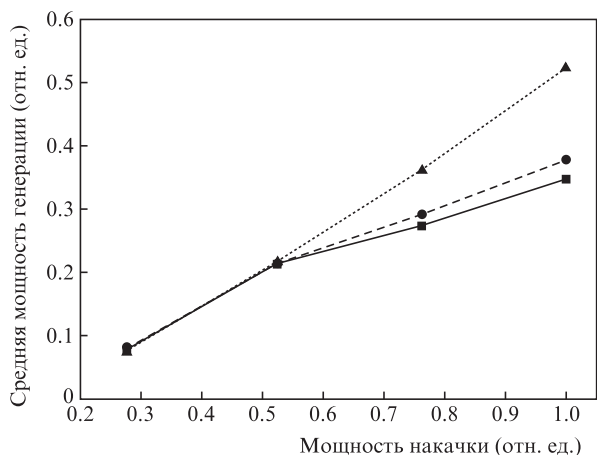


Рис.3. Зависимости средней мощности генерации Ho:YAG-лазера в импульсно-периодическом режиме от мощности накачки для  $\lambda = 2.091$  (■), 2.097 (●) и 2.123 мкм (▲).

ких лазерных импульсов длительностью около 35 нс с частотой следования 10 кГц.

Максимальная плотность мощности генерации на выходе резонатора в импульсно-периодическом режиме наблюдалась на длине волны 2.123 мкм и составляла 2.6 кВт/см<sup>2</sup>. Эффективность преобразования на этой длине волны в импульсно-периодическом режиме была такой же, как и в непрерывном режиме. Дальнейший рост мощности генерации увеличивал вероятность возникновения пробоя покрытий зеркал. Реализованная максимальная плотность энергии в импульсе на выходе резонатора была равна 0.26 Дж/см<sup>2</sup>. При работе Ho:YAG-лазера на длинах волн  $\lambda = 2.097$  и 2.091 мкм наблюдалось заметное снижение эффективности преобразования, связанное с недостаточным быстродействием АОФ. Дело в том, что эффективное сечение усиления на  $\lambda = 2.091$  и 2.097 мкм практически вдвое превышает аналогичную величину на  $\lambda = 2.123$  мкм. Это приводит к тому, что развитие импульсов генерации на  $\lambda = 2.091$  и 2.097 мкм происходит быстрее, чем на  $\lambda = 2.123$  мкм, и при определенном значении мощности накачки время развития начинает превышать быстродействие АОФ, что вызывает уменьшение эффективности преобразования (рис.3). Быстродействие АОФ можно оценить как отношение диаметра лазерного пучка к скорости распространения акустической волны. Следует отметить, что определяющим параметром быстродействия АОФ является скорость распространения акустической волны, которая в данном случае была равна  $\sim 800$  м/с. При характерном размере диаметра пучка 0.55 мм быстродействие АОФ составит  $\sim 0.7$  мкс.

На рис.4 показана осциллограмма импульсов генерации при фиксированном значении плотности мощности накачки. Отсчет времени начинался относительно запускающего импульса, подаваемого на АОФ. Эта зависимость позволяет оценить интервалы времени, пропорциональные скорости развития лазерных импульсов.

Эксперименты показали также, что импульсно-периодическое излучение на выходе лазера имело максималь-

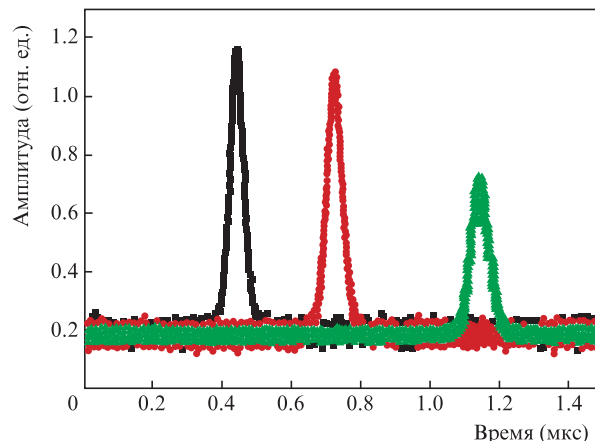


Рис.4. Осциллограммы импульсов генерации на  $\lambda = 2.091$  (■), 2.097 (●) и 2.123 мкм (▲).

ный контраст. Это достигалось благодаря пространственному разделению пучков в АОФ.

#### 4. Заключение

Представлены результаты экспериментальных исследований твердотельного гольмиевого лазера с внутррезонаторным АОФ на парателлурите. Наиболее эффективная генерация реализовывалась на длине волны 2.123 мкм. Максимальная полученная плотность мощности генерации на выходе из резонатора составляла 2.6 кВт/см<sup>2</sup>, а максимальная плотность энергии импульса – 0.26 Дж/см<sup>2</sup>.

Проведенные эксперименты показали, что использование АОФ на парателлурите в резонаторе Ho:YAG-лазера позволяет решить наиболее важные задачи, связанные с его применением в системах накачки ПГС на кристалле ZnGeP<sub>2</sub>. Необходимо отметить, что в настоящей работе впервые сообщается об использовании АОФ на парателлурите для модуляции добротности и спектральной, а также поляризационной селекции излучения гольмиевого лазера. Применение АОФ позволяет получить стабильное по амплитуде линейно поляризованное лазерное излучение на одной длине волны без использования дополнительных внутррезонаторных элементов.

1. Walsh V.M. *Laser Phys.*, **19** (4), 855 (2009).
2. Грачев С.В. *Ho:YAG-лазер в медицине* (М.: Триада-Х, 2003).
3. Budni P.A., Pomeranz L.A., Lemons M.L., Miller C.A., Mosto J.R., Chicklis E.P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **17**, 723 (2000).
4. Lippert E., Nicolas S., Arisholm G., Stenersen K., Rustad G. *Appl. Opt.*, **45**, 3849 (2005).
5. Hemming A., Richards J., Bennetts S. *Opt. Commun.*, **283**, 4041 (2010).
6. Стельмах М.Ф., Дмитриев В.Г., Михайлов Л.К. и др. *ЖПЭС*, **40** (2), 181 (1984).
7. Мазур М.М., Махмудов Х.М., Пустовойт В.И. *Квантовая электроника*, **15** (4), 711 (1988).
8. Бабурин Н.В., Галаган Б.И., Данилейко Ю.К. и др. *Квантовая электроника*, **31** (4), 303 (2001).
9. Chang I.C. *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 370 (1974).
10. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применения* (М.: Радио и связь, 1978).