

06.2;07

Лазер на кристалле $Tm^{3+} : YLiF_4$ с резонансным отражателем

© А.А. Андронов, О.Н. Еремейкин, А.П. Савикин,
В.В. Шарков, А.Г. Яковлева

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: savikin@rf.unn.ru

Поступило в Редакцию 9 ноября 2009 г.

Рассмотрена возможность использования резонансных отражателей на основе кремния в качестве зеркал резонаторов в лазерах среднего ИК-диапазона. Получена и исследована генерация в схеме $Tm:YLF$ лазера с зеркалом резонатора на отражателе из кремниевых пластин. Проведено сравнение параметров генерации в схемах резонаторов с кремниевым отражателем и на диэлектрических зеркалах.

Одними из проблемных оптических элементов когерентных источников излучения среднего ИК-диапазона спектра ($2-5\mu m$) — оптических квантовых генераторов (ОКГ) и параметрических генераторов света — являются зеркала резонатора. Многослойные диэлектрические покрытия зеркал, необходимые для получения больших величин коэффициентов отражения, обладают невысокой лучевой прочностью, так как содержат большее количество дефектов по сравнению с объемными оптическими материалами, поглощающих лазерное излучение. С увеличением числа слоев порог разрушения снижается. Кроме того, необходимо учитывать технологическую сложность изготовления диэлектрических зеркал данного спектрального диапазона.

Решение указанной проблемы может быть осуществлено заменой аморфных сред кристаллическими материалами с большим показателем преломления, например кремнием, практически прозрачным в диапазоне длин волн от 1.5 и до $7\mu m$ с показателем преломления $n \sim 3.45$. Использование подобных материалов должно обеспечить более высокую стойкость зеркал к лазерному излучению.

В настоящей работе проводились исследования возможности использования резонансного отражателя, образованного парой пластин из кристаллического кремния, разделенных воздушным промежутком, в

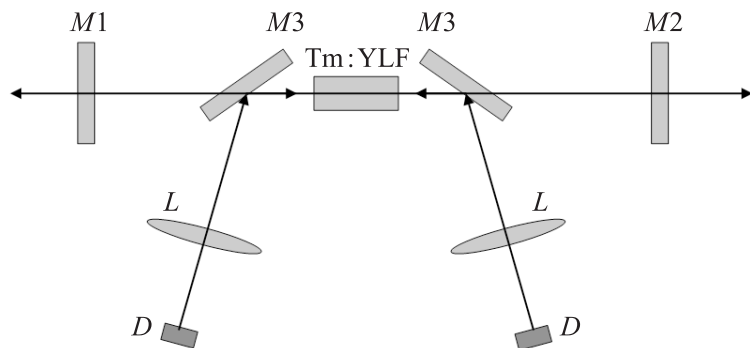


Рис. 1. Схема лазера на кристалле $Tm:YLF$ с продольной диодной накачкой.

качестве зеркал резонатора ОКГ на кристалле $Tm^{3+}:YLiF_4$ ($Tm:YLF$), генерирующего на длине волны $\lambda = 1.908 \mu m$.

Изначально резонатор исследуемого $Tm:YLF$ лазера был образован диэлектрическими зеркалами: выходным сферическим зеркалом $M1$ и плоским глухим зеркалом $M2$. В ходе эксперимента зеркало $M2$ заменялось на резонансный отражатель из кремниевых пластин (рис. 1). Для обеспечения устойчивости резонатора (длина 100 mm), а также согласования размеров пучка накачки и возбуждаемой моды, использовалось сферическое зеркало $M1$ с радиусом кривизны 200 mm, имеющее на длине волны генерации 1908 nm коэффициент пропускания $T \sim 11\%$.

Продольная накачка кристалла $Tm:YLF$ осуществлялась диодными линейками D с волоконным выводом (производство Coherent, диаметр волокна $800 \mu m$) (рис. 1). Для ввода излучения накачки использовались дихроичные зеркала $M3$, расположенные внутри резонатора под углом Брюстера, которые обладали высоким коэффициентом отражения на длине волны накачки 793 nm ($R \sim 99\%$). Системы линз L обеспечивали перенос изображения излучения накачки в соотношении 1:1 с торца волокна в кристалл $Tm:YLF$ (содержание ионов $Tm^{3+} \sim 2.5 \text{ wt.}\%$, длина 18 mm, диаметр 3 mm). Для достижения генерации на длине волны 1908 nm (σ -поляризация) оптическая ось кристалла $Tm:YLF$ была сориентирована перпендикулярно плоскости схемы лазера (рис. 1).

Для исследования спектра генерации использовался спектрограф МДР-41, спектральное разрешение которого в диапазоне $1.9\text{--}2\ \mu\text{m}$ составляло $0.1\ \text{nm}$. Дистанционное управление двигателем спектрографа, сбор и обработка данных обеспечивались компьютерной системой на базе многофункциональной платы NI PCI-6251; программа управления, обработки и графического отображения данных написана в среде программирования LabVIEW. Для регистрации излучения на выходной щели спектрографа помещался фоторезистор PbS (модель ФСА-Г1), имеющий в диапазоне $1.9\text{--}2\ \mu\text{m}$ максимальную чувствительность.

Резонансные отражатели (РО) чаще всего изготавливают в виде двух пластин равной толщины l без покрытия из материала с показателем преломления n , разделенных воздушным промежутком [1]. Применение резонансных отражателей с большим числом N пластин, как правило, не целесообразно [2]. Спектральный интервал между главными максимумами отражения РО $\Delta\nu_{\text{max}} = (2nl)^{-1}$ определяется минимальным промежутком nl .

Максимальный коэффициент отражения R_{max} РО определяется выражением [3]:

$$R_{\text{max}} = \left[\frac{1 - (1/n)^{2N}}{1 + (1/n)^{2N}} \right]^2. \quad (1)$$

Для получения расчетного значения коэффициента отражения РО необходимо, чтобы толщины пластин отличались на величину не более $\lambda/8$, когда достигается совпадение резонансов парциальных резонаторов. Если пластины отличаются по толщине l более $\lambda/4$, то коэффициент отражения такой системы (называемой стопой) равен сумме френелевских коэффициентов отражения всех поверхностей.

Резонансный отражатель был образован двумя пластинками из слабо легированного кремния толщиной $440\ \mu\text{m}$, закрепленными в оправе вплотную друг к другу. Согласно спектру пропускания РО, полученного на Фурье-спектрометре Инфралюм-801, наибольшее расстояние между максимумами отражения (минимумами пропускания) составляло $\Delta\lambda \approx 400\ \text{nm}$. Это соответствует величине воздушного зазора порядка $5\ \mu\text{m}$. Мелкомасштабная структура спектра пропускания с периодом $\Delta\lambda \approx 1.2\ \text{nm}$ соответствует области свободной дисперсии интерферометра Фабри–Перо, образованному одной кремниевой пластинкой.

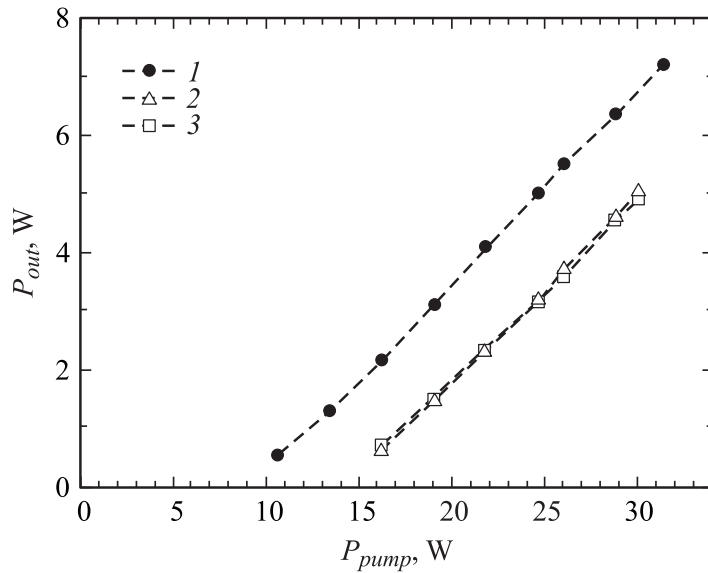


Рис. 2. Зависимость мощности P_{out} генерации Tm:YLF лазера от мощности накачки P_{pump} при различных зеркалах M2: 1 и 2 — диэлектрические с коэффициентом отражения 100 и 72% соответственно, 3 — резонансный отражатель на кремниевых пластинах.

Измеренный коэффициент пропускания РО на длине волны генерации Tm:YLF лазера 1908 nm имел величину $T \approx 23\%$. Коэффициент поглощения кремния на длине волны $1.9 \mu m$ пренебрежимо мал [4], поэтому измеренная величина пропускания определяется только отражением на поверхностях кремниевых пластин ($R \approx 77\%$). Максимальный коэффициент отражения кремниевых пластин ($n \approx 3.45$), согласно выражению (1), имеет величину $R_{max} \approx 98\%$, а сумма френелевских отражений на четырех поверхностях $R \approx 76\%$. Это означает, что данный РО представляет собой стопу, что не позволило использовать его в качестве глухого зеркала резонатора в нашем эксперименте.

В схеме резонатора с диэлектрическим глухим зеркалом M2 получена генерация с дифференциальным КПД $\sim 32\%$ и параметром качества пучка $M^2 \leq 2.5$ (рис. 2). Степень эллиптичности поляризации

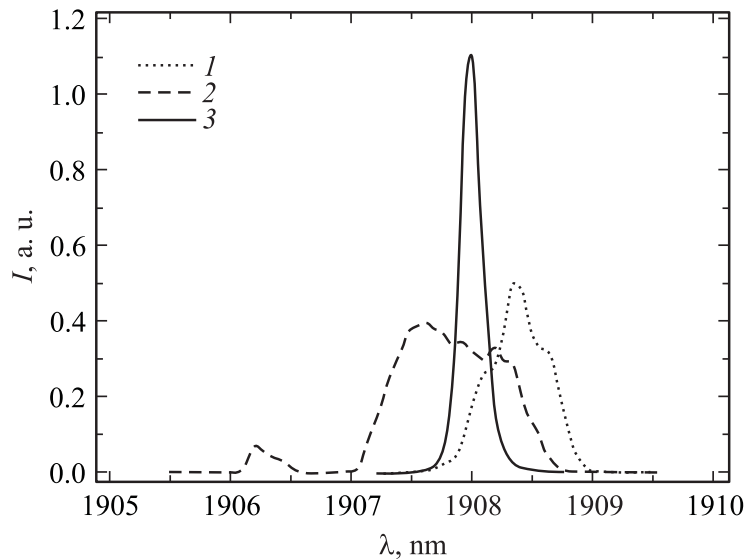


Рис. 3. Спектр генерации Tm:YLF лазера при различных зеркалах $M2$ (мощность генерации $P_{out} = 5$ W): 1 и 2 — диэлектрические с коэффициентом отражения 100 и 72% соответственно, 3 — резонансный отражатель на кремниевых пластинах.

излучения (не менее 1:200) определялась поляризующими свойствами дихроичных зеркал $M3$ и анизотропией кристалла Tm:YLF. Форма и положение спектра генерации зависела от мощности накачки. Вблизи порога спектр генерации был локализован в области 1908.5 nm по мере увеличения мощности накачки наблюдалось расширение и смещение центра линии генерации. В зависимости от температуры кристалла, интенсивности накачки и параметров резонатора реализовывалась генерация в диапазоне 1907–1912 nm с изменением ширины линии генерации от 0.5 nm вблизи порога до нескольких нанометров при двукратном превышении порога (рис. 3).

Для корректного сравнения диэлектрического зеркала и отражателя из кристаллического кремния зеркало $M2$ было заменено на диэлектрическое с $R \approx 72\%$. Наблюдались увеличение порога генерации и уменьшение суммарной мощности двусторонней генерации (рис. 2). Со-

отношения мощностей излучения генерации, вышедшего через зеркала $M1$ и $M2$, было близко к соотношению коэффициентов пропускания зеркал. Форма и положение спектра генерации, как и в случае схемы с одним выводом излучения, изменялись в зависимости от мощности накачки (рис. 3).

В схеме резонатора с резонансным отражателем в качестве плоского зеркала $M2$ была достигнута генерация с характеристиками, близкими по значению схеме с диэлектрическим зеркалом с $R \approx 72\%$ (рис. 2). Близкие значения выходных мощностей (зависимости 2, 3 на рис. 2) свидетельствуют о том, что возможное двухфотонное поглощение в кремниевых пластинах незначительно, по крайней мере при величине плотности мощности излучения порядка $2 \cdot 10^3 \text{ W/cm}^2$.

Существенное отличие от схем с диэлектрическими зеркалами наблюдалось в спектральных характеристиках генерации. Ширина спектра генерации не превышала величины 0.25 nm . Как ширина линии генерации, так и положение максимума практически не изменялись при увеличении мощности накачки (максимальное наблюдаемое смещение спектра составляло не более 0.1 nm). Наблюдаемая стабильность спектра генерации может объясняться селективными свойствами кремниевой пластинки, работающей как интерферометр Фабри–Перо.

Таким образом, в работе исследованы параметры генерации лазера на кристалле $Tm:YLF$ с резонансным отражателем из кремниевых пластин. По сравнению с резонатором на широкополосных диэлектрических зеркалах достигнуто повышение спектральной яркости и стабильности спектра генерации. Продемонстрирована возможность эффективного использования оптической системы, образованной двумя пластинками из кристаллического кремния, в качестве зеркал резонатора оптического квантового генератора среднего ИК-диапазона. Использование слоев кремния толщиной $\lambda/4$ в сочетании с кристаллическими слоями из материалов с другим показателем преломления позволит создавать зеркала среднего ИК-диапазона с требуемым профилем коэффициента пропускания.

Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП „Развитие научного потенциала высшей школы“ (Проект № 2.1.1/3603), Ведущей научной школы НШ-2786.2008.2.

Список литературы

- [1] *Johnson M.M., La Grone A.H.* // Appl. Opt. 1973. V. 12. N 3. P. 510–518.
- [2] *Белостоцкий Б.Р., Любавский Ю.В., Овчинников В.М.* Основы лазерной техники. Твердотельные ОКГ / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1972. 408 с.
- [3] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики / Пер. с англ. М.: Наука, 1970. 856 с.
- [4] *Green M.A., Keevers M.J.* // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 1995. V. 3. N 3. P. 189–192.