

Исследование волноводного распространения усиленного спонтанного излучения в тонкостержневых активных элементах

Гребенюк Артём Андреевич

10 класс, МАОУ Лицей № 38 Нижнего Новгорода, Научное объединение «Школа юного исследователя» АНО ДО «Академ клуб», ИПФ РАН

Научный руководитель Н.А. Емельянов, лаборант-исследователь ФИЦ ИПФ РАН

В работе исследовано явление усиленного спонтанного излучения (УСИ) в активном элементе в виде тонкого конического стержня, созданном в Институте прикладной физики РАН. Показано, что влияние УСИ на коэффициент усиления по слабому сигналу в тонком коническом стержне так же значительно, как и в цилиндрическом. Подтверждена гипотеза о возможности компенсации влияния УСИ путём уменьшения разности показателей преломления кристалл – окружающая среда.

При увеличении средней мощности твердотельных лазерных систем часто приходится сталкиваться с проблемой тепловых эффектов. Для уменьшения их влияния применяются специальные геометрии активных элементов (АЭ), имеющие малый объем кристалла и большую площадь охлаждаемой поверхности. Одной из самых распространенных геометрий является тонкий стержень [1]. Диаметр таких АЭ, как правило, составляет 1 мм и менее, а длина – несколько сантиметров.

Помимо тепловых, также существуют и другие негативные эффекты, например, усиленное спонтанное излучение (УСИ). Оно возникает при распространении в активном элементе спонтанно излученных фотонов, что приводит к уменьшению инверсной населенности. В результате, это может существенным образом сказываться на коэффициенте усиления среды. Геометрия тонкого стержня обладает рядом особенностей, которые могут приводить к значительному увеличению влияния УСИ, по сравнению с обычными стержнями. Во-первых, это большая плотность мощности накачки в кристалле. Во-вторых, это отражение УСИ от боковой поверхности кристалла, приводящее к ее волноводному распространению в АЭ и еще большему усилению. Особенности влияния УСИ на коэффициент усиления сигнала в тонкостержневой геометрии активных элементов были впервые исследованы сотрудниками ИПФ РАН [2,3]. Подобные исследования не проводились ранее, поскольку сама геометрия активных элементов в виде тонких стержней является относительно новой. Учёными были проведены исследования в стержнях с круглым поперечным сечением постоянного диаметра, однако, существует другая перспективная геометрия в виде тонких конических стержней, в которых поведение УСИ еще не было изучено.

После анализа работы [2] была выдвинута гипотеза. Распределение УСИ будет заметно зависеть от поперечного сечения активного элемента и разностей показателей преломления кристалл - окружающая среда. Таким образом, исследуя различные граничные условия и конфигурации активных элементов, можно будет определить оптимальные условия для уменьшения эффекта УСИ.

Задачами, поставленными в данной работе, были: экспериментальное измерение коэффициентов усиления для тонкого конического стержня, с заданными параметрами, при различных граничных условиях, и сравнение полученных результатов с результатами экспериментов [2].

В данной работе исследовалось влияние УСИ на коэффициент усиления в активном элементе Yb:YAG в виде тонкого конического стержня, длиной 27 мм, диаметром 1 мм в большем основании и 0.5 мм в меньшем, легированием 1%. Измерения проводились при двух различных граничных условиях: кристалл – воздух, кристалл – этанол.

Чтобы сделать вывод о влиянии УСИ, измерялся коэффициент усиления лазерного сигнала в схеме однопроходного лазерного усилителя, представленной на рис. 1.

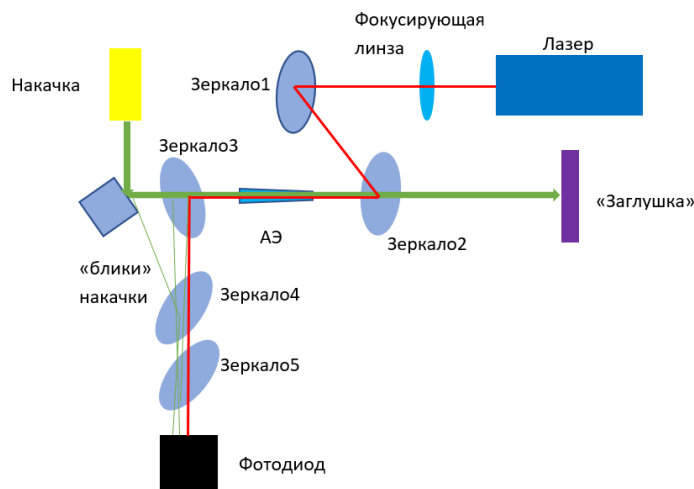


Рис. 1. Экспериментальная установка измерения коэффициента усиления по слабому сигналу

В качестве накачки использовался диодный лазер, длина волны которого 940нм, и мощностью до 101,8Вт. Для исключения влияния нагрева активного элемента на измеряемый коэффициент усиления, накачка работала в импульсном режиме, с длительностью импульсов 6нс и частотой следования 1Гц. В качестве источника усиливаемого сигнала использовался непрерывный диодный лазер, с длиной волны 1030нм, мощностью 10 мВт. Пучки лазера и накачки распространялись в АЭ соосно, благодаря использованию двух дихроичных зеркал (Зеркало2 и Зеркало3), пропускающих излучение накачки и отражающих сигнал. Активный элемент располагался так, чтобы излучение накачки заводилось в кристалл через большее основание, а сигнальное - через меньшее, как это показано на рис.1. Подобный выбор ориентации кристалла связан с особенностями распространения пучка накачки в конических стержнях. Распространяясь от большего торца к меньшему, излучение, вследствие множественного отражения от боковой поверхности активного элемента, приобретает дополнительную фокусировку, что приводит к увеличению коэффициента усиления. После прохождения АЭ усиленный сигнал направлялся в фотодиод.

Боковая поверхность АЭ последовательно приводилась в контакт с различными веществами: воздух и этанол, с коэффициентами преломления $n=1, 1.36$ соответственно. Для организации контакта, стержень помещался в ванночку. Концы стержня выводились из ванночки через уплотнители.

Поскольку измерения проводились при импульсном режиме работы накачки, то усиление возникало только в момент прихода импульса. Тогда, по отношению двух значений сигнала (усиленного и не усиленного) определялся коэффициент усиления. Для определения действительного усиления, следовало учесть, что, в отсутствие излучения накачки, имеется поглощение сигнала, и потому, необходимо умножить полученный коэффициент усиления на коэффициент лазерного поглощения без импульса накачки, который так же измерялся в ходе эксперимента.

На рисунке 2 приведены результаты экспериментальных измерений коэффициента усиления для различных граничных условий.

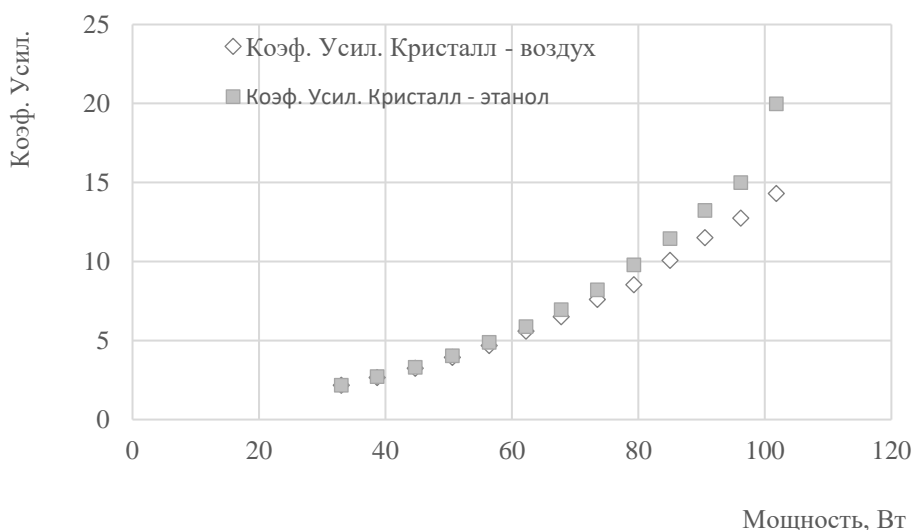


Рис. 2. Экспериментальные зависимости коэффициента усиления от мощности накачки, для случаев контакта боковой поверхности стержня с воздухом и этанолом

Для снятия данных, использовался осциллограф. Величина его абсолютной погрешности - порядка 1мВ, тогда как характерные значения измеряемых величин - сотни мВ и даже Вольты. Колебания показаний осциллографа, связанные с колебаниями мощности накачки, не превосходили 20мВ, т.е. относительные погрешности малы.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что распределение УСИ серьезно зависит от разностей показателей преломления кристалл - окружающая среда. Из рис. 2. видно, что коэффициент усиления увеличивается при увеличении показателя преломления окружающей среды, с которой граничит боковая поверхность активного элемента. Данное явление можно объяснить следующим образом: поскольку значительное влияние УСИ связано с его волноводным распространением вдоль кристалла, вызванное полным внутренним отражением, при минимизации разности показателей преломления на границе стержень-окружающая среда, доля лучей УСИ, претерпевающая полное внутреннее отражение, уменьшится. В таком случае, УСИ будет более эффективно покидать область усиления, и, следовательно, в меньшей степени влиять на инверсную населенность и коэффициент усиления, фактически приводя к его увеличению.

В работе [2] проводились эксперименты с тонкими цилиндрическими стержнями. Из того же материала и с тем же уровнем легирования, что и в данной работе. Сравнивая результаты, можно убедиться, что в конических тонких стержнях величина исследуемого эффекта имеет тот же порядок, поскольку относительное увеличение коэффициента усиления в аналогичных экспериментах имеет близкие значения. Результаты измерений обоих экспериментов представлены в следующей таблице:

Таблица. Экспериментальные значения коэффициента усиления по слабому сигналу, для случаев контакта боковой поверхности тонкого стержня с этанолом и воздухом, в двух экспериментах

Мощность накачки, Вт	Коэф. Усил. Кристалл – воздух	Коэф. Усил. Кристалл – этанол
Экспериментальные зависимости в работе [2] (цилиндрический стержень):		
42,3	3,29	3,45

58,2	4,49	4,76
71,3	5,69	5,91
80	7,66	8,21
96	9,86	10,62
101,8	11,11	12,65
Экспериментальные зависимости в данном исследовании (конический стержень):		
44,7	3,23	3,30
56,4	4,68	4,88
73,5	7,59	8,20
79,3	8,52	9,78
96,2	12,73	14,98
101,8	14,29	19,97

В ходе данного исследования было изучено волноводное распространение УСИ в тонких конических стержнях, экспериментально доказано его существенное влияние на лазерное усиление. В реальности, однако, стоит так же учитывать существующие отклонения от геометрической оптики, вызванные дифракцией света, а также то, что вследствие не идеальности поверхности кристалла происходит рассеяние лучей в разные углы, что не учитывалось в данной работе.

В процессе работы были выполнены все поставленные задачи, рассмотрены два случая граничных условий на боковой поверхности АЭ, в результате чего была показана возможность компенсации УСИ путем изменения показателя преломления окружающей среды. Таким образом, представляется перспективным использование конических тонких стержней в системах, где имеется минимальная разность показателей преломления при контакте двух сред. В частности, имеющих водяное охлаждение активного элемента.

Данные исследования позволят увеличить КПД подобных лазерных систем.

Литература

1. *Kuznetsov I. et. al.* Thin-rod Yb:YAG amplifiers for high average and peak power lasers // Opt. Lett. 43, 2018. P. 3941 – 3944.
2. *Emelyanov N., Kuznetsov I.* Amplified spontaneous emission increased by waveguiding in thin-rod active elements // Applied Optics. Vol. 61 No. 18, 2022.
3. *Emelianov N., Chizhov S., Kuznetsov I., Palashov O.* High average and peak power thin-rod laser amplifiers based on broadband Yb-doped materials // TECHNICAL DIGEST MPLP-2021 The IX International Symposium “MODERN PROBLEMS OF LASER PHYSICS”, Novosibirsk, Russia, 22 – 28 August, 2021 c. 95.