

МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ Nd^{3+} -YAG ЛАЗЕР С КОМБИНИРОВАННОЙ НАКАЧКОЙ ДИОДНЫМИ МАТРИЦАМИ

О. В. Буряк, А. Б. Ястребков¹

Рязанский государственный университет, 390000, г. Рязань, ул. Свободы, 46

В работе исследованы выходные характеристики импульсно-периодического твердотельного лазера с накачкой диодными матрицами при частоте следования импульсов накачки 8..512 Гц. Используются три варианта накачки: продольная растр-световодная, поперечная и комбинированная. В качестве источника накачки использовались матрицы диодов с импульсной мощностью ~ 800 Вт, размерами излучающей области 5×25 мм² и расходимостью излучения по двум взаимно-перпендикулярным осям, равной 4° и 15° , соответственно. Длительность импульса тока накачки изменялась в пределах 100 – 350 мкс. Исследованы три режима работы: 1) режим свободной генерации, 2) режим с пассивной модуляцией добротности, 3) режим с акустооптической модуляцией добротности. Максимальная импульсная мощность генерации составляла: 1) ~ 2 кВт (режим свободной генерации), 2) ~ 1.5 МВт (режим пассивной модуляции добротности), 3) ~ 100 кВт (режим акустооптической модуляции добротности). Максимальная средняя мощность генерации составляла 150 Вт при частоте следования импульсов накачки 512 Гц, а максимальная импульсная энергия генерации достигала 0.65 Дж.

Ключевые слова: мощные лазеры, импульсно-периодические лазеры, накачка диодными матрицами.

Ряд практических применений (глубокая гравировка, лазерная очистка и т.п.) требует использования мощных твердотельных лазеров, работающих в импульсно-периодическом режиме с высокой частотой повторения импульсов генерации

¹e-mail: ab@yastreb.issr.ru

(500–1000 Гц), имеющих высокую импульсную энергию (0.5–1 Дж), которая сочетается с высокой средней мощностью излучения (150–500 Вт). Целью данных исследований являлась разработка и создание лазерной системы с приведенными выше параметрами, обладающей высоким коэффициентом полезного действия.

Нами в работе [1] предложен растр-световодный вариант оптической накачки диодными матрицами достаточно протяженной ($l = 100$ мм) активной среды твердотельного лазера с поперечным сечением $S = 4 \times 4$ мм². В настоящей работе исследованы выходные характеристики импульсно-периодического твердотельного лазера с накачкой диодными матрицами, работающими при частоте следования импульсов накачки от 8 до 512 Гц. Используются три варианта накачки: продольная растр-световодная накачка, поперечная и комбинированная. При всех вариантах накачки использовались матрицы диодов с импульсной мощностью ~ 800 Вт, размерами излучающей области 5×25 мм² и расходимостью излучения накачки по двум взаимно-перпендикулярным осям 4° и 15° , соответственно. Общее количество используемых матриц не превышало 9 штук. Длительность импульса накачки варьировалась в пределах 100–350 мкс.

Установлены зависимости импульсной энергии генерации и средней мощности излучения от температуры охлаждающей жидкости диодных матриц, от интенсивности, частоты следования и длительности импульсов накачки, а также от параметров добротности резонатора. В качестве активной среды использовались Nd³⁺-YAG стержни длиной 100 мм и диаметром 6.3 и 8 мм и стержни длиной 110 мм с поперечным сечением 4×4 мм². Максимальная импульсная энергия генерации была получена при трехсторонней поперечной накачке активной среды диаметром 6.3 мм длиной 100 мм и достигала 0.65 Дж при частоте следования импульсов генерации $f_{\text{след}} = 8$ Гц. Энергия импульса незначительно падала (до 0.5 Дж) при увеличении частоты следования до 256 Гц. При этом максимальный оптический коэффициент полезного действия достигал 32 %.

При работе со стержнем сечением 4×4 мм² и длиной 110 мм получена максимальная плотность энергии излучения ~ 3 Дж/см² на частотах следования импульсов генерации 8–256 Гц. Установлено, что для достижения эффективной растр-световодной накачки необходимо уменьшить расходимость излучения накачки до 1–2 градусов по обоим взаимно-перпендикулярным осям. Предложена и реализована оптическая схема эффективной комбинированной накачки, сочетающая в себе достоинства продольной растр-световодной накачки диодными матрицами, расходимость излучения которых исправляется с помощью соответствующей конфигурации матриц микролинз, и трех- или четырехсторонней боковой накачки. Установлено, что комбинированная накачка 12–16

диодными матрицами в рассматриваемом случае будет наиболее эффективна. (8 матриц для продольной накачки, остальные – для боковой.)

Проведены исследования временных характеристик Nd³⁺-YAG лазера с модулированной добротностью при комбинированной накачке диодными матрицами вплоть до частот следования импульсов генерации, равных 512 Гц. Исследованы три режима работы: 1) режим свободной генерации, 2) режим пассивной модуляции добротности, 3) режим с акустооптической модуляцией добротности.

В качестве модулятора добротности использовались насыщающиеся поглотители, изготовленные из кристаллов YAG:Cr⁴⁺ с различными коэффициентами начального пропускания T_0 (от 16.5 % до 25 %) и акустооптический затвор. Установлено, что при работе с пассивным затвором в зависимости от уровня мощности и длительности импульсов накачки ($I_{\text{нак}} = 20 - 30$ А, $\tau_{\text{нак}} = 100 - 350$ мкс), а также частоты их следования (8–512 Гц) и коэффициента первоначального пропускания пассивного затвора T_0 возможен неоднократный переход насыщающегося поглотителя в просветленное состояние. При уменьшении силы тока накачки до $I_p = 24.5$ А пассивный затвор переставал переходить в просветленное состояние и происходил срыв лазерной генерации (импульс генерации на экране осциллографа исчезал). При увеличении тока до $I = 26$ А амплитуда импульса лазерного излучения возрастала, а длительность импульса генерации оставалась неизменной. Дальнейшее увеличение силы тока накачки приводило к эффекту насыщения, и роста амплитуды импульса генерации не наблюдалось. Зависимость амплитуды импульса генерации лазерного излучения от силы тока накачки представлена на рис. 1.

Типичная длительность импульса генерации при пассивной модуляции добротности составляла 20 нс. Измерения энергии импульса генерации показали, что при силе тока накачки 25 А величина энергии в импульсе генерации составляла около 15 мДж. При работе с акустооптическим затвором (АОЗ) реализован многоцуговый режим работы твердотельного лазера. Количество цугов за один импульс тока накачки доходило до 9 штук при частоте модуляции акустооптического затвора, равной 30 кГц. Длительность цуга составляла 25–30 мкс, при длительности отдельного импульса генерации 100–150 нс.

Плотность мощности и энергия отдельного импульса лазерного излучения зависели от режима работы акустооптического затвора и несколько увеличивались с ростом частоты модуляции АОЗ. В частности, при частоте модуляции акустооптического затвора $f_{\text{АОЗ}} = 10$ кГц энергия в первом импульсе каждого цуга была не менее

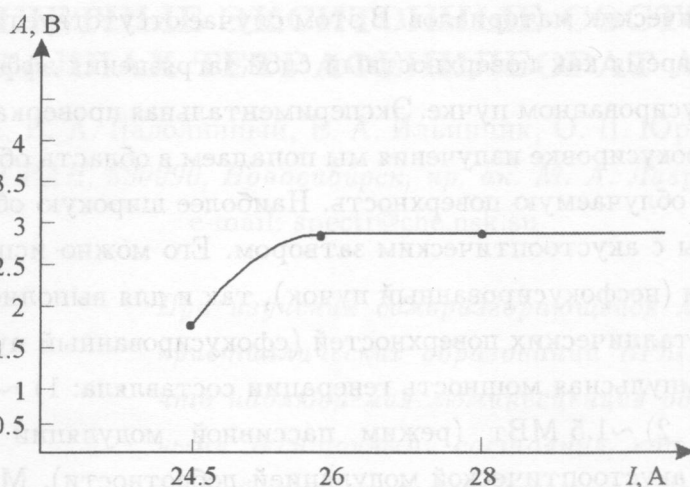


Рис. 1. Зависимость амплитуды импульса лазерного излучения от силы тока накачки.

$E_{\text{имп}}(1) = 5$ мДж при мощности отдельного импульса $P_{\text{имп}}(1) = 50 \cdot 10^3$ Вт и плотности мощности $I_{\text{имп}}(1) = 180$ кВт/см², а при частоте модуляции акустооптического затвора $f_{\text{АОЗ}} = 30$ кГц энергия в первом импульсе каждого цуга была не менее $E_{\text{имп}}(1) = 6.5$ мДж при мощности отдельного импульса $P_{\text{имп}}(1) = 65 \cdot 10^3$ Вт и плотности мощности $I_{\text{имп}}(1) = 230$ кВт/см². В первом случае количество цугов было равно трем, а во втором – девяти. Определение полной энергии генерации одного цуга импульсов позволило оценить среднюю мощность генерации отдельного цуга. На частоте модуляции АОЗ, равной 10 кГц, она оказалась равной $P_{\text{ср(цуг)}} = 0.5$ кВт при средней плотности мощности цуга $I_{\text{ср(цуг)}} = 1.8$ кВт/см². На частоте модуляции АОЗ, равной 30 кГц, аналогичные величины имели следующие значения: $P_{\text{ср(цуг)}} = 0.8$ кВт и $I_{\text{ср(цуг)}} = 2.8$ кВт/см². При этом средняя мощность генерации всех цугов не превышала значения: $P_{\text{ср}} = 0.5$ кВт, а средняя плотность мощности всех цугов – значения $I_{\text{ср}} = 1.8$ кВт/см².

Анализ полученных результатов показывает, что для увеличения эффективности работы исследуемого лазера в режиме модуляции добротности с помощью АОЗ необходимо увеличивать частоту модуляции (до 50 кГц) и подводимую мощность ультразвукового генератора (до 20 Вт).

Проведен сравнительный анализ эффективности использования акустооптического затвора и насыщающегося поглотителя в импульсно-периодическом режиме работы вплоть до частоты следования импульсов накачки, равной 512 Гц. Режим с пассивной модуляцией добротности является наиболее эффективным для удаления загрязнений с

поверхности металлических материалов. В этом случае отсутствует испарение материала подложки, в то время как поверхностный слой загрязнения эффективно удаляется при работе в нефокусированном пучке. Экспериментальная проверка подтвердила этот вывод. При острой фокусировке излучения мы попадаем в область образования плазмы, которая экранирует облучаемую поверхность. Наиболее широкую область применений имеет режим работы с акустооптическим затвором. Его можно использовать как для очистки поверхности (нефокусированный пучок), так и для выполнения работ по глубокой гравировке металлических поверхностей (сфокусированный пучок).

Максимальная импульсная мощность генерации составляла: 1) ~ 2 кВт (режим свободной генерации), 2) ~ 1.5 МВт (режим пассивной модуляции добротности), 3) ~ 100 кВт (режим с акустооптической модуляцией добротности). Максимальная средняя мощность генерации была достигнута на частоте следования импульсов 512 Гц и составляла 150 Вт. При этом максимальная импульсная мощность была не менее 2 кВт.

Таким образом, создан и исследован твердотельный лазер с комбинированной накачкой диодными матрицами, сочетающий в себе высокие импульсные и средние выходные характеристики. Разработанную лазерную систему можно использовать для очистки поверхности металла от ржавчины с высокой эффективностью и производительностью, для гравировки по металлу и других целей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] О. В. Буряк, А. З. Венедиктов, А. Б. Ястребков, "Твердотельный лазер с диодной накачкой", Патент РФ N 2361342. Заявл. 14.01.2008 г., опубл. 10.07.2009 г., Бюл. N 19.

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара "Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики", Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 28 октября 2009 г.