

Пассивная модуляция добротности $YVO_4/Nd:YVO_4/KTP$ -лазера зеленого диапазона с внутррезонаторным удвоением частоты и с насыщающимся поглотителем из GaAs*

Шан Гао

Реализован «зеленый» $YVO_4/Nd:YVO_4/KTP$ -лазер с диодной накачкой, внутррезонаторным удвоением частоты и пассивной модуляцией добротности с помощью насыщающегося поглотителя в виде пластины GaAs. В экспериментах использовались два образца пластин GaAs. При использовании пластины толщиной 400 мкм и при мощности падающей накачки 10.5 Вт максимальная выходная мощность зеленого лазера составила 362 мВт при частоте следования 84 кГц и длительности импульса 2.5 нс. При использовании пластины GaAs толщиной 700 мкм минимальная длительность импульса была 1.5 нс при частоте следования 67 кГц, энергии импульса 4.18 мкДж и пиковой мощности 2.8 кВт.

Ключевые слова: зеленый лазер, пассивная модуляция добротности, насыщающийся поглотитель.

1. Введение

Твердотельные лазеры с диодной накачкой (ТЛДН) привлекают большое внимание благодаря низкой цене, простоте и компактной структуре, а также возможности их потенциальных приложений в связи, хирургии и пр. Кристалл $Nd:YVO_4$ является распространенной и хорошо отработанной лазерной средой для ТЛДН. Главным недостатком этого кристалла по сравнению с $Nd:YAG$ является его малая теплопроводность, что может приводить к серьезным тепловым эффектам в лазерном кристалле и снижать выходную мощность при высокой мощности диодной накачки. Прорывным достижением стала диффузионная сварка кристалла $Nd:YVO_4$ с нелегированным YVO_4 . В ряде работ показано, что использование композитного кристалла $YVO_4/Nd:YVO_4$ может резко ослабить тепловые эффекты [1–3], поэтому такой активный элемент может быть перспективным кандидатом для лазеров с высокой выходной мощностью.

Внутррезонаторное удвоение частоты излучения ТЛДН является эффективным методом реализации «зеленых» лазеров [4]. Такие лазеры с высокими энергией и пиковой мощностью имеют множество потенциальных приложений: с их помощью можно проводить обработку материалов с высокой точностью, из-за слабого поглощения воды в этом спектральном диапазоне (сине-зеленое окно прозрачности) этот тип лазеров является ключевым инструментом для разведки океана и подводной связи. Модуляция добротности является распространенным методом получения высокой пиковой мощности и короткой длительности импульса. В последние два десятилетия опубликовано множество работ, посвященных зеленым лазерам с модуляцией добротности [5–13]. В соответ-

ствии со способом модуляции можно рассматривать активную и пассивную модуляцию добротности. Последняя использует дешевые насыщающиеся поглотители в резонаторе и представляет значительный интерес для генерации зеленых импульсов, поскольку она просто реализуема и не требует источников высокого или ВЧ напряжения. На сегодняшний день для модуляции добротности успешно применялись такие насыщающиеся поглотители, как $Cr^{4+}:YAG$ [8–10], однослойные углеродные нанотрубки [11] и пластины GaAs [12, 13]. Что касается GaAs, он стал привлекательным насыщающимся поглотителем благодаря простоте изготовления, низкой стоимости и большой нелинейности. В 1997 г. сообщалось о первом зеленом лазере с насыщающимся поглотителем GaAs с длительностью импульса 25 нс, частотой следования 12 кГц и пиковой мощностью 800 Вт [12]. Впоследствии был продемонстрирован зеленый $Nd:NYW/GaAs$ -лазер с пассивной модуляцией добротности, минимальной длительностью импульса 50 нс и энергией импульса 0.66 мкДж [13]. Однако из-за ограничений на мощность накачки и конфигурации резонатора зеленый лазер с высокой пиковой мощностью и короткой (~1 нс или менее) длительностью импульса для насыщающегося поглотителя из GaAs не был реализован.

Помимо типа насыщающегося поглотителя, а также уровня внутренних потерь, важным фактором для генерации короткого импульса является время кругового обхода. Основная цель настоящей работы состоит в демонстрации компактного зеленого $YVO_4/Nd:YVO_4/KTP$ -лазера с насыщающимся поглотителем из GaAs для генерации коротких импульсов и с внутррезонаторным удвоением частоты. Тепловые эффекты были минимизированы благодаря использованию композитного кристалла $YVO_4/Nd:YVO_4$. Для экспериментального исследования влияния параметров насыщающегося поглотителя на характеристики импульса использовались два образца GaAs. Были получены импульсы с минимальной длительностью 1.5 нс при частоте следования 67 кГц и мощности падающей накачки 10.5 Вт, что соответствует энергии одиночного импульса 4.18 мкДж и пиковой мощности 2.8 кВт.

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

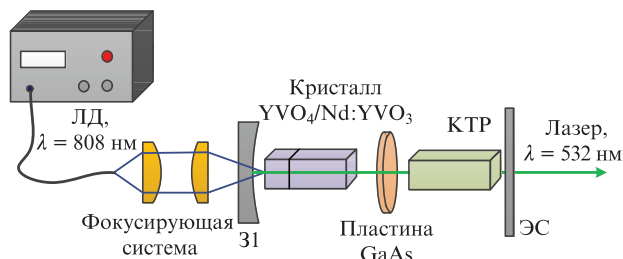


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

2. Экспериментальная установка

Принципиальная схема зеленого $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{KTP}$ -лазера с модуляцией добротности показана на рис.1. Источником накачки служил коммерческий лазерный диод (ЛД) (LA-820, LYPE Co. Ltd, Китай) с центральной длиной волны 808 нм. Пучок накачки фокусировался и коллимировался с помощью оптической системы в композитный кристалл, диаметр пятна составлял 400 мкм. Волокно связи имело диаметр сердцевины 400 мкм и числовую апертуру 0.22. Входным зеркалом 31 являлось вогнутое зеркало с радиусом кривизны 150 мм, на которое были нанесены просветляющее (AR) покрытие на $\lambda = 808$ нм и высокоотражающее (HR) покрытие на $\lambda = 1064$ и 532 нм. На выходной элемент связи (ЭС) были нанесены HR-покрытие на $\lambda = 1064$ нм и высокопропускающее (HT) покрытие на $\lambda = 532$ нм.

Полная физическая длина плосковогнутого резонатора составляла около 3 см. Композитный кристалл $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ a -среза размерами 3×8 мм с концентрацией Nd 1 ат.% был диффузионно сварен с нелегированным кристаллом YVO_4 размерами $3 \times 3 \times 3$ мм. На входную грань композитного кристалла было нанесено AR-покрытие на $\lambda = 808$ и 1064 нм, а на другую его поверхность – AR-покрытие на $\lambda = 1064$ нм. Кристалл, обернутый тонким слоем индийской фольги, был помещен в медный держатель, находящийся при постоянной температуре 15 °С. Кристалл KTP (Crystech Inc., Китай), вырезанный для фазового согласования II типа ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.5^\circ$), имел размеры $3 \times 3 \times 10$ мм, на обе его поверхности были нанесены AR-покрытия на $\lambda = 1064$ и 532 нм. Температура KTP (20 °С) поддерживалась системой водяного охлаждения. В эксперименте использовались два образца пластин GaAs толщиной 400 и 700 мкм. Выходные характеристики зеленого лазера, включая выходную мощность, длительность импульса и частоту следования импульсов, регистрировались с помощью измерителя мощности PM100D (Thorlabs Inc., США), цифрового осциллографа (500 МГц) (TDS 5052B, Tektronix Co., США) и быстрого InGaAs-фотодетектора (Newfocus 1601, Newport Co. Ltd, США).

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Сначала изучался непрерывный зеленый лазер без насыщающегося поглотителя из GaAs. На рис.2 показана зависимость средней мощности лазера от мощности падающей накачки P_{in} . Пороговая мощность накачки в непрерывном режиме (НР) составляла около 150 мВт, максимальная непрерывная выходная мощность была 648 мВт при $P_{in} = 10.5$ Вт, что соответствует оптической эффективности 6.17% и дифференциальной эффективности

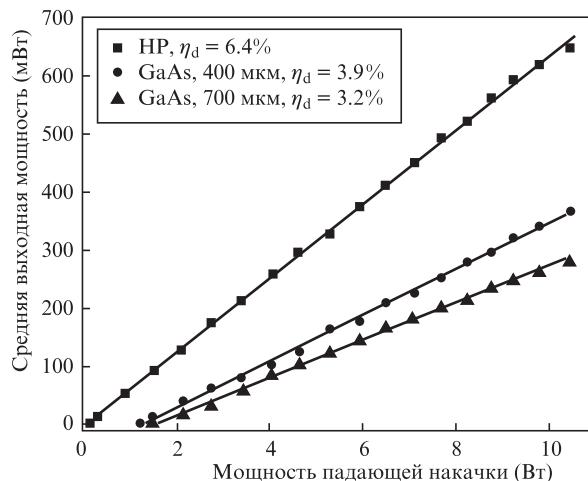


Рис.2. Зависимость средней выходной мощности зеленого лазера от мощности падающей накачки.

$\eta_d = 6.4\%$ (в работе [4] сообщалось об эффективности 20%). Полученная нами низкая выходная мощность была обусловлена внесенными потерями из-за отсутствия у композитного кристалла $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{YVO}_4$ AR-покрытий на $\lambda = 532$ нм. При помещении пластины из GaAs в резонатор лазера была легко реализована пассивная модуляция добротности. Как видно из рис.2, пороговые мощности накачки для режима модуляции добротности с пластинами GaAs толщиной 400 и 700 мкм возрастали до 1.21 и 1.5 Вт соответственно. Наибольшая выходная мощность (362 мВт) была получена с пластиной GaAs толщиной 400 мкм при $P_{in} = 10.5$ Вт. Соответствующая дифференциальная эффективность η_d составляла около 3.9%.

Зависимости длительности импульса и частоты следования импульсов от мощности падающей накачки показаны на рис.3. Видно, что с увеличением P_{in} длительность импульса сокращается, а частота следования импульсов растет. Использование пластины GaAs толщиной 700 мкм позволяет еще сильнее уменьшить длительность импульса. Минимальная длительность импульса 1.5 нс была достигнута при $P_{in} = 10.5$ Вт. В то же время, наибольшая частота следования импульсов была получена при использовании пластины GaAs толщиной 400 мкм и составила 84 кГц.

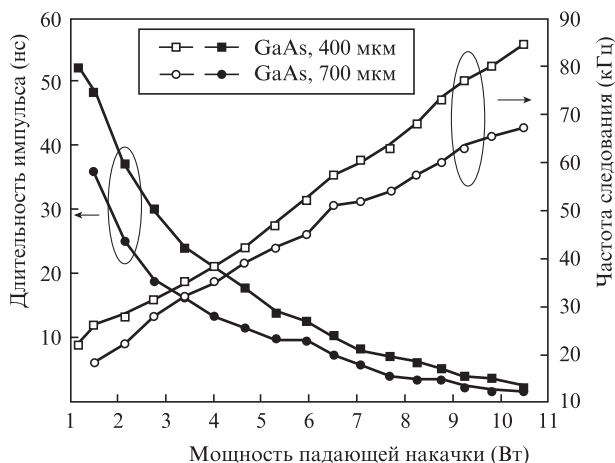


Рис.3. Зависимость длительности импульса (черные точки) и частоты следования (светлые точки) импульсов от мощности падающей накачки.

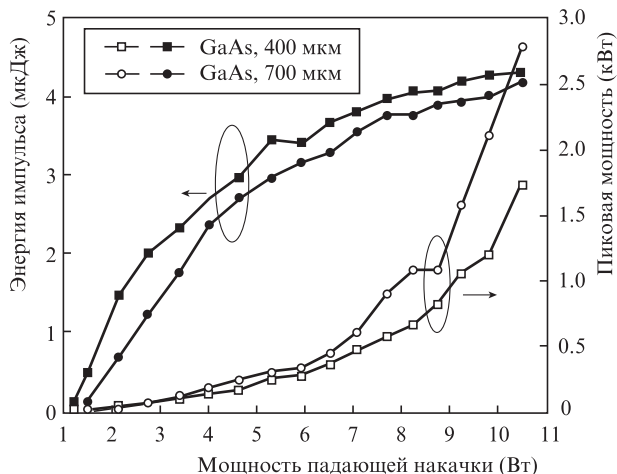


Рис.4. Зависимость энергии (черные точки) и пиковой мощности импульса (светлые точки) от мощности падающей накачки.

Измерения средней выходной мощности, длительности импульса и частоты следования импульсов позволили оценить энергию одиночного импульса и его пиковую мощность (рис.4). При высокой мощности накачки энергии импульсов, получаемые при использовании пластин GaAs с разной толщиной, различались незначительно, тогда как пиковая мощность при использовании пластины толщиной 700 мкм была намного выше, чем при использовании пластины толщиной 400 мкм. Максимальная пиковая мощность по оценке составила 2.8 кВт при $P_{in} = 10.5$ Вт. Таким образом, зеленый лазер с более тонкой пластиной GaAs в качестве насыщающегося поглотителя может быть использован в приложениях, требующих вы-

сокой частоты следования, а лазер с более толстой пластиной GaAs может быть применен в областях, где нужна высокая пиковая мощность.

Типичная форма импульсов показана на рис.5. При $P_{in} = 10.5$ Вт и использовании пластины GaAs толщиной 700 мкм минимальная длительность импульса достигла 1.5 нс. На вставке рис.5 показан соответствующий цуг импульсов с частотой следования 67 кГц, демонстрирующий стабильную модуляцию добротности.

4. Выводы

Итак, реализован зеленый $YVO_4/Nd:YVO_4/KTP$ -лазер с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности с пластиной GaAs в качестве насыщающегося поглотителя. Максимальная выходная мощность в режиме модуляции добротности составила 362 мВт при мощности падающей накачки 10.5 Вт для пластины GaAs толщиной 400 мкм. Наименьшая измеренная длительность импульса составила 1.5 нс при частоте следования 67 кГц, что соответствует энергии импульса 4.18 мкДж и пиковой мощности 2.8 кВт. При использовании пластины GaAs толщиной 400 мкм зеленый $YVO_4/Nd:YVO_4/KTP$ -лазер с пассивной модуляцией добротности может быть использован для генерации импульсов с высокой частотой следования, тогда как использование пластины GaAs толщиной 700 мкм позволяет дать значительно более высокую пиковую мощность.

Эта работа поддержана Фондом естественных наук провинции Шаньдун (грант № ZR2014AL012) и Стартап-фондом докторантских исследований Шаньдунского университета транспорта.

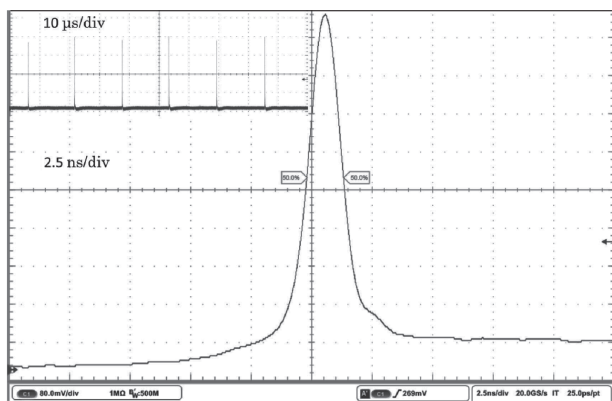


Рис.5. Форма импульса и типичный цуг импульсов при использовании пластины GaAs толщиной 700 мкм; $P_{in} = 10.5$ Вт.

1. Tsunekane M., Taguchi N., Inaba H. *Electron. Lett.*, **32**, 40 (1996).
2. Li T., Zhuo Z., Li X., Yang H., Zhang Y. *Chin. Opt. Lett.*, **5**, 175 (2007).
3. Zhuo Z., Li T., Li X., Yang H. *Opt. Commun.*, **274**, 176 (2007).
4. Kitaoka Y., Ohmori S., Yamamoto K., Kato M., Sasaki T. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 299 (1993).
5. Taira T., Kobayashi T. *Appl. Opt.*, **34**, 4298 (1995).
6. Liu J., Wang C., Wang C., Meng X., Zhang H., Zhu L., Wang J., Shao Z., Jiang M. *Appl. Phys. B*, **72**, 171 (2001).
7. Yang K., Zhao S., Li G., Zhao H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 1252 (2004).
8. Chen Y. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 1481 (1997).
9. Liu J., Yang J., He J. *Opt. Laser Technol.*, **36**, 31 (2004).
10. An J., Zhao S., Li G., Yang K., Li D., Wang J., Li M., Zhuo Z. *Laser Phys. Lett.*, **5**, 193 (2008).
11. Cheng K., Zhao S., Yang K., Li G., Li D., Zhang G., Wang Y., Zheng L., Wu F., Su L., Xu J. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 055807 (2013).
12. Kajava T., Gaeta A. *Opt. Commun.*, **137**, 93 (1997).
13. Chen L., Zhao S., Zhao H. *Opt. Laser Technol.*, **35**, 563 (2003).