Известия НАН Армении, Физика, т.33, №5, с.214-220 (1998)

УДК 621.373.826

ДИОДНО-НАКАЧИВАЕМЫЙ НЕПРЕРЫВНЫЙ YAG:Nd^{3+} ЛАЗЕР С ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ

Д. Г. САРКИСЯН, А. В. ПАПОЯН

Институт физических исследований НАН Армении

Г. БОННЕТ, К. БЕРГМАНН

Университет Кайзерслаутерна, Кайзерслаутерн, Германия

(Поступила в редакцию 6 марта 1998г.)

Для пассивной модуляции добротности (ПМД) диодно-накачиваемого непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера в качестве насыщающегося поглотителя использовались: кристалл LiF:F_2^-; Т-образная лейкосапфировая кювета, содержащая молекулярные пары Cs_2; цилиндрическая лейкосапфировая кювета, содержащая смесь молекулярных паров Cs_2+Rb_2+K_2. Показано, что основным преимуществом применения молекулярных паров для осуществления ПМД непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера является простота управления длительностью генерируемых импульсов. При возрастании температуры молекулярных паров от 150°C до 230°C длительность генерируемых лазерных импульсов уменьшается от 570 нс до 80 нс.

В настоящее время для пассивной модуляции добротности в качестве насыщающегося поглотителя (НП) используются кристаллы LiF:F_2^-, Cr^{4+}:YAG и Cr^{4+}:YSO [1-12]. Однако в некоторых случаях применение НП на основе молекулярных паров щелочных металлов может быть более предпочтительным. Основными преимуществами являются: 1) простота изменения длительности импульсов путем изменения температуры молекулярных паров, 2) возможность работы при высокой частоте следования и высокой лазерной мощности (вследствие быстрого переизлучения поглощенной энергии), 3) ожидаемая область применения в спектральном диапазоне 500-1100 нм, 4) отсутствие деградации молекулярных паров, 5) захват частоты и спектральное сужение вследствие тонкой структуры в спектре поглощения молекулярных паров.

В работах [13-17] было продемонстрировано, что применение молекулярных паров щелочных металлов для ПМД импульсных YAG:Nd^{3+} и рубинового лазеров позволяет генерировать спектрально-ограниченные импульсы, перестраиваемые по длительности в интервале 300 пс – 100 нс (в зависимости от плотности молекулярных паров).

Целью настоящей работы было изучение и сравнение особенностей режимов ПМД непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера, осуществляемых с помощью кристалла LiF:F_2^-, кюветы, содержащей молекулярные пары Cs_2, и кюветы, содержащей смесь молекулярных паров Cs_2+Rb_2+K_2.

В наших экспериментах использовался коммерческий диодно-накачиваемый непрерывный YAG:Nd^{3+} лазер (IDAR Laser). При оптической накачке (максимальной) 50 Вт выходная мощность составляла 6 Вт. Длина YAG:Nd^{3+} лазерного элемента составляла 25 мм и диаметр – 2 мм. Отражение выходного зеркала составляло 96% (рис.1). Лазер генерировал поляризованное TEM_{00} излучение с диаметром 1,5 мм.

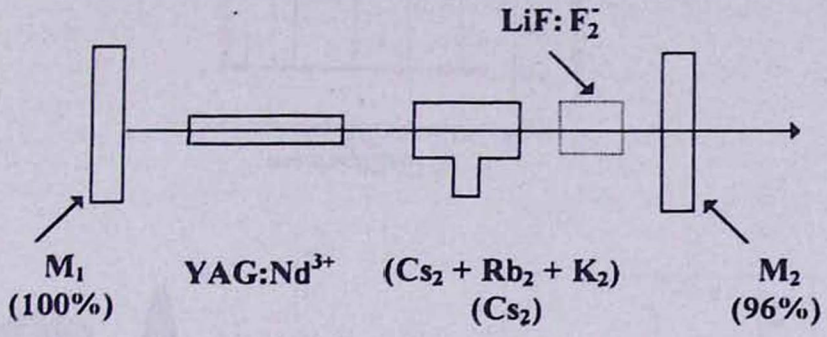

Рис.1. Экспериментальная схема. YAG:Nd^{3+} лазерный элемент – длина 25 мм, диаметр 2 мм. M_1 и M_2 – зеркала с отражением 100% и 96% соответственно.

I) Осуществление режима ПМД непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера с помощью кристалла LiF: F_2^-. Кристалл имел начальное пропускание (для слабого, ненасыщающего излучения) 76,2% на длине волны 1064 нм. Длина кристалла – 13 мм. Торцы кристалла были параллельны друг другу и ориентировались перпендикулярно оси резонатора. Оптическая длина резонатора (L_{opt}) составляла 190 мм. Торцы кристалла не имели просветляющих покрытий. При помещении кристалла в резонатор лазера порог генерации возрастал в 1,64 раза. Длительность генерируемых импульсов составляла ~ 100 нс. При оптической накачке 50 Вт выходная мощность (средняя) составляла 200 мВт. На рис.2a приведена осциллограмма генерируемых импульсов на длине волны 1064 нм. Осциллограмма получена с помощью скоростного фотодиода и осциллографа фирмы Hewlett-Packard с полосой 2 ГГц (и 8 ГГц в стробоскопическом режиме). Частота следования лазерных импульсов ~ 5 кГц. Из рис.2a видно, что частота следования импульсов, а также энергия импульсов несколько изменяются вдоль цуга. На рис.2b приведена осциллограмма временной огибающей одиночного импульса из цуга, с полной шириной на полувысоте (ПШПВ) ≈ 100 нс. Таким образом, пиковая мощность одиночного импульса составляла 400 Вт. Отметим, что с 30% вероятностью генерируемые импульсы имели субструктуру, обусловленную биением продольных мод (рис.2c). В верхней части рисунка приведена осциллограмма того же импульса с лучшим временным разрешением, которая показывает, что период осцилляций $T \approx 1{,}25$ нс. Этот период равен времени полного обхода фотоном оптической длины резонатора, которая равна $T \approx 2L_{opt}/c$, где c – скорость света [18].

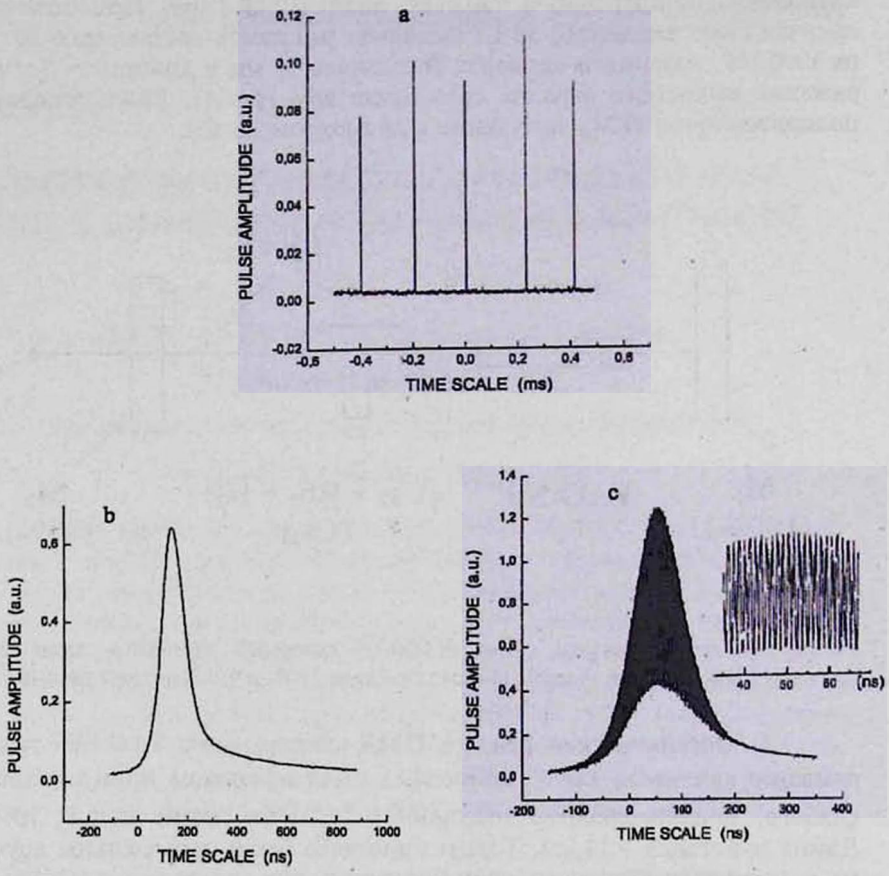

Рис.2. Режим пассивной модуляции добротности непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера с помощью кристалла LiF:F_2^-. a) осциллограмма генерируемых импульсов на длине волны 1064 нм, b) осциллограмма временной огибающей одиночного импульса из цуга, c) импульс с субструктурой, обусловленной биением продольных мод; в верхней части – тот же импульс с лучшим временным разрешением.

II) Осуществление режима ПМД непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера с помощью Т-образной лейкосапфировой кюветы, содержащей молекулярные пары Cs_2. Длина кюветы – 102 мм. Лейкосапфировые окна кюветы (прозрачные в интервале 160 нм – 7 мкм) были сориентированы таким образом, чтобы избежать двулучепреломления. Окна кюветы были почти параллельны друг другу и ориентировались перпендикулярно оси резонатора. Окна кюветы не имели просветляющих покрытий. Оптическая длина резонатора составляла 400 мм. Т-образная кювета помещалась в резонатор лазера, при этом окна нагревались до температуры 240°C, но отросток кюветы оставался холодным (т.е. имел комнатную температуру). Поскольку температура отростка определяет плотность молекулярных паров Cs_2 в кювете, следовательно, в кювете практически не было молекулярных паров,

при этом порог генерации лазера возрастал в 1,57 раза. При оптической накачке 50 Вт выходная мощность (средняя) составляла 100 мВт.

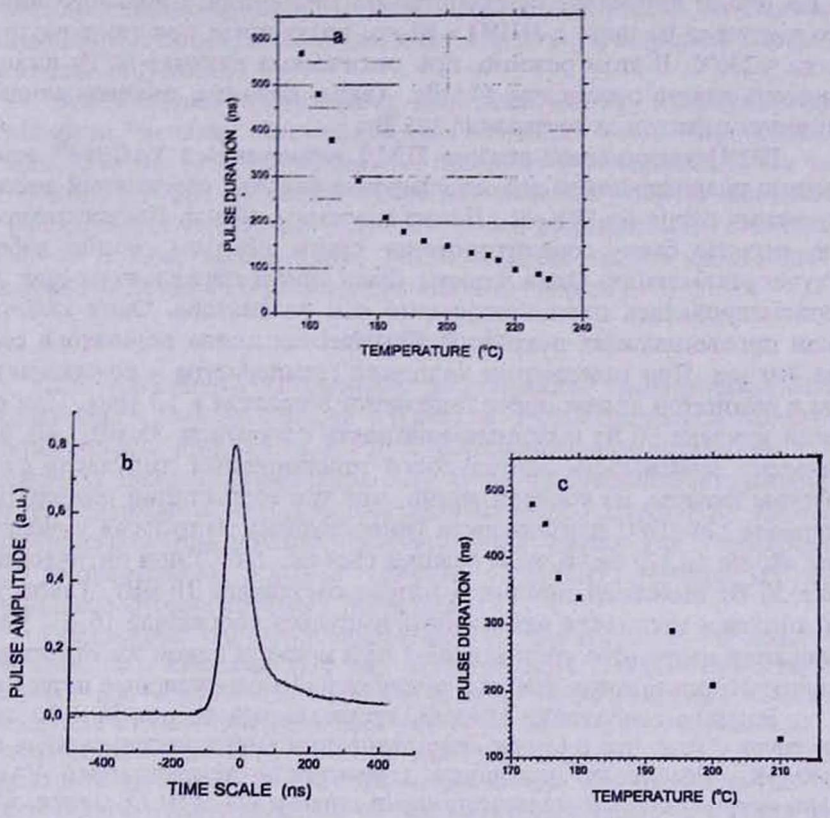

Рис.3. а) Зависимость длительности генерируемых импульсов от температуры отростка кюветы (в кювете – молекулярные пары Cs_2), b) осциллограмма одиночного импульса из цуга, с ПШП ≈80 нс (температура отростка ≈230°C), c) зависимость длительности генерируемых импульсов от температуры кюветы (в кювете – смесь молекулярных паров Cs_2+Rb_2+K_2).

Нагревание отростка кюветы проводилось в интервале температур 150-230°C (температура окон кюветы поддерживалась на ~10°C выше). При этом давление молекулярных паров Cs_2 в кювете возрастало от $7 \cdot 10^{-6}$ до $7 \cdot 10^{-4}$ Торр, а начальное пропускание (для слабого, ненасыщающего излучения) на длине волны 1064 нм уменьшалось с 95% до 70%. На рис.3а приведена зависимость длительности генерируемых импульсов от температуры отростка кюветы, из которой видно, что при возрастании температуры в интервале 150-230°C длительность генерируемых импульсов уменьшается от 570 нс до 80 нс. Укорочение длительности генерируемых импульсов объясняется увеличением начального поглощения молекулярных паров, что, как хорошо известно, при работе лазера в режиме ПМД приводит к укорочению длительности [1]. Это согласуется с результатом, полученным при ПМД непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера с ламповой накачкой [19]. Частота следования импульсов составляла

~5 кГц, однако в отличие от случая применения LiF:F_2^- (рис.2а) импульсы не были расположены эквидистантно, а располагались более хаотично. На рис.3b приведена осциллограмма временной огибающей одиночного импульса из цуга, с ПШП ≈ 80 нс, полученная при температуре отростка ≈ 230°C. В этом режиме, при оптической накачке 50 Вт выходная мощность лазера составляла 50 мВт. Таким образом, пиковая мощность одиночного импульса составляла 125 Вт.

III) Осуществление режима ПМД непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера с помощью цилиндрической лейкосапфировой кюветы, содержащей смесь молекулярных паров Cs_2+Rb_2+K_2. Длина кюветы – 80 мм. Лейкосапфировые окна кюветы были сориентированы таким образом, чтобы избежать двулучепреломления. Окна кюветы были почти параллельны друг другу и ориентировались перпендикулярно оси резонатора. Окна кюветы не имели просветляющих покрытий. Оптическая длина резонатора составляла 400 мм. При помещении холодной (температура – комнатная) кюветы в резонатор лазера порог генерации возрастал в 1,7 раза. При оптической накачке 50 Вт выходная мощность составляла 35 мВт. На рис.3c приведена зависимость длительности генерируемых импульсов от температуры кюветы, из которой видно, что при возрастании температуры в интервале 170-210°C длительности генерируемых импульсов уменьшаются от 480 нс до 120 нс. В этом режиме (120 нс, 210°C) при оптической накачке 50 Вт выходная мощность лазера составляла 10 мВт. Таким образом, пиковая мощность одиночного импульса составляла 16 Вт. Частота следования импульсов составляла ~5 кГц и имела такой же характер, как в случае использования кюветы, содержащей молекулярные пары Cs_2.

Близкое совпадение кривых, приведенных на рис.3a и 3c, свидетельствует о том, что в случае использования смеси молекулярных паров Cs_2+Rb_2+K_2, пассивная модуляция добротности непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера осуществляется молекулярными парами Cs_2. Тем не менее, вопрос о том, какой из молекулярных паров – Cs_2 или Rb_2 более перспективен в качестве НП для непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера, пока полностью не выяснен. Меньшая выходная мощность лазера в режиме ПМД при использовании кюветы, содержащей смесь молекулярных паров Cs_2+Rb_2+K_2, обусловлена несколько худшим оптическим качеством окон кюветы по сравнению с кюветой, содержащей молекулярные пары Cs_2 (это видно и по более высокому порогу генерации лазера).

Обсуждение

Из приведенных выше результатов следует, что основным преимуществом применения молекулярных паров для осуществления ПМД непрерывного YAG:Nd^{3+} лазера является простота управления длительностью генерируемых импульсов. Что касается порога генерации, он был минимальным в случае применения для ПМД кристалла LiF:F_2^-. Объяснение этого достаточно простое: показатель преломления кристалла LiF:F_2^- n≈1,4, в то время как для лейкосапфира n≈1,75. Следовательно, френелевские потери, вызванные отражением от одной поверхности LiF:F_2^- и лейкосапфира, составляют 4 % и 7,5 % соответственно. Более того, число отражающих поверхностей в случае кристалла LiF:F_2^- всего 2, а в случае лейкосапфировой кюветы – 4. Таким образом, для осуществления ПМД кюветой, содержащей молекулярные пары, очень важным является использование кюветы с брюстеровскими окнами. Это при-

ведет к снижению порога генерации, увеличит выходную мощность лазера, а также позволит использовать более высокое начальное поглощение молекулярных паров. В свою очередь, более высокое начальное поглощение молекулярных паров позволит генерировать более короткие по длительности импульсы и увеличит область перестройки длительности импульсов (рис.3а).

Что касается применения кристалла $LiF:F_2^-$ с просветленными покрытиями, а также использования меньшего (чем 76%) начального пропускания, то это, по-видимому, приведет к генерации более коротких импульсов. Тем не менее, открытым остается вопрос, как долго будет работать для ПМД кристалл $LiF:F_2^-$ без деградации F_2^- центров окраски. В случае применения молекулярных паров деградация насыщающегося молекулярного перехода отсутствует.

Заключение

Для пассивной модуляции добротности диодно-накачиваемого непрерывного $YAG:Nd^{3+}$ лазера в качестве насыщающегося поглотителя использовались: кристалл $LiF:F_2^-$; Т-образная лейкосапфировая кювета, содержащая молекулярные пары Cs_2; цилиндрическая лейкосапфировая кювета, содержащая смесь молекулярных паров Cs_2+Rb_2+K_2. Основным преимуществом применения молекулярных паров для осуществления ПМД непрерывного $YAG:Nd^{3+}$ лазера является простота управления длительностью генерируемых импульсов.

Ожидается, что смесь молекулярных паров Cs_2+Rb_2+K_2 может быть использована в качестве НП для непрерывных лазеров, работающих в интервале 500 – 1100 нм (например, для $Ti:Al_2O_3$ лазера). Поскольку поглощение смеси молекулярных паров Cs_2+Rb_2+K_2 в интервале 600 – 900 нм существенно больше, чем на длине волны 1064 нм, это позволит осуществить при той же рабочей температуре, но при меньшей длине кюветы (всего 1-2 см) такое же начальное пропускание, что и для непрерывного $YAG:Nd^{3+}$ лазера. Важно отметить, что для успешной работы в качестве насыщающегося поглотителя кюветы, содержащей молекулярные пары, последняя должна иметь брюстеровские окна.

Авторы признательны А.С.Саркисяну за помощь при изготовлении кювет.

ЛИТЕРАТУРА

1. **А.Л.Микаэлян, М.Л.Тер-Микаелян, Ю.Г.Турков.** Оптические генераторы на твердом теле. М., Сов. радио, 1967.
2. **R.S.Afzal, A.W.Yu, J.J.Zayhowski, T.Y.Fan.** Opt. Lett., **22**, 1314 (1977).
3. **A.Agnesi, S.Dell'Acqua, G.C.Reali.** Opt. Commun., **133**, 211 (1977).
4. **Y.Shimony, Z.Burstein, Y.Kalisly.** IEEE J. Quant. Electr., **31**, 1738 (1995).
5. **R.S.Afzal, M.D.Selker.** Opt. Lett., **20**, 465 (1995).
6. **J.J. Degnan.** IEEE J. Quant. Electr., **31**, 1890 (1995).
7. **Y-K.Kuo, M-F.Huang, M.Birnbaum.** IEEE J. Quant. Electr., **31** ,657 (1995).
8. **B.Braun, F.X.Kartner, U.Keller, J-P.Meyn, G.Huber.** Opt. Lett., **21**, 405 (1996).
9. **J.J.Zayhowski, C.Dill III.** Opt. Lett., **19**, 1427 (1994).
10 **B.Braun, F.X.Kartner, G.Zhang, M.Moser, U.Keller.** Opt. Lett., **22**, 381 (1977).
11. **Т.Т.Басиев, А.Ю.Дергачев, П.Г. Зверев и др.** Изв. АН СССР, серия физич., **51**, 1440 (1987).
12. **Т.Т.Басиев, А.Н.Кравец, С.Б.Миров, А.В.Федин.** Письма в ЖТФ, **17**, 16 (1991).
13. **Н.Н.Костин, В.А.Ходовой.** Изв. АН СССР, серия физич., **37**, 2083 (1973); **37**,

2093 (1973). **Н.Н.Костин, В.А.Ходовой, В.В.Хромов.** Изв. АН СССР, серия физич., 37, 2089 (1973).
14. **Д.Г.Саркисян.** Квантовая электроника, 16, 1697 (1989).
15. **S. Yezekian, S. Michaelian, K. Petrosian, K.Pokhsrarian.** Optics Comm., 70, 493 (1989).
16. **D.Sarkisyan, V.Krupkin, B.Glushko.** Appl. Opt., 33, 5518 (1994).
17. **D.Sarkisyan, A.Papoyan.** Appl. Opt., 35, 3207 (1996).
18. Сверхкороткие световые импульсы. М., Мир, 1981.
19. **K.Pokhsrarian, K.Petrossian, H.Petrossian, D.Sarkisyan.** Àdv. Program. of Intern. Conf. CLEO/Europe - EQEC'96, p.66, Hamburg, 1996.

ԴԻՈԴԱՅԻՆ ՄՂՈՒՄՈՎ ԱՆԸՆԴՀԱՏ YAG:Nd^{3+} ԼԱԶԵՐ ԲԱՐՈՐԱԿՈՒԹՅԱՆ ՊԱՍԻՎ ՄՈԴՈՒԼՈՒՄՈՎ

Գ. Հ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ա. Վ. ՊԱՊՈՅԱՆ, Գ. ԲՈՆՆԵՏ, Կ. ԲԵՐԳՄԱՆՆ

Դիոդային մղումով անընդհատ YAG:Nd^{3+} լազերի բարորակության պասիվ մոդուլման (ԲՊՄ) համար որպես հագեցվող կլանիչ օգտագործվել են LiF:F_2^- բյուրեղ, Cs_2 մոլեկուլային գոլորշի պարունակող T-ձև լեյկոշափյուղե անոթ, Cs_2+Rb_2+K_2 մոլեկուլային գոլորշիների խառնուրդ պարունակող գլանածև լեյկոշափյուղե անոթ: Ցույց է տված, որ անընդհատ YAG:Nd^{3+} լազերի ԲՊՄ-ի իրականացման համար մոլեկուլային գոլորշիների օգտագործման հիմնական առավելությունն է գեներացվող իմպուլսների տևողության ղեկավարման պարզությունը: Մոլեկուլային գոլորշիների ջերմաստիճանի 150°C-ից 230°C աճի դեպքում գեներացվող իմպուլսների տևողությունը նվազում է 570 ns-ից 80 ns:

PASSIVELY Q-SWITCHED DIODE-PUMPED CW YAG:ND^{3+} LASER

D. H. SARKISYAN, A. V. PAPOYAN, G. BONNET, K. BERGMANN

For passive Q-switching of diode-pumped cw YAG:Nd^{3+} laser as saturable absorber a LiF:F_2^- crystal, a T-shaped sapphire cell containing molecular vapor of Cs_2 as well a cylindrical sapphire cell containing molecular vapor of Cs_2+Rb_2+K_2 mixture have been used. It is shown that the main advantage of molecular vapor usage for passive Q-switching of cw YAG:Nd^{3+} laser is a simple variation of the pulse duration. The pulse duration decreases from 570 ns to 80 ns at the cell temperature increasing from 150°C to 230°C.