

Моноимпульсный Nd:YAG-лазер с поперечной диодной накачкой и инъекцией излучения одночастотного полупроводникового лазерного модуля

М.В.Богданович, В.П.Дураев, В.С.Калинов, О.Е.Костик, К.И.Ланцов, К.В.Лепченков, В.В.Машко, А.Г.Рябцев, Г.И.Рябцев, Л.Л.Тепляшин

Описан моноимпульсный Nd:YAG-лазер с мощной поперечной диодной накачкой и инъекцией затравочного излучения, генерируемого одночастотным полупроводниковым лазерным модулем. Пороговая мощность затравочного излучения инжектора, при которой моноимпульсный Nd:YAG-лазер переключается в режим одночастотной генерации, составляет 0.44 мВт (интенсивность излучения 5.6×10^{-2} Вт/см²). С увеличением мощности излучения инжектора спектральные и мощностные характеристики излучения моноимпульсного лазера практически не изменяются при постоянном уровне возбуждения его активной среды. Спектральная ширина линии генерации Nd:YAG-лазера в моноимпульсном режиме с инъекцией излучения одночастотного полупроводникового лазерного модуля TLD-1060-14BF не превышает 90 МГц (длина волны 1064 нм).

Ключевые слова: твердотельный лазер, диодная накачка, полупроводниковый лазерный модуль, инъекция узкополосного излучения.

Одночастотные импульсные твердотельные лазеры на основе YAG:Nd-кристалла с шириной линии генерации менее 100 МГц и энергией импульсов от единиц до десятков миллиджоулей – перспективные излучатели для лидаров высокого спектрального разрешения (ветровых лидаров) [1, 2]. Одним из эффективных способов получения синхронизированных во времени узкополосных световых импульсов является инъекция излучения внешнего источника в резонатор мощного лазера [3–8]. В большинстве случаев такой подход реализуется в рамках механизма сверхрегенеративного усиления [3]. При этом в качестве внешнего (затравочного) излучателя используются одночастотные лазеры, их активные среды по своим спектральным характеристикам идентичны или близки к активным средам мощных лазеров, в которые доставляется излучение затравки [1, 3–8].

Как показано в [8], пороговый уровень мощности непрерывного излучения инжектора, свыше которого мощный многомодовый моноимпульсный Nd:YAG-лазер переключается в режим одночастотной генерации, составляет не более 0.14 мВт. Это позволяет использовать в качестве источников затравочного излучения одночастотные полупроводниковые лазеры с внешней волоконной брэгговской решеткой [9–11].

Настоящая работа посвящена изучению возможности применения полупроводникового одночастотного лазерного модуля (ОЛМ) типа TLD-1060-14BF в качестве источника затравочного излучения для моноимпульсного

Nd:YAG-лазера с поперечной диодной накачкой. Подробно изучены спектральные характеристики Nd:YAG-лазера в режиме свободной генерации, модулированной добротности и в режиме моноимпульсной генерации с инъекцией одночастотного затравочного излучения.

Блок-схема исследованного лазерного излучателя (рис. 1) включает мощный моноимпульсный лазер (1–8) и лазерный инжектор непрерывного действия малой мощности (9–15). Мощный моноимпульсный лазер изготавливался на основе активного Nd:YAG-элемента, возбуждаемого по поперечной схеме тремя матрицами лазерных диодов (МЛД), которые располагались симметрично относительно продольной оси X вблизи боковой поверхности цилиндрического активного элемента (АЭ) диаметром 5 мм и длиной 50 мм. Суммарная импульсная выходная мощность МЛД варьировалась в пределах 1.5–3.0 кВт.

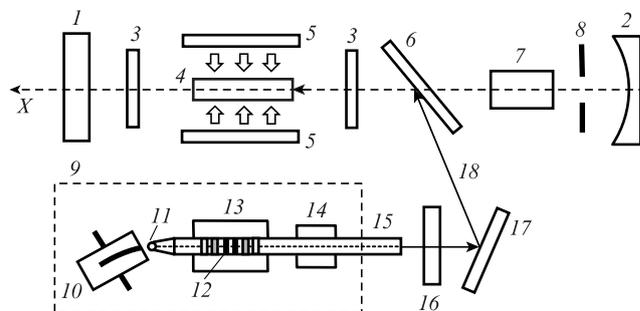


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – плоское выходное зеркало; 2 – глухое сферическое зеркало (радиус кривизны 1 м); 3 – четвертьволновая фазовая пластинка; 4 – АЭ моноимпульсного лазера; 5 – блок диодной накачки; 6 – поляризатор; 7 – ячейка Поккельса; 8 – диафрагма; 9 – ОЛМ; 10 – двухлинзовый блок; 11 – микролинза; 12 – ВБР; 13 – пьезокерамика; 14 – оптический изолятор; 15 – выход одномодового волокна; 16 – коллимирующая система; 17 – поворотное зеркало; 18 – затравочное излучение.

М.В.Богданович, В.С.Калинов, О.Е.Костик, К.И.Ланцов, К.В.Лепченков, В.В.Машко, А.Г.Рябцев, Г.И.Рябцев, Л.Л.Тепляшин. Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by В.П.Дураев. ЗАО «НОЛАТЕХ», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: nolatech@mail.ru

Поступила в редакцию 22 июня 2016 г.

Длительность прямоугольного импульса накачки составляла 250 мкс (передний и задний фронты импульса не превышали 5 мкс) при частоте следования импульсов 10–30 Гц. Торцы АЭ просветлялись на длину волны 1064 нм. Концентрация ионов неодима в кристалле АЭ моноимпульсного лазера составляла 1.1%. Модуляция добротности осуществлялась электрооптическим элементом на основе кристалла DKDP. Длина резонатора моноимпульсного лазера равна 270 мм.

В качестве источника затравочного излучения для мощного моноимпульсного лазера использовался одночастотный полупроводниковый лазерный модуль (инжектор) TLD-1060-14BF («НОЛАТЕХ», Москва) [11, 12]. Конструкция ОЛМ включала двухпроходный усилитель на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантоворазмерными слоями, состыкованный с одномодовым волокном с помощью микролинзы (см. рис.1). В волокне на участке вблизи микролинзы формировалась волоконная брэгговская решетка (ВБР). Отрезок волокна с ВБР закреплялся на пьезокерамике. На волоконном выходе ОЛМ с целью защиты от внешних отражений устанавливался оптический изолятор. Устойчивый непрерывный одночастотный режим модуля поддерживался посредством прецизионной стабилизации тока накачки и рабочей температуры полупроводникового усилителя, закрепленного на элементе Пельтье. Спектр излучения ОЛМ состоял из одной линии с полушириной менее 0.5 МГц (длина волны генерации при комнатной температуре 1064.4 нм) во всем исследованном интервале значений мощности P выходного излучения инжектора (0–12 мВт). Поляризованное излучение с выхода волокна коллимировалось в пучок диаметром 5 мм и направлялось в резонатор моноимпульсного лазера с помощью внутрирезонаторного поляризатора.

Максимум линии генерации инжектора настраивался на одну из собственных мод моноимпульсного лазера (расстояние между модами 575 МГц) путем варьирования тока накачки и температуры усилителя ОЛМ, а также напряжения, подаваемого на пьезокорректор ВБР. Момент совпадения линий генерации инжектора и моды моноимпульсного лазера определялся по интерференционной картине, формируемой интерферометром Фабри–Перо с областью свободной дисперсии 1 ГГц и наблюдаемой с помощью ПЗС-матрицы. В интерферометре устанавливались зеркала, предназначенные для работы в окрестности длины волны 532 нм. Длина базы интерферометра была 150 мм, коэффициент отражения зеркал интерферометра составлял 85%. В процессе экспериментов излучение моноимпульсного лазера преобразовывалось нелинейным кристаллом КТiОРО₄ в излучение второй гармоники. Ширина линии генерации моноимпульсного лазера (длина волны 1064 нм) определялась путем измерения ширины линии второй гармоники (532 нм). При гауссовой форме линии генерации ее ширина на длине волны 1064 нм $\Delta\nu_{1064}$ соотносится с шириной линии $\Delta\nu_{532}$, измеренной после удвоения частоты, как $\Delta\nu_{1064}/\Delta\nu_{532} = 1/\sqrt{2}$ [13, 14]. Измеряя параметры световых колец на интерференционной картине, можно определить ширину линии генерации моноимпульсного лазера.

Интерференционные картины излучения Nd:YAG-лазера, зарегистрированные при различных условиях возбуждения МЛД, представлены на рис.2. В режиме свободной генерации ширина линии излучения $\Delta\nu$ составляла на полувысоте 3.68 ГГц (рис.2,а). При переходе в ре-

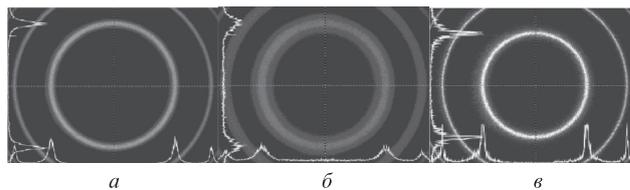


Рис.2. Спектры излучения Nd:YAG-лазера с поперечной диодной накачкой, зарегистрированные с помощью интерферометра Фабри–Перо с базой 5 мм, в режиме свободной генерации (ширина линии $\Delta\nu = 3.68$ ГГц) (а), в режиме моноимпульсной генерации ($\Delta\nu = 6.82$ ГГц) (б) и в режиме моноимпульсной генерации при инъекции одночастотного непрерывного излучения ($\Delta\nu < 90$ МГц).

жим модулированной добротности ширина линии генерации возрастала до 6.82 ГГц (рис.2,б), что, вероятно, обусловлено уменьшением длительности моноимпульса излучения Nd:YAG-лазера более чем на четыре порядка (до 10.6 нс). Когда в резонатор моноимпульсного лазера вводилось излучение инжектора мощностью $P \geq 0.44$ мВт (интенсивность излучения не менее 5.6×10^{-2} Вт/см²), наблюдался режим одночастотной моноимпульсной генерации. Следует отметить, что на рис.2,а и б представлены интерферограммы, полученные с помощью интерферометра Фабри–Перо с базой 5 мм, спектральное разрешение которого позволило оценить ширины линий только в режимах свободной генерации и моноимпульсной генерации без инъекции внешнего сигнала. Спектр моноимпульсной генерации с инъекцией одночастотного непрерывного излучения (рис.2,в) приведен только в качестве иллюстрации. Его действительная спектральная ширина оценивалась с помощью интерферометра Фабри–Перо с базой 150 мм и составила для длины волны 1064 нм менее 90 МГц.

Как установлено, линию генерации инжектора не обязательно точно настраивать на одну из собственных мод моноимпульсного Nd:YAG-лазера в пределах контура усиления АЭ шириной ~ 180 ГГц [15, 16]. Вероятно, это обусловлено тем, что при активной модуляции добротности твердотельного лазера поток генерируемого излучения развивается приблизительно за десять двойных проходов резонатора. Как следствие, собственные стационарные моды не успевают сформироваться, и излучение имеет квазинепрерывный спектр [17].

Как и в варианте, представленном в [8], переход Nd:YAG-лазера из многомодового в одночастотный режим генерации происходил при достижении некоторой пороговой мощности излучения инжектора. Увеличение пороговой мощности в нашем случае на 0.3 мВт по сравнению со значением, полученным в [8], объясняется неполным согласованием пространственных характеристик излучения инжектора и резонатора моноимпульсного лазера. При более высоких значениях мощности инжектора P спектральные и мощностные выходные характеристики излучения моноимпульсного лазера практически не изменялись при условии постоянства уровня возбуждения МЛД.

Увеличение мощности накачки моноимпульсного лазера от 1.5 до 3.0 кВт приводило к росту энергии выходных импульсов E одночастотной генерации. При максимальной мощности накачки МЛД достигнутая энергия $E = 57$ мДж.

Установлено, что временная стабильность частоты излучения моноимпульсного лазера практически полностью определяется стабильностью частоты излучения ин-

жектора (смещение частоты ОЛМ в наших экспериментах не превышало 720 МГц за один час непрерывной работы).

Итак, экспериментально показано, что одночастотный полупроводниковый лазерный модуль TLD-1060-14BF может быть использован в качестве эффективного источника затравочного излучения для узкополосного моноимпульсного Nd:YAG-лазера с мощной поперечной диодной накачкой. Пороговая мощность излучения инжектора, при которой моноимпульсный Nd:YAG-лазер переключается в режим одночастотной генерации, составляет не более 0.44 мВт (интенсивность излучения 5.6×10^{-2} Вт/см²). При увеличении мощности излучения инжектора спектральные и мощностные характеристики излучения моноимпульсного лазера практически не изменяются при условии постоянства уровня возбуждения МЛД. Спектральная ширина линии генерации Nd:YAG-лазера в моноимпульсном режиме с инжекцией излучения одночастотного полупроводникового лазерного модуля TLD-1060-14BF не превышает 90 МГц (длина волны 1064 нм).

1. Schroder T., Lemmerz C., Reitebuch O., Wirth M., Wuhrer C., Treichel R. *Appl. Phys. B*, **87**, 437 (2007).

2. Разенков И.А. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 52 (2013).
3. Бондаренко А.Н., Фолин К.Г., Смирнов В.С., Анциферов В.В. *Письма в ЖЭТФ*, **6**, 692 (1967).
4. Анциферов В.В., Держи Н.М., Пивцов В.С., Угожаев В.Д., Фолин К.Г. *ЖПС*, **18**, 38 (1973).
5. Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Квантовая электроника*, **1**, 625 (1974).
6. Grund Ch.J., Eloranta E.W. *Opt. Eng.*, **30**, 6 (1991).
7. Анциферов В.В. *ЖТФ*, **68**, 74 (1998).
8. Богданович М.В., Калинов В.С., Костик О.Е., Ланцов К.И., Лепченков К.В., Машко В.В., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Тепляшин Л.Л. *ЖПС*, **83**, 211 (2016).
9. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П., Сумароков М.А., Климов К.И. *Квантовая электроника*, **31**, 529 (2001).
10. Дураев В.П., Медведев С.В. *ФТП*, **48**, 125 (2014).
11. Дураев В., Медведев С. *Фотоника*, **6**, 54 (2015).
12. <http://www.nolatech.ru>.
13. Park Y.K., Giuliani G., Byer R.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20**, 117 (1984).
14. Матвеев А.Н., Колачевский Н.Н., Алнис Я., Хэнш Т.В. *Квантовая электроника*, **38**, 391 (2008).
15. Beier V., Meyn J.P., Knappe R., Boller K.J., Huber G., Wallenstein R. *Appl. Phys. B*, **58**, 381 (1994).
16. Кравцов Н.В. *Квантовая электроника*, **31**, 661 (2001).
17. Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Квантовая электроника*, **3**, 625 (1974).