

Активная синхронизация мод пикосекундных лазеров на кристаллах $Ti^{3+}:Al_2O_3$ и $Cr^{4+}:Mg_2SiO_4$ при импульсной лазерной накачке длительностью 0.5–5 мкс

В.П.Пашинин, С.В.Гарнов, В.И.Конов, А.К.Сенаторов, М.Н.Синявский

Получена генерация пикосекундных импульсов титан-сапфирового и форстеритового лазеров в режиме активной синхронизации мод при накачке импульсами Nd:YAG-лазера длительностью 0.5–5 мкс.

Ключевые слова: синхронизация мод, титан-сапфировый лазер, форстеритовый лазер.

1. Введение

Кристаллы сапфира с ионами Ti^{3+} и форстерита с ионами Cr^{4+} широко используются для генерации УКИ. Уникальность этих кристаллов заключается в том, что наряду с широкополосностью спектра усиления, позволяющей достигать фемтосекундной длительности импульсов, они обладают сравнительно высоким сечением вынужденного излучения. Оба кристалла активно исследовались в последнее время в различных лазерных схемах с использованием как активной [1, 2], так и пассивной синхронизации мод [3, 4]. Минимальная длительность УКИ, достигнутая для титан-сапфирового лазера в режиме активной синхронизации мод (АСМ), составила 150 фс [1], для форстеритового – 60 фс [2]. При пассивной синхронизации мод (ПСМ) с использованием керровской нелинейности удается достигать даже меньших длительностей импульсов – до 6 фс для сапфира с титаном [3] и до 20 фс для форстерита [4]. Недостатком данных лазерных сред является относительно короткое время жизни лазерных уровней (2–3 мкс), что затрудняет достижение высокого коэффициента усиления и тем самым обуславливает довольно высокий порог генерации при непрерывной накачке.

При импульсной накачке генерацию УКИ в упомянутых кристаллах до сих пор получить не удавалось, хотя данный режим представляет значительный интерес, т. к. позволяет достичь гораздо более высокой энергии лазерных импульсов. Проблема заключается в отсутствии соответствующего источника накачки, генерирующего импульсы, длительность которых сравнима с временем жизни лазерных уровней.

Накачка Nd:YAG-лазером в режиме свободной генерации оказывается неэффективной, поскольку длительность импульсов накачки на два порядка превышает время жизни лазерного уровня и порог генерации слишком высок. С другой стороны, лазеры с модуляцией добротности имеют слишком малую длительность импульсов и не позволяют поддерживать требуемый уровень инверсной населенности в накачиваемых кристаллах в

течение всего периода формирования УКИ, который для режима АСМ обычно составляет не менее ста полных обходов резонатора. При типичных длинах резонаторов $L = 100$ см это требует импульсной накачки длительностью не менее 700 нс. В режиме пассивной самосинхронизации мод для эффективного формирования импульсов генерации из шума с широким спектральным составом и дальнейшего развития генерации УКИ требуется еще большее число проходов по резонатору, а следовательно, еще большая длительность накачки – сотни микросекунд.

В настоящей работе исследованы режимы активной синхронизации мод в кристаллах $Ti^{3+}:Al_2O_3$ и $Cr^{4+}:Mg_2SiO_4$ при импульсной накачке. Для накачки использовались импульсы специально разработанного YAG:Nd-лазера (а также, в случае $Cr^{4+}:Mg_2SiO_4$, – его вторая гармоника) длительностью 0.5–5 мкс, близкой к временам жизни возбужденного состояния в исследуемых средах.

2. Лазер накачки на YAG:Nd³⁺ с длительностью импульсов 0.5–5 мкс

Для получения импульсов накачки, длительность которых соответствует времени жизни лазерных уровней в кристаллах $Ti:Al_2O_3$ (2.7 мкс) и $Cr:Mg_2SiO_4$ (2.7 мкс), был применен лазер с внутррезонаторной волоконно-оптической линией задержки [5]. Принципиальная схема генератора на кристалле YAG:Nd³⁺ представлена на рис.1. Резонатор лазера образован парой плоских диэлектрических зеркал 1 и 7, волоконным световодом 2 типа кварц – кварц с сердцевинной диаметром 300 мкм, а также парой сопрягающих линз 3 и 5. В качестве пассивного затвора для модуляции добротности 6 использовался кристалл YAG:Cr⁴⁺. Начальное пропускание за-



Рис.1. Принципиальная схема лазера накачки на YAG:Nd³⁺: 1, 7 – зеркала резонатора; 2 – световод; 3, 5, 8, 10 – коллимирующие линзы; 4, 9 – активная среда; 6 – пассивный затвор; 11 – кристалл КТР.

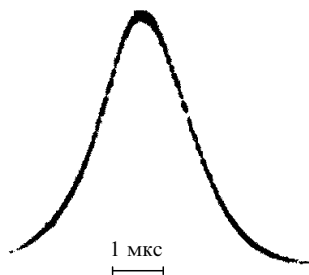


Рис.2. Временная форма импульса накачки при длине волоконного световода 50 м.

твора и коэффициент отражения выходного зеркала на длине волны 1064 нм подбирались экспериментально для каждой длины световода так, чтобы обеспечивалась максимальная энергия при генерации одиночного импульса. Энергия импульса измерялась измерителем мощности и энергии ИМО-2Н и достигала 100 мДж.

Вследствие смещения поперечных мод в волоконном световоде достигались высокая стабильность энергии (нестабильность менее 1%), гладкая временная форма импульса, а также пространственная однородность лазерного пучка и отсутствие спекл-структуры. Временная форма импульса, показанная на рис.2 для волоконного световода длиной 50 м, контролировалась по сигналу лавинного фотодиода с помощью запоминающего осциллографа С9-8. Изменяя длину волоконного световода, положение пассивного затвора и его плотность, можно было менять длительность лазерного импульса от 0.5 до 5 мкс (при длине световода от 10 до 70 м).

Для накачки титан-сапфирового лазера использовалась вторая гармоника лазера на $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$, которая генерировалась при фокусировке излучения линзой 10 в кристалл КТР 11 длиной 7 мм. При длительности импульса 0.5 мкс коэффициент преобразования достигал 20%. При больших длительностях коэффициент преобразования резко снижался, поскольку относительно высокая расходимость лазерного пучка не позволяла использовать более острую фокусировку при сохранении углового синхронизма. С целью увеличения энергии второй гармоники при больших длительностях использовался дополнительный каскад усиления, который позволял увеличить энергию импульсов до 400 мДж и достигнуть эффективности преобразования 10% при длительности импульса 5 мкс. Основные параметры лазера накачки приведены ниже. Данные в скобках соответствуют длине волны 532 нм.

Длина волны (нм)	1064 (532)
Длительность импульса (мкс)	0.5–5 (0.3–3)
Максимальная энергия (мДж)	400 (40–80)
Диаметр пучка (мм)	6
Расходимость (мрад)	10
Нестабильность энергии импульса (%)	<1 (<3)
Частота следования импульсов (Гц)	1–30

3. Пикосекундные лазеры на кристаллах $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$

Схемы резонаторов титан-сапфирового и форстеритового лазеров (рис.3) были идентичными и различались лишь спектром отражения резонаторных зеркал. Использовался Z-образный резонатор, близкий к симмет-

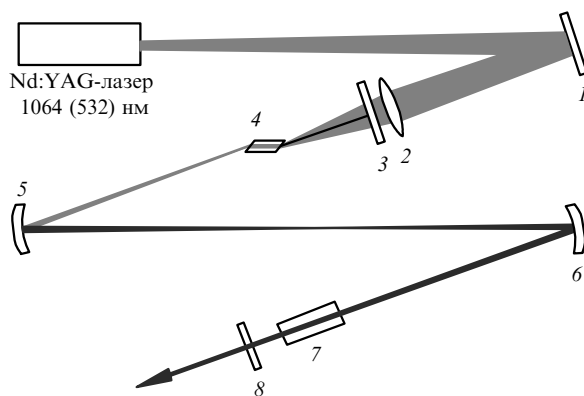


Рис.3. Принципиальная схема лазеров на кристаллах $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$:

1 – глухое зеркало; 2 – фокусирующая линза; 3, 5, 6, 8 – зеркала резонатора; 4 – активная среда лазера; 7 – модулятор.

ричному, со скомпенсированным астигматизмом. Резонатор состоял из пары вогнутых зеркал с радиусом кривизны 200 мм, плоского глухого и плоского зеркал. Длина резонатора составляла 117 см для титан-сапфирового лазера и 123 см для форстеритового лазера. Плоское выходное зеркало 8 имело высокий коэффициент отражения в широкой спектральной области и максимум в центре полосы усиления лазерного кристалла; в случае титан-сапфирового лазера $R = 80\%$, для форстеритового лазера – 75%. Излучение накачки фокусировалось линзой 2 в пятно диаметром 0.7 мм.

Временное распределение мощности лазерного излучения регистрировалось осциллографом С7-19 с помощью лавинного фотодиода ЛФД-24 с временем отклика 0.5 нс. Более точное измерение длительности отдельных импульсов внутри цуга УКИ осуществлялось с помощью электронно-оптической камеры Imacon-500 с максимальным разрешением 2 пс. Точная калибровка камеры производилась по двойному отражению лазерного импульса под углом 45° от плоскопараллельной пластины из кварцевого стекла марки КВ толщиной 10 мм. Суммарная энергия лазерных импульсов измерялась измерителем мощности и энергии ИМО-2Н, а нестабильность энергии оценивалась по отклику пирозлектрического датчика энергии.

Для титан-сапфирового лазера в режиме свободной генерации при накачке импульсами второй гармоники $\text{YAG}:\text{Nd}$ -лазера длительностью 0.6 мкс наблюдалась генерация нескольких (1–3) импульсов длительностью 100–150 нс, промодулированных с периодом, равным времени обхода резонатора (8 нс). Длительность импульсов зависела от мощности накачки и оставалась постоянной при неизменных условиях накачки, в то время как глубина модуляции изменялась в пределах 20–30% от импульса к импульсу. При незначительном превышении порога генерации (3 мДж) генерировался одиночный импульс, с дальнейшим увеличением энергии накачки появлялся второй, а затем, через ~ 0.5 мкс, и третий импульс. При существенном превышении порога импульсы сливались.

Дифференциальный КПД генерации титан-сапфирового лазера составлял 25%, и при поглощенной энергии накачки 8 мДж энергия излучения достигала 1.2 мДж. Для осуществления режима активной модуляции доб-

ротности использовался акустооптический модулятор, помещенный вблизи выходного зеркала резонатора. Период модуляции соответствовал времени полного обхода резонатора и составлял 8 нс. Минимальная длительность импульсов по полувысоте была равна 100 пс. Характеристики титан-сапфирового лазера приведены ниже.

Длина волны (нм)	800
Минимальная длительность импульса (пс).....	100
Длительность цуга генерации (нс).....	50 – 70
Период следования импульсов (нс)	8
Максимальная энергия (мДж).....	0.15
Излучаемая мода	TEM ₀₀

Форстеритовый лазер, накачиваемый импульсами YAG: Nd-лазера длительностью 2.0 мкс, в режиме свободной генерации излучал аналогичную последовательность промодулированных импульсов длительностью 150–300 нс. Дифференциальный КПД составил 16%, и при поглощенной энергии накачки 120 мДж энергия излучения достигала 16 мДж. В режиме активной модуляции добротности использовался пьезоэлектрострикционный оптический модулятор, работающий в режиме дифракции Рамана–Ната, который обеспечивает более эффективную модуляцию по сравнению с обычными акустооптическими затворами. Модулятор представлял собой кристалл LiNbO₃, две боковых грани которого были покрыты алюминием и служили электродами; к ним прикладывалось высокочастотное напряжение. Кристалл являлся частью резонансного контура, возбуждаемого генератором ВЧ сигналов Г4-143, имеющим обратную связь по частоте. Резонансная частота модулятора составляла 58.2 МГц, стабилизация осуществлялась с погрешностью 10⁻⁶.

Схема управления модулятором позволяла подводить мощность ВЧ генератора в импульсном режиме с помощью генератора прямоугольных импульсов Г5-63. Импульсный режим (время полного обхода резонатора составляло 8 нс) позволил увеличить эффективность модуляции за счет уменьшения средней акустической мощности в кристалле модулятора. Длительность цуга ВЧ сигнала была равна 200 мкс при пиковой мощности, не превышающей 1 Вт.

Типичные осциллограммы цугов пикосекундных импульсов, излучаемых форстеритовым лазером в режиме АСМ, показаны на рис.4. При энергии накачки, близкой к порогу генерации, генерация состояла из одного цуга пикосекундных импульсов длительностью около 300 нс. С увеличением энергии накачки длительность цуга уменьшалась, и при дальнейшем увеличении энергии во временном распределении мощности генерации появлялся второй максимум. Максимальная энергия всего цуга генерации составляла 8 мДж и достигалась при поглощенной энергии накачки около 120 мДж, при которой наблюдалось насыщение усиления. Минимальная длительность импульсов по полувысоте составляла 75 пс. Ниже даны характеристики форстеритового лазера.

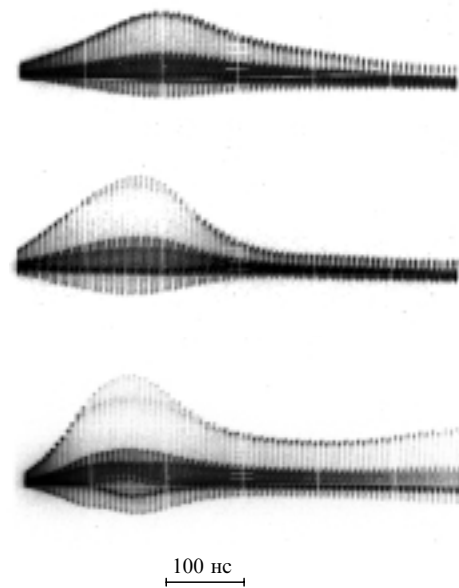


Рис.4. Временная форма цуга импульсов форстеритового лазера.

Длина волны (нм)	1240
Минимальная длительность импульса (пс).....	75
Длительность цуга генерации (нс).....	150 – 300
Период следования импульсов (нс)	8.6
Максимальная энергия (мДж).....	8
Излучаемая мода	TEM ₀₀

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе впервые осуществлена активная синхронизация мод титан-сапфирового и форстеритового лазеров при накачке импульсами Nd: YAG-лазера с длительностью 0.5–5 мкс, соответствующей времени жизни лазерных уровней в данных средах. Минимальная длительность УКИ составила 75 пс. Дальнейшая оптимизация лазеров и применение дополнительных пассивных внутрирезонаторных нелинейных элементов должны привести к существенному уменьшению длительности импульсов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-02-17666), госконтракта Минпромнауки «Фундаментальная спектроскопия» № 282, а также Российско-германского проекта «Основные принципы лазерной абляции сверхкороткими импульсами».

1. Curley P.F., Ferguson A.I. *Opt. Lett.*, **17**, 195 (1992).
2. Seas A., Petricevic V., Alfano R.R. *Opt. Lett.*, **17**, 937 (1992).
3. Sutter D.H., Steinmeyer G., Gallmann L. et al. *Opt. Lett.*, **24**, 631 (1999).
4. Zhang Z., Torizuka K., Itatani T. et al. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **23**, 1975 (1997).