

УДК 621.378.325

ЭФФЕКТ СТАБИЛИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ Nd:YAG ЛАЗЕРОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОГО ЗЕРКАЛА НА КРИСТАЛЛЕ КТР

М. В. Горбунков, Л. А. Фомин, Ю. В. Шабалин

Обнаружен новый эффект стабилизации лазерного излучения при использовании нелинейного зеркала (на основе удвоителя частоты и дихроичного зеркала) в режиме самосинхронизации мод. В условиях стабилизации с помощью нелинейного зеркала на кристалле КТР и системы внешней отрицательной обратной связи достигнуто заметное сокращение длительности стабильных ультракоротких импульсов Nd:YAG лазера. Минимальная длительность на длине волны 1.064 мкм не превышала 7 пс. Предложен механизм такого режима генерации.

Для генерации твердотельными лазерами пикосекундных импульсов все чаще находят применение режим самосинхронизации мод с использованием нелинейного зеркала, которое образовано внутриврезонаторным кристаллом – удвоителем частоты и дихроичным зеркалом [1 – 3]. Главное преимущество такого подхода – переход к чисто твердотельной технологии без использования жидкостных насыщающихся поглотителей. Другой положительной особенностью является попутная генерация излучения на удвоенной частоте. Достижению предельно короткой длительности светового импульса препятствует эффект группового запаздывания взаимодействующих волн [3]. Характерный масштаб группового запаздывания составляет несколько пикосекунд. Для удвоителей с ооо типом взаимодействия (при преобразовании излучения с длиной волны 1.064 мкм таким является кристалл КТР) указывалось на негативную роль спектральной селекции по механизму, аналогичному действию поляризационного фильтра Лио [1]. Именно

спектральная селекция считалась основной причиной генерации импульсов длительностью 25 – 30 нс непрерывным [3] и стабилизированным отрицательной обратной связью импульсным [2] Nd:YAG лазерами при использовании КТР в качестве элемента нелинейного зеркала. В настоящей работе мы сообщаем о наблюдении эффекта стабилизации излучения Nd:YAG лазера с внутрирезонаторным кристаллом КТР, который сопровождался значительным сокращением длительности импульса.

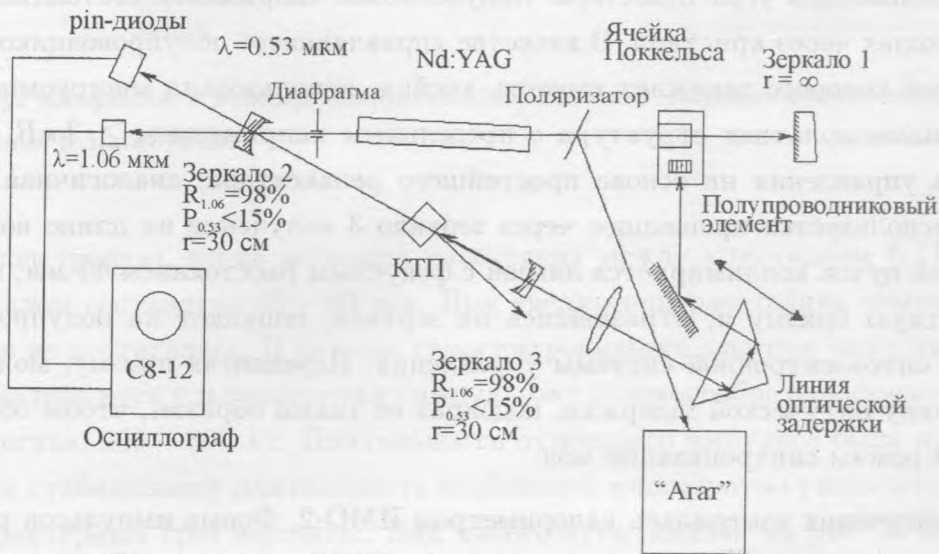


Рис. 1. Экспериментальная установка.

Эксперименты проводились на установке, схема которой показана на рис. 1. Для достижения повышенной мощности излучения в кристалле КТР размерами $4 \times 4 \times 6$ мм³ был использован несимметричный трехзеркальный резонатор с областью острой фокусировки вблизи выходного дихроичного зеркала 3. В экспериментах использовалось дихроичное зеркало с коэффициентом отражения 26% на основной частоте и 98% на частоте второй гармоники.

Зеркала 3 и 2 – вогнутые с радиусами кривизны 50 и 300 мм соответственно, зеркало 1 – плоское. Все подложки зеркал – клиновидные. Расстояние между зеркалами 1 и 2 выбрано равным 1210 мм, между 2 и 3 – 210 мм, что соответствует середине области устойчивости. При этом радиус перетяжки составляет $w = 60$ мкм; расстояние от перетяжки до дихроичного зеркала – 48 мм; характерная длина перетяжки $z = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = 1$ см. Для селекции низшей поперечной моды вблизи зеркала 2 установлена переменная диафрагма с минимальным диаметром 0.6 мм.

В качестве активного элемента использовался $Nd:YAG$ стержень размерами $\phi 6 \times 60$ мм. Лазер работал в импульсном режиме с частотой повторения 1 Гц. Энергия накачки регулировалась и составляла приблизительно 40 Дж. Для стабилизации излучения и генерации ультракоротких импульсов применена система внешней оптоэлектронной отрицательной обратной связи. Использован внутррезонаторный затвор, состоящий из ячейки Поккельса на основе кристалла DKDP размерами $8 \times 8 \times 20$ мм³ (продольный электрооптический эффект) и многослойного поляризатора, установленного под углом, немного превышающим угол Брюстера. Полуволновое напряжение составляло 4.8 кВ при двух проходах через кристалл. В качестве управляющего полупроводникового элемента, фототок которого заряжает емкость ячейки, использована многокомпонентная кремниевая высоковольтная структура с предельным напряжением ≥ 3 кВ [4]. Применена схема управления на основе простейшего релаксатора, аналогичная [5]. Для управления используется прошедшее через зеркало 3 излучение на длине волны 1.06 мкм. Световой пучок коллимируется линзой с фокусным расстоянием 40 мм, проходит через поворотную призму и, отразившись от зеркала, попадает на полупроводниковый элемент оптоэлектронной системы управления. Передвигая призму, можно было менять величину оптической задержки, подбирая ее таким образом, чтобы обеспечить оптимальный режим синхронизации мод.

Энергия излучения измерялась калориметром ИМО-2. Форма импульсов регистрировалась на экране запоминающего осциллографа С8-12 с помощью быстрого кремниевого pin-диода и фиксировалась на фотопленку. Для исследования тонкой временной структуры излучения и измерения длительности отдельных импульсов использовалась электронно-оптическая камера с линейной разверткой "Агат-СФЗМ". Была применена специальная система синхронизации, которая давала возможность выделять излучение из разных мест цуга в диапазоне задержек 1 – 100 мкс при нестабильности синхронизации ± 150 пс. Это позволяло регистрировать излучение в каждой вспышке лазера на максимальной скорости развертки "Агат-СФЗМ" при предельном временном разрешении 2 пс.

Эксперименты, выполненные при отключенной системе отрицательной обратной связи, показали, что в зависимости от величины фазового набега между основным излучением и излучением второй гармоники на пути кристалл КТР – дихроичное зеркало и подстройки угла синхронизма, удавалось получать цуги ультракоротких импульсов, существенно отличающиеся как по форме огибающей, так и по длительности отдельных импульсов. Эффект стабилизации излучения устойчиво наблюдался (необходима

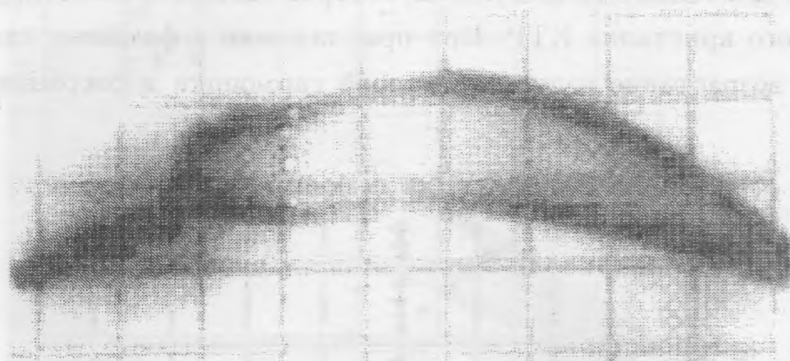


Рис. 2. Цуг импульсов в режиме стабилизации. Внешняя отрицательная связь отключена. Цена деления 0.5 мкс/дел.

угловая подстройка), когда величина расстояния между кристаллом КТР и дихроичным зеркалом составляла 45 – 60 мм. При увеличении расстояния свыше 65 мм стабилизация не достигалась. В режиме самосинхронизации мод при задержке 65 – 75 мм генерировались цуги ультракоротких импульсов с колоколообразной формой огибающей длительностью 200 – 300 пс. Длительность отдельного импульса была на уровне 40 – 60 пс. При стабилизации длительность огибающей многократно увеличивалась, наблюдался характерный срез вершины. Вид такого цуга показан на рис. 2. Максимальная длительность цуга импульсов составляла 4 – 5 мкс, а длительность отдельного импульса сокращалась до 15 – 40 пс. Режим самосинхронизации имел статистический характер, воспроизводимость цугов не достигалась. Вероятность генерации одиночного на аксиальном интервале импульса не превышала 60%. Эксперименты, выполненные с использованием внешней отрицательной обратной связи, которая обеспечила высокую воспроизводимость параметров излучения, позволили детально проследить процесс сокращения длительности импульса в режиме стабилизации, показали возможность достижения ее предельного значения.

Настройка лазерной системы производилась в следующей последовательности. Вначале в отсутствие кристалла КТР подбиралась оптическая задержка и за счет действия сдвинутой во времени отрицательной обратной связи осуществлялся режим самосинхронизации мод. Длительность импульса при оптимальной задержке составляет 150–200 пс. Далее устанавливается кристалл КТР, а величина задержки увеличивается на приращение оптического пути в кристалле. Следует отметить, что при внесении сильно расстроенного из условий синхронизма кристалла наблюдалось многократ-

ное увеличение длительности импульсов, которое связано с селективирующим действием непросветленного кристалла КТР. При приближении к фазовому синхронизму происходило резкое возрастание излучения второй гармоники и сокращение длительности импульсов.

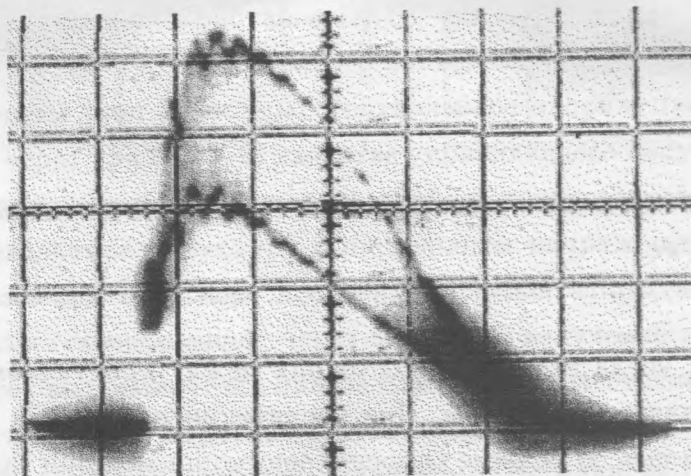


Рис. 3. Цуг импульсов. Расстояние от кристалла КТР до диэлектрического зеркала 6.5 см. Цена деления 20 мкс/дел.

В условиях, когда стабилизация не достигается, максимальное сокращение длительности реализовывается при уменьшении чувствительности цепи отрицательной обратной связи (и увеличении средней мощности) до предельного значения, соответствующего возникновению самомодуляции огибающей на вершине цуга. Дальнейшее незначительное уменьшение чувствительности приводит к развалу огибающей на отдельные импульсы микросекундной длительности. Лучший результат в этом случае – генерация длинных (60 мкс) гладких цугов ультракоротких импульсов длительностью 30 – 40 пс. Причем минимальная длительность реализуется вблизи максимума огибающей. Вид такого цуга представлен на рис. 3.

Установка кристалла в положение, в котором без отрицательной обратной связи генерировались микросекундные цуги импульсов, позволила реализовать дополнительную стабилизацию излучения. При этом удавалось значительно снизить чувствительность цепи отрицательной обратной связи без развала огибающей. Характерный вид огибающей цуга показан на рис. 4.

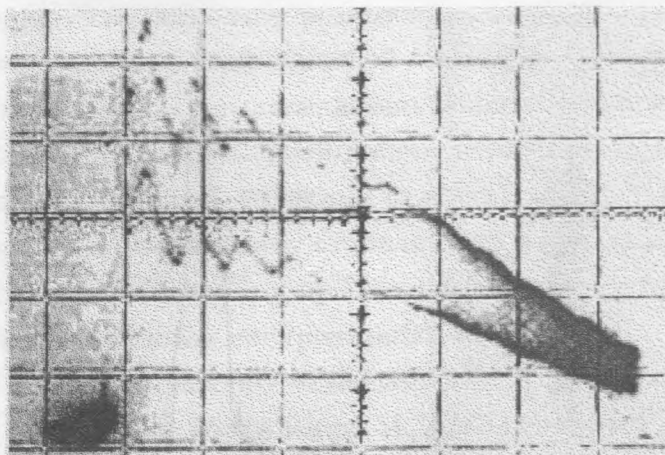


Рис. 4. Режим дополнительной стабилизации. Цена деления 10 мкс в клетке.

На начальном этапе формируется гладкая огибающая. В момент времени, когда пуг, полученный в условиях без стабилизации, претерпевает развал, наблюдается быстрый рост до конечного значения интенсивности, переходной процесс и установление на новом уровне мощности. Затем, когда интенсивность падает ниже определенного уровня, происходит второе переключение и образуется резкий задний фронт пуга импульсов (рис. 4). Максимальная длительность, измеренная между моментами переключений, составила 60 мкс. Воспроизводимость таких пугов была практически 100%. Усредненная по пугу мощность излучения второй гармоники, прошедшей через зеркало 2, коэффициент отражения которого на длине волны 0.53 мкм был менее 6%, составила 5 – 7 Вт.

Детальные измерения временной структуры импульса проводились на длине волны 1.064 мкм. На входную щель камеры "Агат-СФЗМ" направлялся пучок света, отраженного от поляризатора. Измерения показали, что после начального этапа формирования длительностью порядка 5 мкс, на аксиальном интервале генерировался одиночный импульс. Сразу после первого переключения длительность импульса составляет 40–50 нс.

Во время установления возможно возникновение крыльев и тонкой временной структуры импульса. В дальнейшем импульс становится гладким и бесструктурным, а его длительность монотонно уменьшается. Минимальная длительность зарегистрирована за 5 – 10 мкс до момента второго переключения. Без учета конечного временного разрешения камеры она составила 6 ± 1.3 нс. Фотография с экрана камеры "Агат-СФЗМ" и соответствующая ей микроденситограмма почернения представлена на рис. 5. Оценка длительности гауссова импульса, спектр которого ограничен пропусканием поляриза-

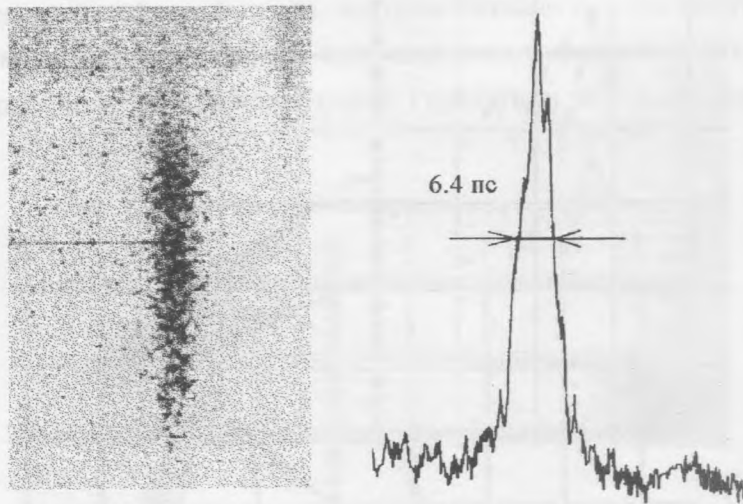


Рис. 5. Фотография с экрана камеры "Агат-СФЗМ" и соответствующая ей микроденситограмма импульса минимальной длительности.

ционного фильтра, образованного кристаллом КТР, в комбинации с конечной шириной линии усиления активной среды (вблизи момента второго переключения достигалось более чем пятикратное усиление) дает не менее 4.5 пс . Таким образом, режим стабилизации позволил достигнуть почти предельную в условиях эксперимента длительность импульса.

Обнаруженный эффект стабилизации мощности излучения, который никак не свойственен режиму пассивной самосинхронизации мод, позволяет сделать вывод о реализации механизма формирования ультракороткого импульса, отличного от механизма действия нелинейного зеркала, предложенного в [1]. На наш взгляд, реализованный в экспериментах режим по механизму близок к режиму нелинейной фазовой самосинхронизации мод за счет применения внутррезонаторной малоинерционной Керровской среды и быстрого насыщающегося поглотителя, роль которых играл кристалл КТР. Новые свойства этого элемента нелинейного зеркала, по нашему мнению, связаны с возникновением эффективного нелинейного показателя преломления при генерации второй гармоники в условиях небольшой отстройки от угла фазового синхронизма [6], которое приводит к нелинейной фазовой самомодуляции импульса. При взаимодействии такого импульса со спектральным фильтром происходит уменьшение длительности и изменение формы. Существенно, что потери энергии импульса в этом случае зависят от спектрального уширения импульса, вызванного самомодуляцией, и увеличиваются с ростом

мощности излучения. Это позволяет реализовать стабилизацию лазерного излучения за счет внутренней отрицательной обратной связи. Роль нелинейного зеркала сводится к устранению характерных крыльев, возникающих при прохождении спектрального фильтра импульсом света с нелинейной самомодуляцией фазы. Положительная связь, присущая нелинейному зеркалу, в режиме стабилизации подавляется отрицательной. Отметим, что в дополнение к эффекту стабилизации в пользу предложенной модели генерации свидетельствует и близкая к предельной длительность импульса, характерная для режима нелинейной фазовой синхронизации мод [7].

В заключение авторы выражают благодарность Н. А. Борисевичу, В. А. Петухову и А. В. Масалову за полезные обсуждения, М. А. Семенову и Г. Г. Дьяченко за помощь в обработке результатов.

Работа частично поддержана Федеральной Программой "Интеграция" (проект АО133), ФЦП, подпрограмма "Физика квантовых и волновых процессов" проект N 108-01 (00-п), грантами РФФИ N 00-02-17060 и N 00-02-16419.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Stankov K. A., Jethwa J. Opt. Comm., **66**, no. 1, 41 (1988).
- [2] Buchvarov I., Satiel S., Gagarskii S. Opt. Comm., **118**, no. 1-2, 51 (1995).
- [3] Cerullo G., Danailov M. V. et al. Appl. Phys. Lett., **66**, no. 19, 2392 (1994).
- [4] Gorbunov M. V., Vorchik D. B. CLEO/Europe'96, CтН161, p. 282.
- [5] Горбунков М. В., Ворчик Д. Б. МФТИ, Москва, 1994, с. 123-127.
- [6] Островский Л. А. Письма в ЖЭТФ, **5**, вып. 9, 331 (1967).
- [7] Von der Linde D. and Malvezzi A. M. Appl. Phys. B, **37**, 1 (1985).

Поступила в редакцию 20 декабря 2000 г.