

# ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

## С АКТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

**Н**есмотря на достигнутый в последнем десятилетии прогресс в развитии фемтосекундных источников света, пикосекундные импульсные лазеры с активной синхронизацией мод и управлением добротностью резонатора остаются наиболее мощными и недорогими источниками ультракоротких световых импульсов (УКИ).

Ограничения на длительность импульсов, присущие лазерам с активной синхронизацией мод, и прогресс в развитии фемтосекундных лазеров снижают интерес к ним в приложениях, связанных со спектроскопией высокого разрешения и прецизионной метрологией. Они, однако, широко применяются как источники накачки для нелинейных преобразователей частоты излучения, перестраиваемых лазеров и усилителей фемтосекундных импульсов.

Надежность и воспроизводимость режима генерации таких лазеров является неопределимым преимуществом при их использовании в различных технологических процессах. Хотя источники УКИ пока еще не нашли широкого применения, но в сфере микрообработки и нанотехнологий сегодня применяются исключительно фемто- и пикосекундные импульсы света.

Реализация высокого уровня воспроизводимости УКИ (от вспышки к вспышке) по энергии и длительности, как основного критерия применимости лазерного источника для исследовательских и технологических целей, осложняется (при импульсной накачке) нестационарностью процесса формирования УКИ. Известно, что для получения идентичной формы УКИ в лазерах с активной синхронизацией мод требуется, чтобы импульс прошел по резонатору несколько сот раз, тогда как для развития процесса генерации (при быстром включении добротности) достаточно совершить 10–20 проходов по резонатору.

Для разрешения такого противоречия наиболее эффективно использовать процесс предгенерации, управляемый по цепи отрицательной обратной связи (ООС). Управление добротностью резонатора с помощью ООС дает возможность поддержать состояние предгенерации (при сохранении высокой амплитудной стабильности и воспроизводимости динамики процесса) на интервале времени порядка 100 мкс, несмотря на нестационарный характер накачки активной среды с помощью импульсной лампы [1,2]. При включении полной добротности резонатора в произвольный, в пределах этого интервала, момент времени (после эффективного усиления импульса) его длительность практически повторяет значение, достигнутое в процессе предгенерационного формирования к моменту включения управления добротностью. Таким образом, открывается возможность формирования УКИ (с повторяемыми параметрами, что решает проблему воспроизводимости) в произвольный, в пределах длительности предгенерации, момент времени. При этом момент генерации имеет детерминированную задержку относительно внешнего синхроимпульса и джиттер, принципиально ограниченный периодом межмодовых биений резонатора.

Этим, однако, не исчерпывается возможность временной привязки УКИ к внешним сигналам и процессам. Дело в том, что активная синхронизация мод предполагает наличие радиочастотного сигнала, управляющего синхронизатором

мод. Таймер, построенный на основе этого сигнала, позволяет полностью детерминировать временную диаграмму работы лазера и формировать управляющий синхроимпульс, привязанный по времени к выходному УКИ с джиттером порядка 0,1 нс при практически произвольном опережении или запаздывании относительно оптического УКИ. Более того, использование общего радиочастотного сигнала для двух или нескольких лазеров позволяет синхронизировать излучаемые ими импульсы с точностью 10–20 пс [3]. Это открывает уникальную возможность надежной временной привязки выходных импульсов к внешним процессам, привлекательную с точки зрения включения таких лазеров в большие экспериментальные комплексы – системы с синхронным детектированием фотоиндуцированных процессов – и делает их полезными в различных областях применения, включая диагностику плазмы, создание лазерных инжекторов для ускорителей и т. д.

Отмеченные достоинства лазеров с активной синхронизацией мод реализованы в разработанном компанией "ЛОТИС ТИИ" лазере LS-2151. Построенный по принципу МОРА (Master Oscillator/Power Amplifier – задающий генератор/усилитель мощности), он состоит из задающего лазерного генератора с активной синхронизацией мод, управлением добротностью и

выводом одиночного импульса непосредственно из резонатора лазера, а также содержит двухпроходный усилитель и встроенный генератор второй гармоники излучения.

В задающем генераторе формирование импульса происходит в режиме предгенерации, использующем петлю ООС для стабилизации. После включения режима полной добротности происходит быстрое (за 10–15 проходов по резонатору) усиление импульсов до энергии 1–2 мДж. Затем сформированный и усиленный одиночный импульс длительностью порядка 70 пс выводится из резонатора и направляется в двухпроходный усилитель, который доводит его энергию на выходе до 100 мДж (в зависимости от уровня накачки усилителя). Отметим, что достаточно высокая энергия выхода у задающего генератора не требует регенеративного усиления импульса, так как уровень интенсивности насыщения достигается уже за два прохода через активную среду.

Оценка уровня джиттера фронта оптического импульса (относительно управляющего электрического синхроимпульса) проводилась по осциллограмме, полученной в результате накопления измерений в течение трех минут при частоте повторения импульсов 15 Гц (рис.1). Синий луч на осциллограмме соответствует переднему фронту синхроимпульса, используемому для запуска осциллографа. Прописи ширины лучей (вместе с подгонкой гауссовой функцией) показаны ниже. Полуширина луча синхроимпульса характеризует джит-

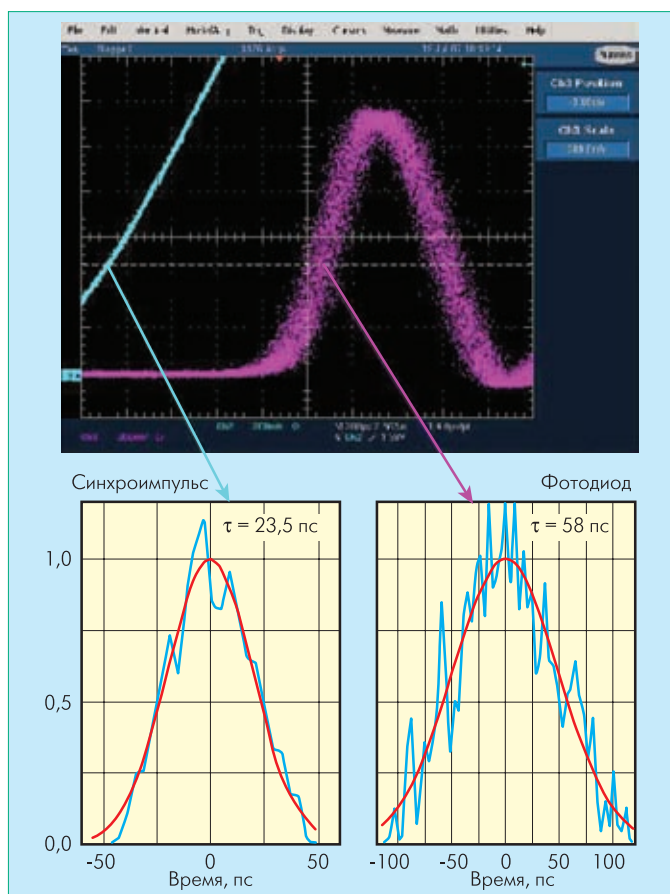
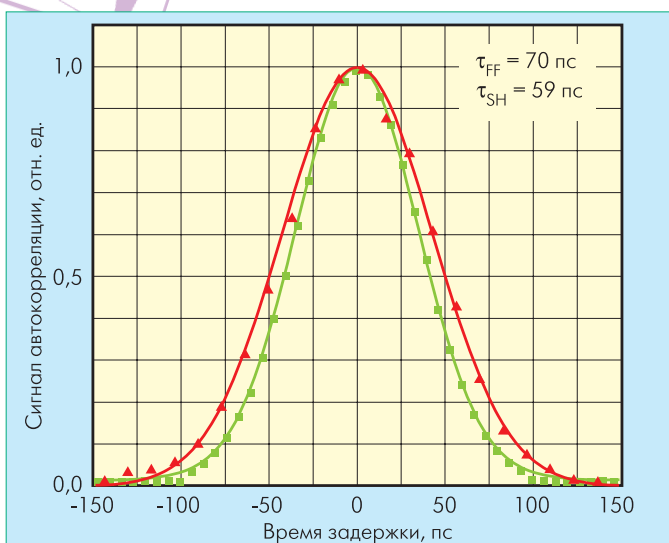


Рис. 1 Вид синхроимпульса и сигнала фотодиода, размытого джиттером



**Рис. 2** Автокорреляционные функции УКИ основной частоты и второй гармоники

тер генератора развертки осциллографа. Ширина луча сигнала фотодиода  $\tau_{phd}$  (красный луч на рис.1) определяется джиттером генератора развертки  $\tau_{trig}$  и джиттером (относительно синхроимпульса) генерируемого оптического импульса –  $\tau_{opt}$  как  $\tau_{phd}^2 = \tau_{trig}^2 + \tau_{opt}^2$ .

Таким образом, графики, приведенные на рис.1, дают оценку:  $\tau_{opt} \approx 53$  пс. Эта оценка говорит о возможности достаточно точно синхронизировать "стрик-камеру" или другую регистрирующую аппаратуру с помощью управляющего синхроимпульса. Приведенные оценки хорошо согласуются с более корректными измерениями джиттера, выполненными ранее для подобных лабораторных систем с помощью кросс-корреляционных методов [3].

Встроенный генератор второй гармоники обеспечивает энергию импульса до 60 мДж при сокращении длительности импульса до 59 пс. Автокорреляционные функции УКИ основной частоты и второй гармоники приведены на рис. 2. Лазерный излучатель имеет три выходных канала: для основной частоты,

второй гармоники и их смеси. Смешанный канал, в котором поляризации излучения основной и удвоенной частоты взаимно ортогональны, может использоваться для генерации третьей и пятой гармоник. При использовании приставок-преобразователей частоты компании "ЛОТИС ТИИ" в высших гармониках были получены следующие уровни энергии: до 30 мДж в третьей, до 20 мДж в четвертой и более чем 3 мДж в пятой гармониках.

Известно, что поглощение ультрафиолетового излучения в нелинейном кристалле генератора четвертой гармоники приводит к изменению угла фазового синхронизма, зависящего от уровня интенсивности падающего излучения. Поэтому для генерации четвертой гармоники разработана приставка ("автотреккер"), имеющая встроенные детекторы входного и выходного излучений и обеспечивающая автоматическую настройку фазового синхронизма в кристалле с помощью программной петли обратной связи, обрабатывающей сигналы фотодетекторов и управляющей приводом поворота кристалла. Такая приставка может с успехом использоваться для удвоения частоты перестраиваемых лазеров.

Управление лазером LS-2151 осуществляется контроллером через компьютерную программу. Кроме управления лазером контроллер обрабатывает сигналы фотодетекторов, встроенных в излучатель, а также обеспечивает возможность подключения "автотреккера" или автокоррелятора (они могут входить в комплект поставки лазера).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Zaporozhchenko V.A. Feedback timing approach to the pulse energy stabilization in the actively mode locked laser. – Proc. SPIE, 1998, vol.3682, p.170–173.
2. Запороженко В.А. Эволюция длительности и формы УКИ при активной синхронизацией мод. – Квантовая электроника, 2003, т.33, №11, с.1009 – 1014.
3. Запороженко В.А., Тылец Н.А. Временная привязка оптических импульсов к внешнему сигналу в импульсных лазерах с активной синхронизацией мод. – Квантовая электроника, 1996, т.26, №6, с.527–531.