

ТЕХНИКА ПЕРЕСТРОЙКИ ЛАЗЕРОВ

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ВОЛН ОТ УЛЬТРАФИОЛЕТА ДО ИНФРАКРАСНОГО СВЕТА

Многие типы лазеров проектируются так, чтобы дать возможность оператору перестраивать или изменять по требованию выходную длину волны в широком диапазоне спектра излучения: от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК).

Перестройку выходной длины волны лазера можно реализовать в достаточно широком диапазоне. Обычно это делается автоматически под управлением компьютера. Приложения, для которых это требуется, можно разделить на две основные категории. В первой из них это делается в случае, если нужно получить одну или несколько отдельных длин волн, которые нельзя получить от какого-то одночастотного или многочастотного лазера. Во второй – характерным является случай, когда нужно получить волну, непрерывно перестраиваемую в процессе эксперимента или испытания, как, например, в спектроскопии или в экспериментах с лазерным зондированием.

Существует ряд типов перестраиваемых лазеров, включающих непрерывные и импульсные (наносекундные, пикосекундные и фемтосекундные) лазеры, работающие с использованием различных лазерных сред. Хотя перестраиваемые лазеры могут быть реализованы различными способами, они имеют две общие особенности – среду, которая может создавать непрерывное излучение волн в широком диапазоне, и оптические элементы, позволяющие выделить определенную длину волны или полосу длин волн в этом диапазоне. Данная статья [1] объясняет функционирование некоторых наиболее общих типов перестраиваемых лазеров, доступных сегодня.

НАНОСЕКУНДНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ

Импульсные лазеры на красителях относятся к типу наиболее концептуально простых перестраиваемых лазеров. В общем случае среда генерации этих лазеров представляет собой кювету флуоресцирующего раствора красителя. Этот краситель оптически накачивается лазером, работающим на фиксированной длине волны. Им может быть, например, неодимовый Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности (с длиной волны 532 или 335 нм), эксимерный лазер (308 нм) или азотный лазер (337 нм). В зависимости от частоты повторения и выходной мощности лазера накачки краситель в кювете циркулирует под действием каждого импульса из охлажденного резервуара в свежерелаксированный краситель.

Ячейка с красителем находится в резонаторной полости, которая формируется устройством вывода излучения и дифракционной решеткой (а не обычным задним зеркалом с высокой отражающей способностью). Эта связка работает как избирательный отражатель – только одна длина волны эффективно отражается назад в резонансную полость. Для максимизации эффекта действия решетки и минимизации ширины полосы спектра выходной длины волны важно, чтобы лазерный пучок покрывал достаточно большую площадь данной решетки (рис.1).

Лазеры на красителях обычно используют одну из двух схем построения. В схеме Литтмана дифракционная решетка располагается под углом скольжения к падающему световому лучу, а в конце резонаторной полости используется зеркало с высокой отражательной способностью. В схеме Литтроу, напротив, используется призменный телескоп для распределения луча по поверхности решетки, которая действует и как окончательное зеркало. В некоторых лазерах, таких как лазеры на красителях компании Spectra-Physics (Sirah), обе эти схемы объединяются в схему с двойной решеткой, позволяющей достичь ширины линии излучения порядка $0,03 \text{ см}^{-1}$.

Выходной луч генератора обычно усиливается в одной или нескольких ячейках с красителем. На практике только 10–20% мощности лазера накачки используется для возбуждения генератора; остальная мощность используется для накачки усилительных каскадов. Ячейки усилителя обычно не имеют оптики для формирования резонаторной полости и являются каскадами однопроходного усиления, которые лазерный пучок проходит только один раз.

Применяя различные красители и неодимовый Nd:YAG-лазер накачки, обеспечивающий длину волны накачки 532 или 355 нм, от лазеров на красителях можно получить диапазон перестройки порядка 380–1500 нм, тогда как обычно один краситель перестраивается не более чем на несколько десятков нанометров. Непрерывные улучшения схем генераторов позволяют достичь ширины линии излучения порядка $0,03 \text{ см}^{-1}$. Энергия выходного пучка при этом может быть более 250 мДж.

Длительность выходного импульса и частота его повторения зависят от лазера накачки. Типовыми считаются частоты повторения в диапазоне 10–100 Гц при длительности выходного импульса порядка 10 нс. Такая малая длительность и большая энергия импульса означают, что выходная последовательность может быть эффективно сдвинута в другой диапазон длин волн путем использования техники нелинейных преобразований, такой как удвоение частоты, рамановский сдвиг и разностные смешения. Эти преобразования позволяют расширить диапазон выходного сигнала от глубокого

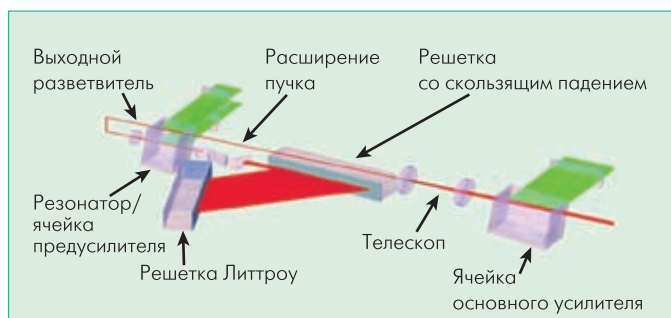


Рис. 1 Схема импульсного лазера на красителях: могут использоваться несколько оптических схем или их комбинации, чтобы луч наиболее полно покрывал решетку

ультрафиолета до средней ИК-области (вплоть до 3,6 мкм).

Как правило, эти типы лазеров применяются для фотохимического зондирования, в экспериментах с томпсоновским рассеянием в физике высоких энергий и дистанционным атмосферным зондированием. Особенно интересным приложением является планарная лазерно-индуцированная флуоресценция (PLIF), которая используется сегодня производителями печей и двигателей внутреннего сгорания для диагностики процессов горения.

НАНОСЕКУНДНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Оптические параметрические генераторы (ОПГ) появились как твердотельная альтернатива перестраиваемым лазерам на красителях. Работа ОПГ основана на нелинейных оптических процессах, называемых параметрическим преобразованием с понижением частоты. В нелинейных кристаллах определенного типа, например LBO (борат лития) и BBO (метаборат бария), входной фотон преобразуется в пару фотонов меньшей энергии, называемых сигнальным и холостым фотонами, суммарная энергия которых равна энергии исходного фотона (рис.2). По определению энергия сигнального фотона больше энергии холостого фотона.

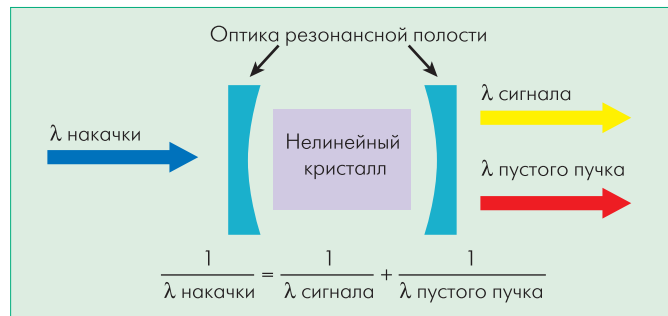


Рис.2 Схема параметрического преобразования с понижением частоты: фотон высокой энергии, пройдя через нелинейный кристалл, преобразуется в два фотона с меньшей энергией

Этот процесс формирует сигнал на выходе только тогда, когда удовлетворяются фазовые соотношения для волновых векторов. Если это имеет место, то для заданной длины волны, при определенных температуре кристалла и угле падения пучка, может генерироваться только одна сигнальная (холостая) длина волны. Изменяя угол падения и/или температуру кристалла, можно получить перестраиваемую длину волны на выходе. Генерируя сигнальные или холостые гармоники более высокого порядка или разностные частоты при смешении сигнальных и холостых лучей можно сформировать существенно более широкий спектральный диапазон генерации, используя один ОПГ или оптический параметрический усилитель (ОПУ). Этот диапазон может простирается от ближнего ультрафиолета до средней ИК-области.

Обычно наносекундный ОПГ накачивается третьей гармоникой (355 нм) от неодимового Nd:YAG-лазера. Простейший вариант ОПГ состоит из мощного генератора, использующего неустойчивую резонаторную полость, которая поддерживает высокий уровень усиления, высокую добротность моды и низкую расходимость выходного пучка. В таком варианте характеристики выходной длины волны полностью определяются углом фазового синхронизма (и температурой) кристалла, что приводит к спектральной ширине в несколько десятков волновых чисел при длине волны порядка 500 нм.

Согласно последним данным компании Spectra-Physics, лазер на красителях, оснащенный блоком смещения (формирующим разностные частоты) и ОПУ, позволяет расширить диапазон перестройки вплоть до ИК-области: высокое разрешение было получено вплоть до 5,6 мкм при использовании формальдегида и до 6,5 мкм при использовании ацетилфенилаланина-О-метила.

Для формирования узкополосного спектра импульсов большинство коммерческих систем применяют дифракционные решетки. Такие системы поставляются с мастер-ОПГ (МОПГ). В них часть накачки используется для накачки мастер-ОПГ, в котором встроена дифракционная решетка на месте общего зеркального отражателя. Полученный в результате узкополосный выход используется как источник для мощного генератора. Оба генератора обычно размещены в одной компактной головной части. Компьютерное управление обеспечивает полностью автоматическую перестройку в диапазоне 440–700 нм (сигнальный луч) и 710–1850 нм (холостой луч). В такой конфигурации выход МОПГ имеет ширину спектра импульса порядка $0,075 \text{ см}^{-1}$. Компьютер устройства осуществляет также настройку угла падения света на дополнительные кристаллы, используемые в схеме удвоения частоты для сдвига длины выходной волны МОПГ.

Наносекундные МОПГ используются во многих приложениях, в которых раньше использовались лазеры на красителях. Примечательно их использование в когерентной антистоксовой рамановской спектроскопии, которая применяется как метод выборки отдельных состояний молекул, имеющий большое отношение сигнал/шум.

НЕПРЕРЫВНЫЕ ТИ-САФИРОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ

В течение 1970-х и 1980-х годов приложения, требующие перестраиваемого выхода непрерывного лазерного излучения, использовали струйные лазеры на красителях, накачиваемые аргоновыми лазерами. Эти лазерные системы с ионной накачкой, хотя и давали очень узкую линию излучения, имели ряд недостатков и были трудны в управлении. В 1987 году появились Тi-сапфировые лазеры, которые стали хорошей альтернативой лазерам на красителях для многих приложений. В 1996 году компания Spectra-Physics выпустила лазеры

типа Millennia – твердотельные лазеры с накачкой зеленым светом, которые стали надежной и малошумящей альтернативой лазерам с аргон-ионной накачкой. Это привело к появлению перестраиваемых твердотельных лазерных систем.

Сегодня перестраиваемые непрерывные лазеры выпускаются как в варианте лазеров на красителях, так и в варианте Тi-сапфировых лазеров, причем используются две основные конфигурации резонаторов: резонатор со стоячей волной и кольцевой лазерный резонатор.

Непрерывные лазеры со стоячей волной

Первый тип резонатора со стоячей волной можно проиллюстрировать на модели 3900S (рис.3) компании Spectra-Physics. Тi-сапфировый лазер этой модели – система, которая генерирует излучение, состоящее из множества продольных мод резонатора. Сапфировый кристалл, легированный титаном, как основной усилительный элемент, смонтирован в охлаждаемой водой башне и обеспечивает усиление длин волн в диапазоне от 675 до 1130 нм, если используется зеленый луч накачки лазера DPSS Millennia.

В стоячей волне резонатора непрерывного лазера, показанного на рис.3, настройка длины волны осуществляется пассивными элементами, стабилизирующими длину волны. Первым из них является двулучепреломляющий фильтр, состоящий из ряда пластин, или фильтр Лيو (Lyot), который монтируется внутри полости под углом Брюстера, чтобы минимизировать потери на отражение. Этот элемент модулирует спектральное усиление лазерной полости, обеспечивая высокий коэффициент передачи в определенном диапазоне длин волн в пределах кривой спектрального усиления. Лазер вынужден работать на определенной длине волны, которая может изменяться путем вращения двулучепреломляющего фильтра (обозначаемого часто как BiFi). Выход такого типа лазера имеет ширину линии излучения меньше 40 ГГц (FWHM), или $<1,5 \text{ см}^{-1}$. Добавляя эталон внутрь резонатора, можно достичь уменьшения ширины линии до величины $<1 \text{ ГГц}$.

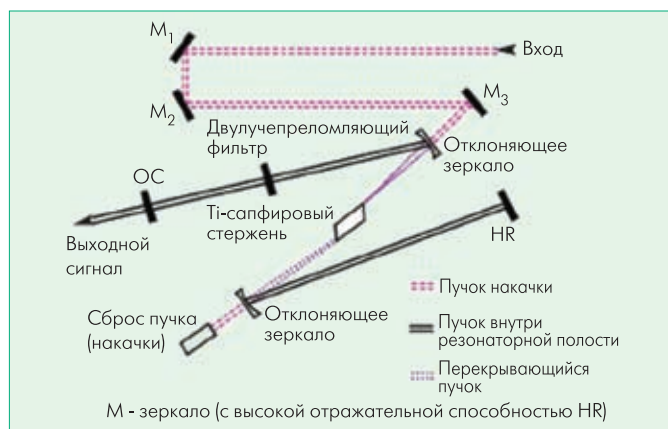


Рис.3 Схема непрерывного Тi-сапфирового лазера модели 3900S компании Spectra-Physics. Перестройка длины волны управляется двулучепреломляющим фильтром

Непрерывные кольцевые лазеры

Другая основная конфигурация перестраиваемого резонатора непрерывного типа – кольцевой лазер. Кольцевые лазеры применялись, начиная с 1980-х годов, для того, чтобы добиться перестройки непрерывного излучения, используя только одну продольную моду резонатора (так называемое одночастотное излучение) в спектральной полосе, доступной в субмегагерцевой области. Сначала эти лазеры использовали красители в качестве активной среды, сейчас они доступны с активной средой как на красителях, так и на Ti-сапфировом кристалле.

Основное различие между кольцевым лазером и лазером с резонатором со стоячей волной в том, что кольцевой лазер и кольцевая структура позволяют вызвать циркуляцию излучения в резонансной полости, чтобы сформировать однонаправленную бегущую волну. Эта волна благодаря своей природе не ведет к истощению определенной усилительной секции лазерной среды, что повышает готовность полости к работе в одномодовом режиме.

На рис.4 показаны основные элементы кольцевого лазера типа Matisse компании Spectra-Physics с сапфировым кристаллом, легированным титаном в качестве среды усиления. Как видно из рис.4, кольцевые лазеры используют те же селективные элементы для перестройки длины волны, что и лазеры со стоячей волной. То есть кольцевые лазеры также используют двулучепреломляющий фильтр, тонкий и толстый эталоны. Это так называемые пассивные элементы для стабилизации резонансной полости, функция которых – выбрать одну из многих продольных мод, возникающих в усилительной среде.

В схеме лазера типа Matisse, данной на рис.4, кольцевой лазер также оснащен толстым эталоном со скоростным пьезоприводом, петля обратной связи которого гарантирует точное центрирование на выбранной моде резонансной полости.

Что же определяет фактическую ширину полосы выходного луча лазера на выходе в случае пассивно стабилизированного кольцевого лазера? Измеренная эффективная ширина

полосы луча кольцевого лазера будет фактически определяться возникающими механическими перемещениями во времени и вибрацией, хотя точность активно управляемого одночастотного кольцевого лазера достаточно высока.

Существенными для обеспечения постоянства средней по времени длины резонансной полости, а следовательно, и узкополосности спектра выходного луча, являются две особенности схемы проектирования. Первая из них в том, что лазер должен выгружаться для минимизации резонансной вибрации, а также должен быть малочувствителен к паразитным акустическим возмущениям. Вторая особенность, гарантирующая узкополосность излучения, – необходимость использования высококачественных механизмов для активной стабилизации длины полости.

Эффективная пассивная стабилизация кольцевого лазера может обеспечить среднюю ширину выходной спектральной линии в районе нескольких мегагерц. Дальнейшего уменьшения ширины излучения кольцевого лазера можно достичь только введением в полость элементов активной подстройки длины кольцевой полости.

Для достижения сверхузкой спектральной ширины полосы выхода кольцевой лазер обычно использует два типа элементов стабилизации длины резонансной полости: механические зеркала с пьезоприводом, имеющим время отклика в килогерцевом диапазоне, и электрооптический модулятор мегагерцевого диапазона. Фактически в специальных лабораторных конфигурациях можно достичь спектральной ширины полосы в несколько герц.

Ключевым элементом в достижении предельно узкой спектральной ширины выхода кольцевого лазера является внешняя эталонная полость. На рис.4, например, указана внешняя эталонная полость, которая используется лазером типа Matisse для создания "абсолютного" эталонного сигнала, необходимого при формировании длины лазерной полости. Эту внешнюю ячейку можно эффективно термоизолировать от окружающей среды. Ее также можно изолировать механически и акустически, чтобы исключить любые случайно

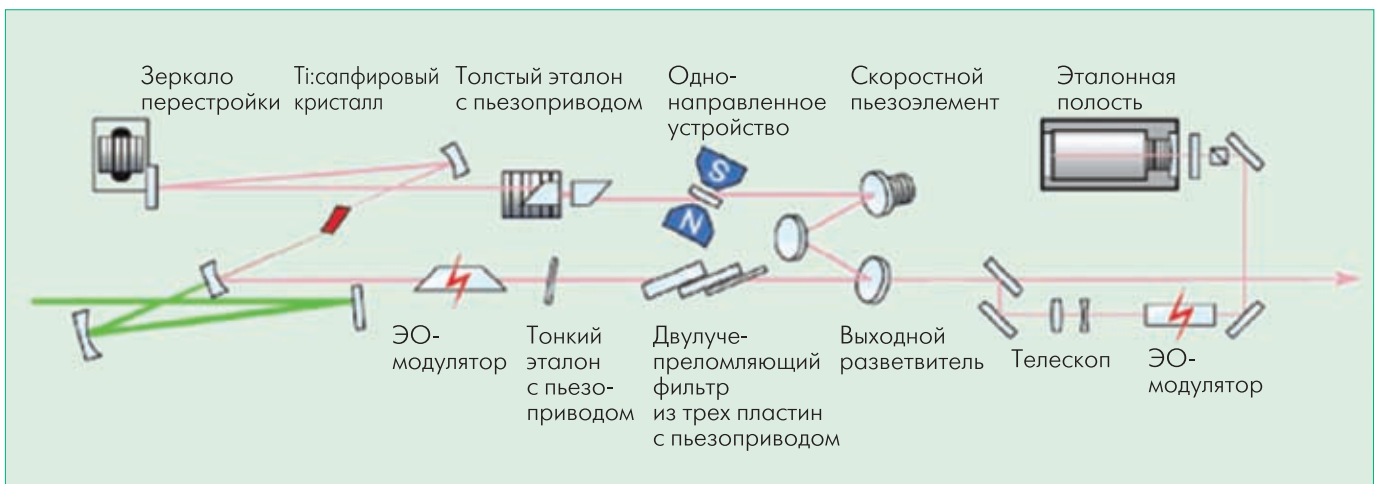


Рис.4 Оптическая схема кольцевого Ti-сапфирового лазера типа Matisse с внешней эталонной ячейкой

возникающие перемещения и возмущения. В идеале эталонная ячейка хорошо изолируется как механически, так и температурно, от собственной полости кольцевого лазера для исключения любой связи между ними.

Для формирования сигнала электрооптической обратной связи от эталонной полости к устройству стабилизации длины резонансной полости лазера используется метод Паунда-Дривера-Холла (Pound-Drever-Hall). Электрооптический (ЭО) модулятор формирует боковые полосы пучка сравнения на том выходе лазера, который подается на эталонную полость. Электронная схема, анализирующая эти боковые полосы, генерирует эффективный сигнал обратной связи, который служит для стабилизации лазерной полости.

Кольцевой лазер можно также использовать вместе с внешней полостью удвоителя частоты, как это сделано в лазерах типа Wave-Train компании Spectra-Physics, для создания излучения, перестраиваемого в УФ-диапазоне: 205–500 нм.

Быстродействующий Тi-сапфировый лазер с синхронизацией мод

Непрерывный лазер, основанный на среде с широкополосным усилением (такой как Тi-сапфир или краситель), может быть лазером с синхронизацией мод, генерирующим поток очень коротких (пикосекундных или фемтосекундных) импульсов. Такие лазеры часто называются сверхбыстродействующими (СБ) лазерами. Как описано в работе [1], синхронизация мод может быть введена путем модуляции усиления лазерной полости с интервалом, соответствующим времени обращения сигнала в этой полости, то есть времени, нужном для прохождения фотоном резонансной полости туда и обратно. Сегодня большинство лазеров с синхронизацией мод являются Тi-сапфировыми лазерами. Синхронизация мод в них может быть достигнута несколькими путями. Одним из них, надежно работающим во всем диапазоне Тi-сапфирово-

го лазера, является использование акусто-оптического (АО) модулятора в качестве высокоскоростного переключателя. Схема такого типа лазера показана на рис.5. Частота повторения импульсов лазера с синхронизацией мод зависит от длины резонансной полости и достигает 80 МГц для широко используемых коммерческих лазеров.

Одним из наиболее важных достижений в этой области была разработка моноблочных Тi-сапфировых лазеров, таких как Mai Tai компании Spectra-Physics. В нем перестраиваемый Тi-сапфировый генератор и твердотельный лазер накачки помещены в одну компактную лазерную головку.

Длительность импульса лазера обратно пропорциональна полосе пропускания, поэтому быстродействующие лазеры, естественно, широкополосны. Например, лазер с шириной импульса 50 фс при длине волны 800 нм имеет ширину спектральной линии порядка 15 нм. Некоторые СБ-лазеры имеют опцию, позволяющую изменять резонансную полость, чтобы сузить спектр выходного импульса за счет увеличения длины импульса. Минимальная достигнутая ширина линии для коммерческого Тi-сапфирового лазера с синхронизацией мод составляет 0,008 нм ($0,1 \text{ см}^{-1}$) при длине импульса 100 пс. Такие лазеры с перестраиваемыми пикосекундными импульсами очень полезны для многих приложений в молекулярной спектроскопии.

СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ОПГ И УСИЛИТЕЛИ

Одним из недостатков Тi-сапфировых лазеров по сравнению с лазерами на красителях является то, что их спектральный диапазон ограничен с одной стороны красной областью, с другой – близкой ИК-областью (<690 нм и >1080 нм). Хотя частоты таких лазеров могут быть удвоены и даже утроены, спектральный диапазон в области видимых и ИК-областей спектра остается недоступным для Тi-сапфировых лазеров и их гармоник. Те же, кому нужен перестраиваемый СБ-выход

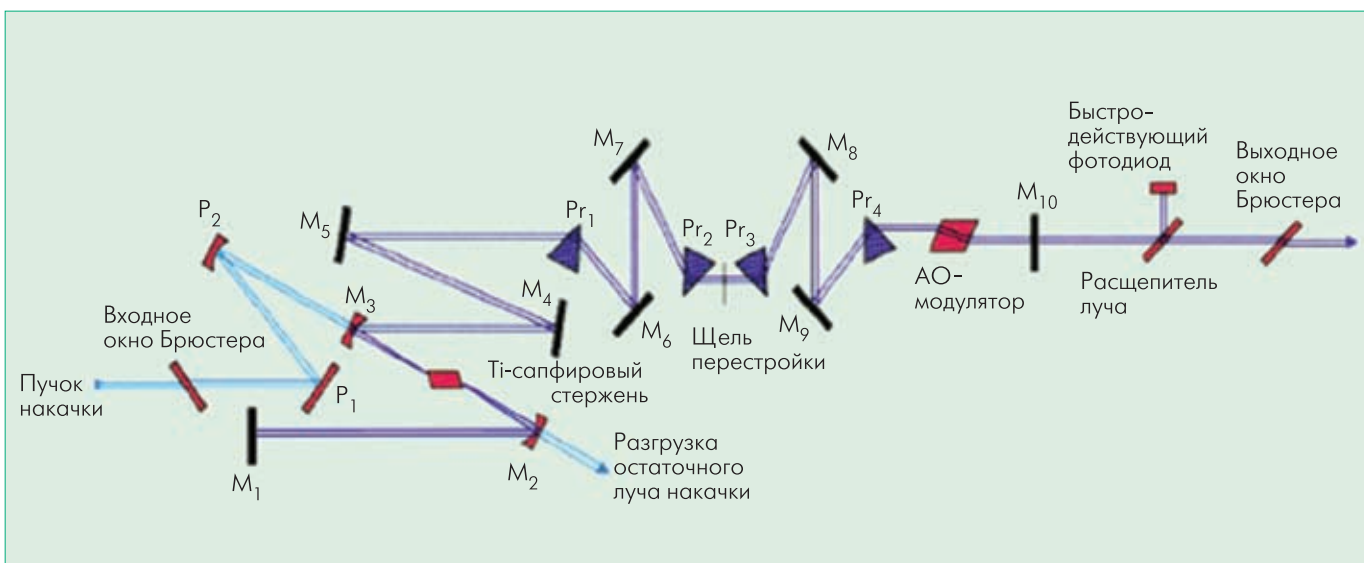


Рис.5 Схема Тi-сапфирового лазера типа Tsunami компании Spectra-Physics. Центральная длина волны перестраивается с помощью щели, перемещающейся между двумя дисперсионными призмами

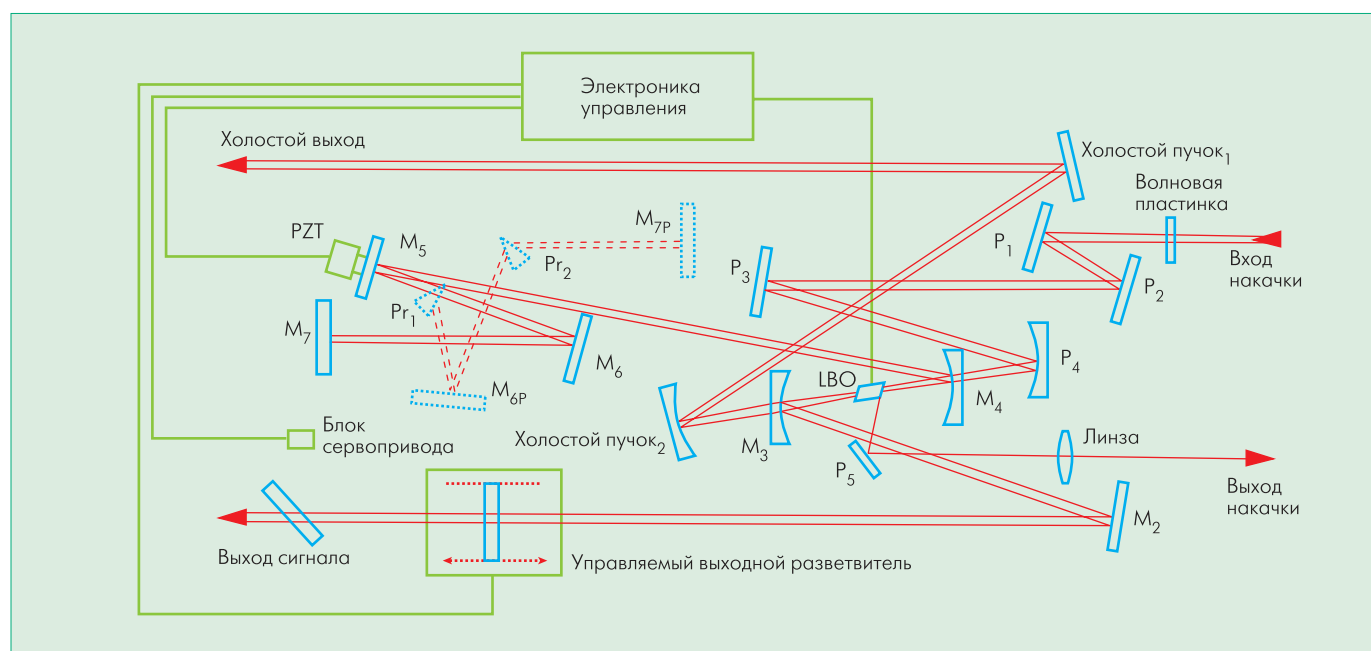


Рис.6 Схема ОПА с синхронной накачкой типа Oral компании Spectra-Physics. Центральная частота меняется путем изменения температуры нелинейного (LBO) кристалла

в этих областях, используют Ti-сапфировый лазер с фиксированной длиной волны для накачки оптического параметрического генератора. Для приложений, требующих больших энергий в импульсе, приходится использовать схему, состоящую из Ti-сапфирового генератора с синхронизацией моды и Ti-сапфирового усилителя для накачки ОПУ.

Принцип работы оптического параметрического СБ-генератора фактически тот же, что и наносекундных устройств, описанных выше, с единственным исключением – синхронизацией. Внутри резонатора СБ-лазера или ОПГ свет представлен короткими импульсами, которые движутся вперед и назад в его границах. Но в отличие от обычного лазера, среда, формирующая перестраиваемый выход, не может сохранять усиление. Кристалл ОПГ может только излучать импульс тогда, когда присутствует импульс накачки. Поэтому для успешного функционирования СБ-ОПГ важно, чтобы импульсы источника накачки приходили к кристаллу точно в тот же момент времени, что и пустые и сигнальные фотоны, циркулирующие в ОПГ-полости. Другими словами, Ti-сапфировый лазер с фиксированной длиной волны и СБ-ОПГ должны иметь одну и ту же частоту повторения импульсов. Этот вариант носит название синхронной накачки. Он требует, чтобы и лазер и ОПГ имели точно такую же длину резонатора.

Типичная схема СБ-ОПГ приведена на рис.6. Активным кристаллом обычно служит LBO. Согласование фаз и длина полости при этом контролируются и управляются автоматически, чтобы можно было выбрать желаемую длину волны и быть уверенным, что время прохода луча этой длины волны осталось тем же самым (80 МГц для Ti-сапфирового лазера накачки). Такой тип ОПГ генерирует сигнальный и холостой выходы в диапазоне длин волн 1,1–2,6 мкм с импульсами шириной 130 фс. Этот выход может быть позднее подвергнут

процедуре удвоения частоты для формирования диапазона перестройки в области видимого света, заполняющего пробел между основным выходом и выходом второй гармоники Ti-сапфирового лазера. Типичными приложениями для таких устройств являются исследования солитонов, СБ-эксперименты типа "накачка-зонд" и колебательная спектроскопия с временным разрешением.

ОПУ (как и ОПГ) использует тот же нелинейный оптический процесс, но так как импульсы накачки имеют большую амплитуду, то для достижения эффективного преобразования длины волны оптического резонатора не требуется. Как показано на рис.7, небольшая часть входного светового пучка фокусируется на сапфировом окне, чтобы сгенерировать континуум белого света. Он используется для того, чтобы подсветить (seed) кристалл ОПУ (обычно ВВО), в котором континуум подвергается однопроходному усилению на сигнальной и пустой длинах волн. Полученный выход, отраженный от зеркала, снова усиливается на втором этапе однопроходного усиления, который использует другую часть того же кристалла ВВО. Центральная длина волны выходного сигнала, как и раньше, управляется условиями фазового совпадения данного кристалла, а ширина полосы спектра в общем случае определяется шириной полосы пучков накачки и подсветки или полосой пропускания кристалла.

При накачке с помощью Ti-сапфирового усилителя этот тип ОПУ может работать в фемтосекундном и пикосекундном диапазонах с импульсами, энергия которых достигает 200 Дж/имп. Длина волны при этом может перестраиваться от 1,1 до 3,0 мкм. Используя возможные режимы конвертации, включая разностное смешение частот, ОПУ может покрыть диапазон длин волн от 300 нм (УФ) до 10 мкм (дальняя ИК-область). Основные приложения таких систем –

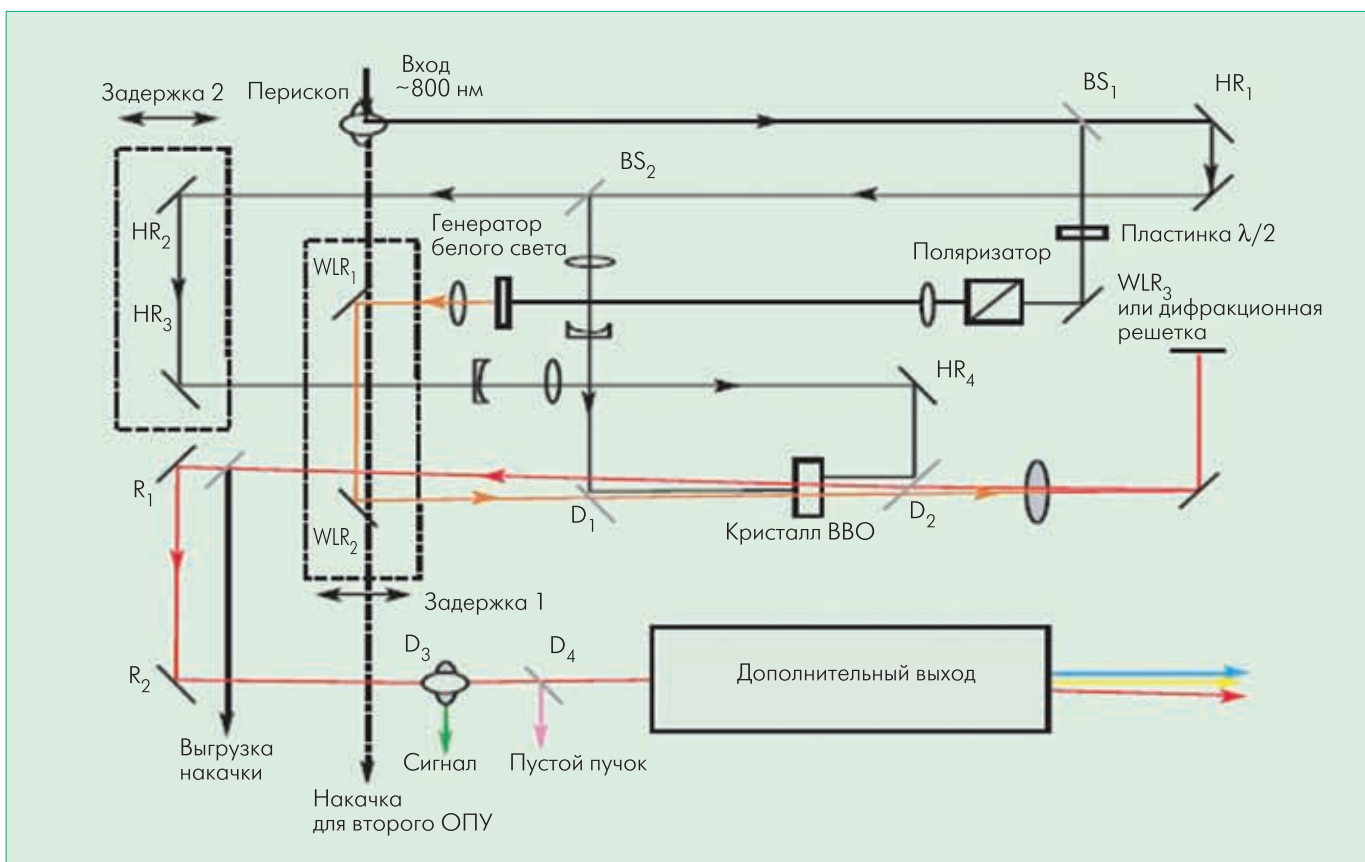


Рис.7 Схема СБ-ОПУ типа OPA-800 компании Spectra-Physics. Часть импульса накачки используется для возбуждения генератора белого света, который подсвечивает нелинейный кристалл (BBO)

сложные системы типа "накачка-зонд", требующие много импульсов различной длины волны, синхронизированных во времени, например при исследовании неустановившегося поглощения с временным разрешением.

СБ-лазеры на красителях с синхронной накачкой

До того, как появились Тi-сапфировые лазеры с синхронизацией мод и ОПГ, исследователи часто применяли лазеры на красителях с синхронной накачкой для получения перестраиваемых фемтосекундных и пикосекундных импульсов. Эти лазеры относились к типу струйных лазеров на красителях с синхронной накачкой импульсами (частотой 76–80 МГц) от коммерческих зеленых СБ-лазеров на красителях.

Такие лазеры первоначально продавались как системы с неодимовыми Nd:YAG-лазерами с ламповой накачкой, формирующими на выходе импульсы с частотным удвоением и длиной волны 532 нм. Однако производители прекратили производство зеленых лазеров с синхронизацией мод несколько лет тому назад. Вместе с тем обладатели лазеров на красителях все еще заинтересованы в поддержании функционирования или в восстановлении работы своих систем. Тому есть две причины. Во-первых, потребители пытаются избежать (при ограниченном бюджете) капиталовложений в новые Тi-сапфировые системы для научных исследований. Во-вторых, многие лазеры на красителях уже достигли области видимого спектра, что требует нескольких преоб-

разований длины волны от СБ-лазерных систем на базе Тi-сапфировых лазеров.

Упомянутые лазеры на красителях обязаны сегодня своим возрождением появлению твердотельных зеленых лазеров. В частности, разработка неодимовых Nd:YVO₄-лазеров с диодной накачкой и пассивной синхронизацией мод позволила обеспечить надежный источник импульсов с синхронизацией мод и длиной волны 532 нм. Фактически, коммерческие модели были специально разработаны для того, чтобы оптимизировать синхронную накачку существующего парка СБ-лазеров на красителях. Эти системы сейчас снова используются для приложений, таких как СБ-спектроскопия с временным разрешением, включая эксперименты типа "накачка-зонд".

Перестраиваемые лазерные источники существуют практически столько же, сколько и собственно лазеры. Поэтому сегодня существует большой выбор коммерческих технологий, способных удовлетворить широкий спектр приложений от квантовой химии до нелинейной оптики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Juchmann W., David V. Pulsed Lasers. Supercharging Peak Output. – www.photonics.com/content/handbook/2006/lasers/81918.aspx
2. Ph.Feru, L.McCrumb. Tunable laser technology.– www.photonics.com/content/handbook/2006/lasers/63569.aspx