

Синхронизация частоты излучения диодных лазеров с частотой мод высокостабильного фемтосекундного титан-сапфирового лазера

С.Н.Багаев, В.Ф.Захарьяш, В.М.Клементьев, Д.Б.Колкер, С.А.Кузнецов, Ю.А.Матюгин, В.С.Пивцов, М.Н.Скворцов, С.В.Чепуров

Сообщается о фазовой привязке диодных лазеров к частотной компоненте (моды) выходного излучения высокостабильного фемтосекундного титан-сапфирового лазера, что соответствует «усилению» мощности этой моды на несколько порядков. Обсуждается возможность использования фемтосекундных лазеров для создания нового поколения малогабаритных оптических часов, а также для синтеза и измерения абсолютных частот лазеров.

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, синтез оптических частот, оптические часы, стабилизация частоты лазера.

В последнее время продемонстрирована перспективность использования фемтосекундных лазеров в метрологии для создания оптических часов [1–3] и высокоточного измерения абсолютных значений частот в оптическом диапазоне [4, 5]. В основе таких применений лежит способность фемтосекундного лазера с синхронизацией мод генерировать широкий спектр эквидистантных частот. Исследования [1, 2] показали, что межмодовая частота лазеров с самосинхронизацией мод может быть стабилизирована путем фазовой привязки частоты межмодовых биений к частоте внешнего высокостабильного генератора. При этом эквидистантность межмодовых интервалов с погрешностью не хуже 10^{-16} задается самим процессом самосинхронизации мод [6]. Таким образом может быть создана высокостабильная линейка эквидистантных частот с шагом 100 МГц – 1 ГГц, перекрывающая частотный интервал до сотен терагерц.

Использование такой шкалы частот позволяет определять с высокой точностью значительные частотные интервалы в системах синтеза и абсолютного измерения оптических частот, существенно упрощая структуру этих систем [5]. Действительно, если необходимо точно измерить частотный интервал между известной частотой ν_0 и измеряемой частотой ν_m , и обе эти частоты попадают в область, перекрываемую модами фемтосекундного лазера, то достаточно измерить частоты биений f_0 и f_m этих частот с ближайшими модами лазера и с помощью дополнительных грубых измерений определить число межмодовых интервалов N между ними. Тогда измеряемый частотный интервал определится из соотношения $|\nu_m - \nu_0| = N\Delta\nu \pm f_0 \pm f_m$, где $\Delta\nu$ – межмодовая частота.

Если одновременно застабилизировать межмодовую частоту по частоте радиочастотного стандарта, а одну из синхронизированных мод лазера привязать к частоте оптического стандарта, то получим шкалу стандартных частот, известных с точностью первичных стандартов час-

тоты. В этом случае для измерения какой-либо частоты в рассматриваемом диапазоне отпадает необходимость в построении схем для синтеза частот. Для нахождения любой частоты лазера, попадающей в интервал, занимаемый шкалой стандартных частот, достаточно измерить частоту биений между измеряемой и ближайшей стандартной частотами.

Построение оптических часов предполагает перенос частотных характеристик оптического стандарта в радиочастотный диапазон. В созданных ранее оптических часах [7] такой перенос осуществлялся за счет генерации гармоник и использования цепочки синхронизованных между собой лазеров с последовательно убывающими частотами. Такие часы представляют собой сложную стационарную установку. В работе [3] была предложена более простая схема, в основе которой лежит использование фемтосекундного лазера.

Физический принцип построения таких часов иллюстрирует рис.1. Применяемый для этой цели фемтосекундный лазер должен генерировать спектр мод, перекрывающий частотный интервал, равный частоте лазерного стандарта. Используемый He–Ne/CH₄-лазерный стандарт работает на частоте 88.5 ТГц, что соответствует длительности импульса 10 фс. С помощью нелинейного кристалла генерируется разностная частота между теми модами фемтосекундного лазера, частотный интервал между которыми равен частоте He–Ne/CH₄-стандарта. Затем эта разностная частота стабилизируется путем ее фазовой привязки к частоте стандарта. При этом межмодовая частота $\Delta\nu$, находящаяся в радиодиапазоне, тоже стабилизируется, т. е. осуществляется однокаскадный пе-

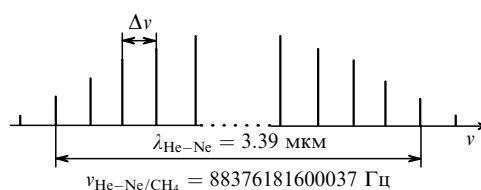


Рис.1. Физический принцип построения фемтосекундных оптических часов.

ренос частотных характеристик оптического стандарта частоты в радиочастотную область. Заметим, что хотя межмодовая частота застabilизирована, абсолютная частота мод может быть нестабильной, но для рассматриваемой схемы это обстоятельство роли не играет.

Однако прямое использование мод фемтосекундного лазера в рассмотренных выше схемах, в особенности для получения разностной частоты в нелинейном кристалле при построении оптических часов, в значительной степени затруднено из-за малой мощности отдельной моды. Например, если средняя мощность фемтосекундного лазера равна 200 мВт, $\Delta\nu = 10^8$ Гц, $N \approx 885000$ (для $\nu_{\text{He-Ne}} = 88.5$ ТГц), то мощность одной моды составит всего лишь $0.2/N \approx 2 \cdot 10^{-7}$ Вт.

В настоящей работе для «усиления» мощности выделенных мод фемтосекундного титан-сапфирового (Ti:S) лазера предлагается использовать излучение вспомогательных одночастотных перестраиваемых диодных лазеров с внешним резонатором, привязанных по фазе к частоте выделенных мод фемтосекундного лазера. Дается описание конструкции диодных лазеров и их основных характеристик, обосновывается выбор рабочих параметров системы фазовой автоматической подстройки частоты, приводятся результаты экспериментального исследования фазовой привязки. В заключение рассмотрен вариант функциональной схемы фемтосекундных оптических часов, в которых применяется описанная методика.

Экспериментальное исследование фазовой привязки диодных лазеров к модам фемтосекундного лазера проводилось на установке, представляющей собой фрагмент оптических часов (рис.2). Высокостабильный фемтосекундный Ti:S-лазер был аналогичен описанному в [2]. Лазер накачивался излучением непрерывного аргонового лазера. При мощности накачки 7 Вт во всех линиях средняя мощность выходного излучения была около 300 мВт. Длительность импульсов фемтосекундного лазера составляла примерно 100 фс, что соответствовало ширине спектра ~ 10 нм. Частота биений соседних мод стабилизировалась посредством фазовой привязки к частоте

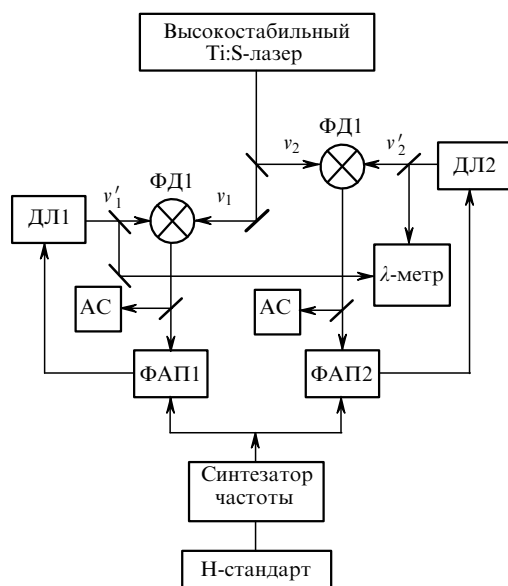


Рис.2. Схема экспериментальной установки: ДЛ – диодный лазер; АС – анализатор спектра; ФД – фотодиод; ФАП – фазовая автоподстройка частоты; Н-стандарт – водородный стандарт частоты.

высокостабильного генератора. Обработка сигнала ошибки осуществлялась с помощью пьезокерамики, на которой крепилось одно из зеркал резонатора, т. е. путем изменения длины резонатора лазера. Относительное среднеквадратичное отклонение межмодовой частоты от среднего значения при временах усреднения 10 и 100 с было соответственно $1.17 \cdot 10^{-12}$ и $5.6 \cdot 10^{-14}$.

Излучение Ti:S-лазера, содержащее моды с частотами ν_1 и ν_2 , смешивалось с помощью делительных зеркал с излучением диодных лазеров ДЛ1 и ДЛ2, работающих на частотах ν'_1 и ν'_2 , близких к частотам выделенных мод. Каждое из смешанных излучений направлялось на фотодиоды ФД1 и ФД2, регистрирующие сигналы биений между частотой соответствующего диодного лазера и близлежащей модой Ti:S-лазера. Амплитуда сигнала биений определялась мощностью одной выделенной моды. Мощность всех остальных мод давала вклад в шум.

Чтобы повысить отношение сигнал/шум, проводилось сужение спектра мод, попадающих на фотодиод. Для этого смешанное излучение после делительного зеркала направлялось на дифракционную решетку и из дифрагировавшего луча щелью выделялось излучение с требуемой частотой, которое и поступало на фотодиод. Положение и размер щели настраивались на максимум пропускания излучения диодного лазера. Частоты диодных лазеров контролировались λ -метром, спектры сигнала биений и частоты биений регистрировались анализатором спектра типа FSEK фирмы Rohde & Schwarz. Сигнал биений с фотодиодов подавался на системы фазовой автоподстройки частоты ФАП1 и ФАП2, сигнал ошибки от которых использовался для подстройки частоты ДЛ1 и ДЛ2 соответственно.

В работе использовались диодные лазеры SDL-5411 и ИЛПН-820 мощностью 100 и 50 мВт. Ширина линии генерации лазеров в свободном режиме превышала 10 МГц, а частота определялась температурой диода и током инжекции. Для обеспечения возможности настройки лазера на нужную частоту и сужения линии генерации лазер работал с внешним резонатором. Обратная связь осуществлялась с помощью дифракционной решетки 1800 штрих./мм, расположенной на расстоянии около 35 мм от лазерного диода и установленной по автоколлимационной схеме. Излучение диода коллимировалось асферической линзой с фокусным расстоянием 4.3 мм и числовой апертурой 0.47.

Конструкция лазера изображена на рис.3. На держателе 2 крепятся лазерный диод 1 и линза 3. Устройство держателя позволяет размещать на нем лазеры с различной геометрией корпуса. С помощью винта 4 можно прецизионно регулировать расстояние между лазерным диодом и линзой. На юстировочной головке 6 закреплена дифракционная решетка 8, приклеенная к пьезокерамике 7 через промежуточный держатель 9. В качестве выходного излучения используется нулевой порядок дифракции решетки. Зеркало 10 служит для компенсации углового смещения выходного луча при повороте решетки. Юстировочные устройства 2 и 6 закреплены на общем основании 12.

Вся эта конструкция термостабилизировалась с точностью 0.01°C при помощи термоэлектрического элемента 13, установленного на массивном основании 14, которое служило теплоотводом. Для защиты лазера от внешних акустических возмущений весь резонатор помещался в звукоизолирующий корпус. Грубая перестройка

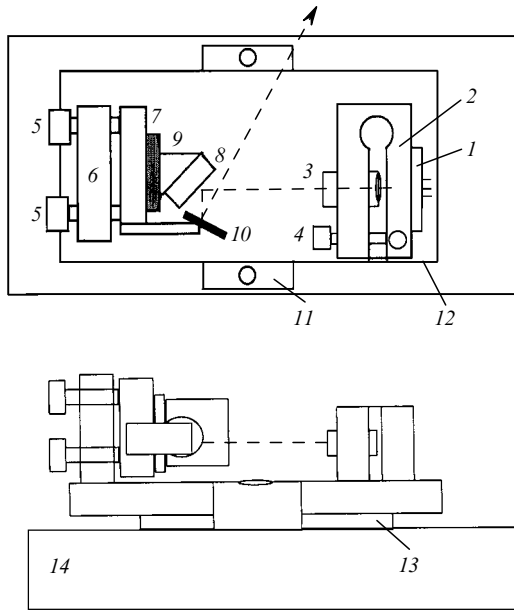


Рис.3. Диодный лазер с внешним резонатором: 1 – диодный лазер; 2 – держатель диода и объектива; 3 – асферическая линза; 4, 5 – юстировочные винты; 6 – юстировочная головка; 7 – пьезокерамика; 8 – дифракционная решетка; 9 – держатель; 10 – зеркало; 11 – теплоизолированный держатель; 12 – основание резонатора; 13 – термоэлектрический элемент; 14 – основание лазера.

лазера в пределах 30 нм осуществлялась поворотом дифракционной решетки. Плавная перестройка обеспечивалась пьезокерамикой и составляла около 4 ГГц, что приблизительно равно межмодовому интервалу.

При тщательной изоляции лазеров от акустических возмущений ширина линии лазерного излучения, измеренная по спектру биений двух одинаковых лазеров, составляла около 300 кГц. Выходная мощность в одночастотном режиме при использовании лазерных диодов SDL-5411 достигала 30 мВт, а для лазеров ИЛПН-820 – около 13–15 мВт.

Фазовая синхронизация частоты диодного лазера осуществлялась с помощью пьезоэлемента и управления током. Последнее обеспечивало высокую скорость подстройки с частотами до ~ 300 кГц, чувствительность по току в статическом режиме составляла 70 МГц/мА. Управление длиной резонатора с помощью пьезоэлемента обеспечивало достаточно большой динамический диапазон регулирования фазового захвата. Чувствительность управления пьезокерамикой составляла 10 МГц/В.

Система ФАП частоты, вырабатывающая сигнал ошибки, пропорциональный разности фаз между частотой биений и опорной частотой, включала в себя усилитель, фазовый детектор и две цепи обратной связи для управления частотой – быструю и медленную. В быстрой цепи сигнал ошибки с фазового детектора проходил через фильтр и использовался для управления током лазерного диода. В медленной цепи вырабатывался высоковольтный сигнал для управления пьезокерамикой. Опорная частота поступала на систему ФАП от синтезатора частоты, стабилизированного по водородному стандарту частоты. Частота сигнала биений, а следовательно, и опорная частота выбирались равными 12 МГц. Характеристики системы ФАП выбирались исходя из параметров полученного сигнала биений.

Мощность сигнала биений составляла примерно -90 дБм, что при мощности излучений диодного и Ti:S-лазеров $\sim 10^{-3}$ и 10^{-6} Вт соответственно свидетельствовало о плохом согласовании волновых фронтов. Однако на данном этапе оптимизации этого параметра не требовалось. Для подавления амплитудных возмущений усилитель доводил сигнал до уровня ограничения, что требовало использования усилителя с коэффициентом усиления ~ 90 дБ. Кроме того, для ограничения полосы фазовых возмущений частоты F_p в пределах ~ 20 кГц ($F_d/F_p < \pi/2$, где F_d – девиация частоты на частоте F_p) был использован делитель частоты (деление на 12), т. к. в свободном (без деления) режиме полоса частотных возмущений может достигать ~ 300 кГц.

Для достижения устойчивой фазовой привязки частоты диодного лазера к частоте определенной моды Ti:S-лазера необходимо выполнить несколько условий: отношение сигнал/шум должно быть не менее 20 дБ, спектральная ширина сигнала биений в свободном режиме должна укладываться в пределы, определяемые цепью фазовой синхронизации, и медленные уходы частоты сигнала от среднего положения в зависимости от внешних воздействий не должны превышать ~ 10 МГц. Эти условия были реализованы в основном за счет выделения из широкого (~ 10 нм) спектра генерации Ti:S-лазера узкого спектрального диапазона (~ 0.1 нм), акустической изоляции лазеров от внешних возмущений, а также стабилизации источников питания и термостабилизации диодного лазера.

Спектральные характеристики сигнала биений регистрировались анализатором спектра. На рис.4 приведены записи сигнала биений при временных усреднениях 1 и 100 с. Во всех случаях видны узкий спектр сигнала биений и характерный шумовой пьедестал, обусловленный амплитудно-фазовыми шумами диодных лазеров. Поскольку сигнал на анализатор спектра подавался с фотодетектора без усилителя-ограничителя, он сопровождался амплитудными шумами (рис.4,а). При увеличении времени усреднения (в нашем случае до 100 с) шумы стремились к минимальному уровню (рис.4,б). Шумовой пьедестал – это частотно-фазовые возмущения. Как следует из рис.4,б, для их подавления до уровня разрешения анализатора требуется большой коэффициент передачи цепи фазовой синхронизации (более 20 дБ).

В нашем случае отработка сигнала ошибки с ФАП проводилась током диодного лазера. Такое управление частотой приводит к амплитудной модуляции мощности излучения диодного лазера. Кроме того, в амплитудные шумы вносят свой вклад и амплитудные флуктуации

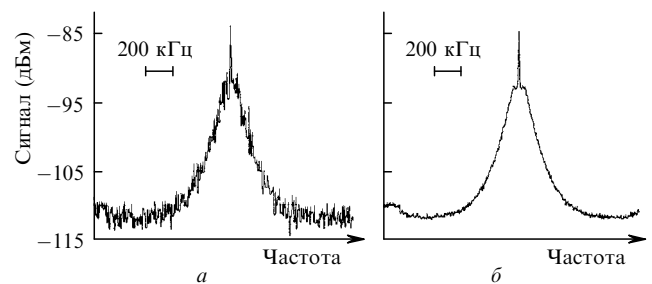


Рис.4. Спектр сигнала биений между модой фемтосекундного Ti:S-лазера и излучением одночастотного диодного лазера при фазовой привязке частоты последнего к этой моде. Время усреднения 1 (а) и 100 с (б), полоса пропускания 10 кГц.

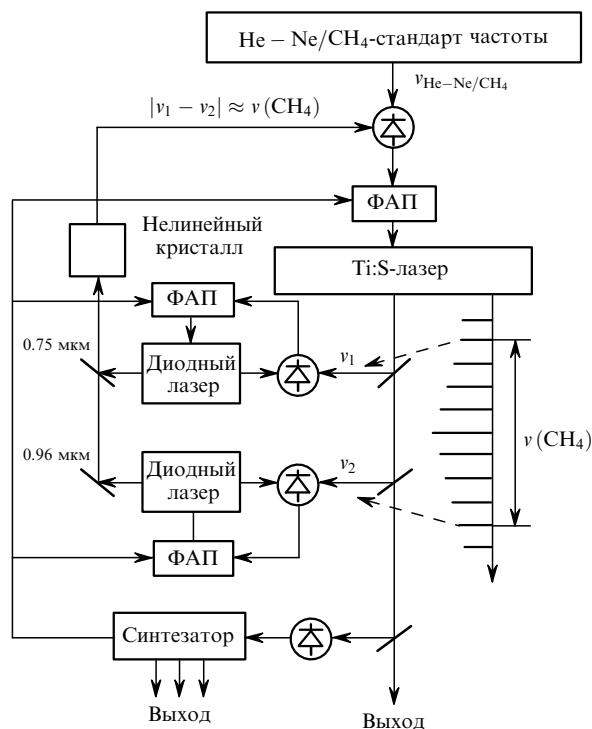


Рис.5. Схема фемтосекундных оптических часов.

мощности излучения Ti:S-лазера, вызванные нестабильностью мощности Ar-лазера.

Как следует из рис.4, достигнутая полоса управления составила $\sim 30-40$ кГц. В основном она задается глубиной подавления амплитудных шумов, которая определяется выражением $A \sim \exp(U_s^2/U_n^2)$ [8], где U_s – амплитуда сигнала по уровню 0.7 в полосе синхронизации и U_n – уровень амплитудных шумов в той же полосе. В дальнейшем был получен сигнал на разностной частоте $|v_k - v_n|$ на диоде Шоттки. Однако эти исследования представляют самостоятельный интерес и здесь не обсуждаются.

Таким образом, достигнута надежная фазовая привязка диодных лазеров к частотам мод Ti:S-лазера и получен высокостабильный сигнал биений между этими диодными лазерами. При необходимости таким методом к модам фемтосекундного Ti:S-лазера можно привязать по фазе любое число диодных лазеров.

В заключение кратко остановимся на фемтосекундных оптических часах, в которых была использована описанная выше схема. На рис.5 дана схема оптических часов с He-Ne/CH₄-лазерным стандартом частоты. Диодные лазеры служат «усилителями» мощности мод фемтосекундного Ti:S-лазера на частотах ν_1 и ν_2 (длины волн 0.75 и 0.96 мкм соответственно). Возникающее после нелинейного кристалла излучение на разностной частоте $|\nu_1 - \nu_2| \approx \nu_{CH_4}$ смешивается с излучением He-Ne/CH₄-стандарта на частоте ν_{CH_4} , и эти два излучения попадают на фотодиод. Низкочастотный сигнал биений с фотодиода на частоте $||\nu_1 - \nu_2| - \nu_{CH_4}|$ подается на систему ФАП, сигнал ошибки с которой поступает для отработки к Ti:S-лазеру. В результате частотный интервал $|\nu_1 - \nu_2|$ в его спектре, а следовательно, и $\Delta\nu$ оказываются застabilизированными по частоте He-Ne/CH₄-стандарта.

Таким образом, частотные характеристики He-Ne/CH₄-стандарта переносятся в радиодиапазон без промежуточных каскадов. Схема автономна, т.е. не требует внешнего опорного генератора. При использовании частоты биений между модами, удаленными друг от друга на различные межмодовые интервалы, можно получить «гребенку» стабильных частот в оптическом диапазоне с жесткой привязкой к частотам радиодиапазона. Если это необходимо, ширина спектра Ti:S-лазера может быть увеличена с помощью одномодового оптического или фотонного кристаллического волокна.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-02-17475).

1. Chebotayev V.P., Klementyev V.M., Pyltsin O.I., Zakhariash V.F. *Appl. Phys. B*, **54**, 98 (1992).
2. Багаев С. Н., Захарьяш В.Ф., Клементьев В.М., Пивцов В.С., Чепуров С.В. *Квантовая электроника*, **24**, 327 (1997).
3. Bagayev S.N., Chepurov S.V., Klementyev V.M., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Pokasov V.V., Zakharyash V.F. *Appl. Phys. B*, **70**, 375 (2000).
4. Reichert J., Holzwarth R., Udem Th., Haensch T.W. *Optics Comms*, **172**, 59 (1999).
5. Diddams S.A., Jones D.J., Ye J., Cundiff S.T., Hall J.L., Ranka J.K., Windeler R.S., Holzwarth R., Udem T., Haensch T.W. *Phys.Rev. Letts*, **84**, 5102 (2000).
6. Udem Th., Reichert J., Holzwarth R., Haensch T.W. *Optics Letts*, **24**, 991 (1999).
7. Гольдорт В.Г., Захарьяш В.Ф., Клементьев В.М., Никитин М.В., Тимченко Б.А., Чеботаев В.П. *Письма в ЖТФ*, **8**, 157 (1982).
8. Захарьяш В.Ф. *Автоматрия*, **2**, 108 (1987).