

РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТОТ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНОЙ ГРЕБЕНКИ TI-SA ЛАЗЕРА

Ю.П. МАЧЕХИН, Ю.Г. КОЛЕСНИКОВА

В данной работе особое внимание уделяется точному определению абсолютных значений частот. Рассматриваются особенности фемтосекундных лазеров, частотной гребенки и микроструктурированного волокна. В результате была разработана система для измерения абсолютных значений частот с использованием частотной гребенки Ti-Sa лазера. Главной особенностью этой системы является возможность связи оптических частот с радиочастотами.

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, оптическая частотная гребенка, микроструктурированное волокно.

ВВЕДЕНИЕ

С начала 80-х годов и до 2000 года точное определение абсолютного значения частот оптического диапазона осуществлялось методом многоступенчатого переноса частоты от первичного цезиевого эталона, работающего в радиодиапазоне, в оптический диапазон с помощью радиооптического моста (РОЧМ) [1]. В состав РОЧМ входят несколько стабилизированных лазеров, работающих в различных спектральных диапазонах, высоко стабильные СВЧ генераторы, приемники, преобразователи и усилители электромагнитного излучения различных конструкций. Система связи между частотой первичного цезиевого эталона и частотой лазера в оптическом диапазоне очень сложна, поэтому каждое измерение с ее использованием требовало много времени и высокопрофессионального обслуживания. РОЧМ были созданы в научных центрах нескольких наиболее развитых стран мира. Работа на этих РОЧМ обычно планировалась заранее, поскольку требовалось много времени для подготовки, как правило, осуществлялось измерение абсолютного значения частоты излучения лазеров, у которых осуществлялась стабилизация частоты по внешним частотным реперам. Большая периодичность в работе РОЧМ создавала сложности в метрологическом обеспечении измерений оптических частот. Такое положение в области измерения оптических частот держалось в мире до конца 90-х годов.

В начале 90-х годов были разработаны и созданы импульсные твердотельные (титан-сапфировый) лазеры, которые обеспечивали генерацию импульсов фемтосекундной ($10^{-14} - 10^{-15}$) длительности. Центральная длина волны излучения находится в интервале 700–750 нм, а ширина спектра излучения составляет 40–80 нм. Поскольку длина резонатора составляет около двух метров, то расстояние между продольными модами может составлять несколько десятков МГц [2].

В 90-х годах с помощью микроструктурированного волокна появилась возможность расши-

рения спектра излучения, благодаря чему уменьшалась длительность импульса.

Это дает возможность с помощью сравнительно простых оптических схем проводить измерение оптических частот через измерение радиочастот. Состав измерительной системы на основе титан сапфирового лазера включает в себя еще системы стабилизации частотных параметров этого лазера, оптоволоконный расширитель спектра оптического излучения и приемники, которые позволяют измерять частоту биений между частотой исследуемого лазера и ближайшей гармоникой частотного спектра лазера.

Применение оптических частотных гребенок, формируемых фемтосекундными лазерами с синхронизацией мод, достаточно широко. Это привело к производству измерительных систем, приборов, которые, на данном этапе времени, являются наиболее точными. В различных университетах, например, Беркли (Калифорния), частотные гребенки применяются в прецизионных фундаментальных измерениях в атомной, молекулярной и оптической физике. В Дюссельдорфе гребенку применяют для разработки оптических часов на основе ультрахолодных Yb-атомов. Также разрабатываются программы для онлайн обработки абсолютной частоты лазера.

Успешно работают фирмы, которые изготавливают не только волоконные и титан-сапфировые лазеры, но и всю необходимую электронику. Такой успешной фирмой в настоящее время является Menlosystems. Ее оборудование используется в научных и метрологических центрах, деятельность которых связана как с прецизионными временно-частотными измерениями, так и со спектроскопическими исследованиями и созданием атомных часов.

Однако стоимость этого оборудования очень высока, и сегодня достаточно сложно приобретать его государственным научным организациям. В связи с этим было принято решение создать систему измерения абсолютных значений частот с помощью создаваемого в отечественных институтах и университетах

оборудования. В настоящей работе представлены первые результаты начального этапа разработки прецизионной измерительной аппаратуры для измерения абсолютных значений оптических частот. В качестве базового лазера используется Ti-Sa лазер с синхронизацией мод, работающий в режиме генерации фемтосекундных импульсов, разработанный и изготовленный в институте плазменных методов ускорения (ХФТИ).

1. ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ TI-SA ЛАЗЕР

Ti-Sa лазер с синхронизацией мод обеспечивает генерацию ультракоротких импульсов в спектральном диапазоне 700–750 нм.

Активной средой такого лазера является кристалл сапфира, активизированный трехвалентными ионами титана ($Al_2O_3 : Ti^{3+}$). В качестве источника накачки используется аргоновый лазер. Схема лазера изображена на рис. 1.

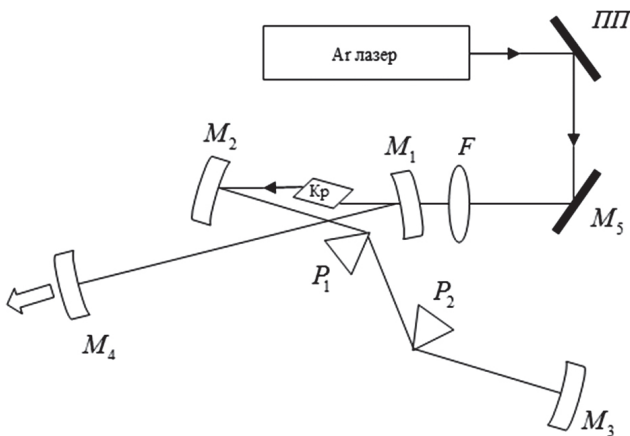


Рис. 1. Схема фемтосекундного Ti-Sa лазера:

Ar лазер – лазер накачки; $\lambda = 514$ нм;

F – фокусирующая линза; ПП – поворачивающая пластина; Кр – активный элемент, кристалл Ti:Sa; M_1 и M_2 – сферические зеркала; M_3 – глухое зеркало; M_5 – поворачивающее зеркало; P_1 и P_2 – призмы компенсаторы ДГС (с негативной ДГС)

Активная среда помещена между двумя софокусными вогнутыми зеркалами, формирующими моду резонатора с малым сечением перетяжки в активной среде. Малый диаметр пучка в активной среде нужен для того, чтобы достичь высокой интенсивности, которая необходима для функционирования механизма керровской линзы.

Самофокусировка, возникающая при увеличении интенсивности в активной среде, уменьшает конфокальный параметр моды, что способствует пропусканию через диафрагму более мощного импульса.

Две призмы служат для компенсации дисперсии групповых скоростей в резонаторе, которая возникает из-за наличия дисперсии в кристалле. Первая призма является дисперсионным элементом, а вторая собирает преломленные лучи в параллельный пучок. Лазер генерирует периодическую последовательность импульсов, время между которыми равно времени обхода светом резонатора [3].

1.1. Частотная гребенка, формируемая фемтосекундным лазером.

Частотная гребенка представляет собой шкалу оптических частот, которая позволяет напрямую сравнивать и связывать оптические частоты с частотами радиоволнового диапазона без потери когерентности фаз.

Излучение лазера представляет собой последовательность импульсов, которые являются копиями одного и того же импульса (рис. 2, а). Время между импульсами $T_0 = 2L/v_{gr}$ (v_{gr} – скорость распространения импульса в резонаторе). Но импульсы не совсем одинаковы вследствие того, что их огибающая распространяется со скоростью v_{gr} , а несущая волна с частотой ω_c – фазовой скоростью. После каждого обхода резонатора несущая волна приобретает фазовый сдвиг $\Delta\phi$ относительно огибающей [4].

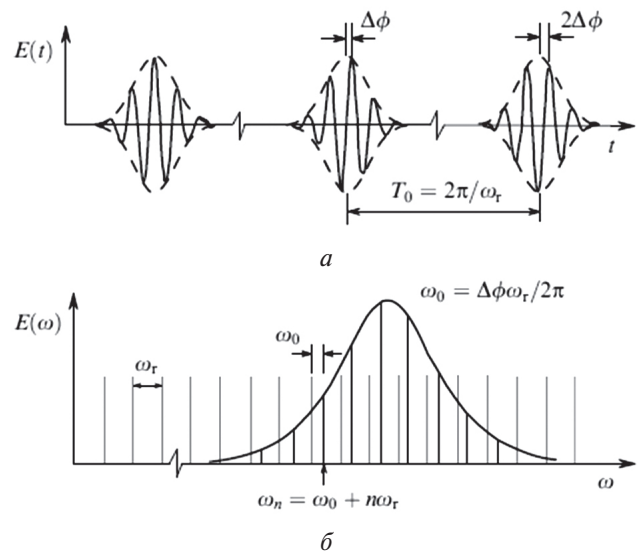


Рис. 2. Характеристики излучения фемтосекундного Ti-Sa лазера с синхронизацией мод: а – временные характеристики; б – спектральные характеристики

Значение частоты повторения импульсов обычно находится в пределах до 100 МГц и определяется геометрией резонатора лазера:

$$\omega_r = v_g / 2L, \quad (1)$$

где L – длина резонатора, v_g – групповая скорость излучения внутри резонатора.

Частота ω , соответствующая пику гребенки с номером N , определяется соотношением:

$$\omega_n = \omega_r \cdot N + \omega_0, \quad (2)$$

где ω_0 – смещение пика с номером $N = 1$ «идеальной» частотной сетки, которая перекрывает весь частотный диапазон, относительно $\omega = 0$.

Наличие этого частотного сдвига обусловлено разницей между фазовой и групповой скоростями излучения в резонаторе лазера.

2. КОМПЛЕКС СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТОТ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНОЙ ГРЕБЕНКИ TI-SA ЛАЗЕРА

В состав разрабатываемой системы измерений абсолютных значений частот входит Ti-Sa

лазер (1), микроструктурированное волокно типа «кагоме» [5] (2), которое крепится держателем волокна, поворотные зеркала(3), измеряемый лазер (4), микрообъектив (5), дифракционная решетка (6), фотодиод (7) и частотомер (8) (рис. 3).

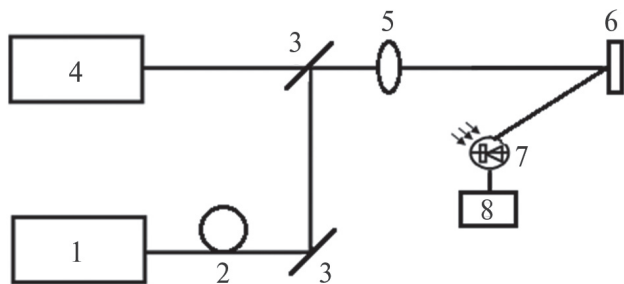


Рис. 3. Система измерения абсолютных значений частот с помощью частотной гребенки Ti-Sa лазера

Излучение титан-сапфирового лазера 1 направляется в микроструктурированное волокно 2, после поворотных зеркал 3 соединяется с излучением измеряемого лазера 4, проходит через микрообъектив 5 и дифракционную решетку 6, которая позволяет выделить необходимый спектральный диапазон. После этого излучение попадает на фотодиод 7 и фиксируется в частотомере 8, который регистрирует разность частот измеряемого лазера и фемтосекундного лазера.

Микроструктурированное волокно используется для уширения частотного спектра фемтосекундного лазера.

Это уширение может превышать оптическую октаву без нарушения целостности частотной гребенки. Поэтому такая частотная гребенка позволяет измерять частоту оптического излучения во всем оптическом диапазоне.

2.1. Микроструктурированное волокно типа «кагоме». Микроструктурированное волокно (МКВ) типа «кагоме» (рис. 4) изготовлено из стекла электровакуумной группы С-52-2 и имеет следующие параметры: внешний диаметр структуры 212,98 мкм, диаметр дефекта 4 мкм, внешний диаметр дефекта 12,54 мкм, диаметр малых отверстий 2,62 мкм, период отверстий в дефекте 4,23 мкм, диаметр окружающих отверстий 8,09 мкм, период структуры 11,09 мкм, площадь промежуточных треугольников 4,41 мкм², оптическое пропускание структуры 69,4 %. Нелинейный коэффициент преломления стекла волновода $n_2 = 4,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$, что соответствует коэффициенту нелинейности стекла $\gamma = 0,5 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{-1}$ [6].

Применение двумерной периодической фотонной решетки позволило осуществить сильную локализацию излучения в дефекте, не используя эффектов фотонных запрещенных зон. В этом случае излучение вследствие полного внутреннего отражения распространяется в дефекте, которым является точка пересечения структуры решетки, называемой решеткой «кагоме». Любая неоднородность в фотонном кристалле называется дефектом фотонного кристалла, поскольку

нарушает его периодичность. Область нарушения периодичности кристалла фактически является микрорезонатором, в котором электромагнитная волна ограничена в двух измерениях и убывает экспоненциально по интенсивности вглубь кристалла. Длина волны основной моды излучения, сосредоточенного внутри дефекта структуры, может изменяться в пределах ширины запрещенной зоны посредством изменения размера либо формы дефекта.

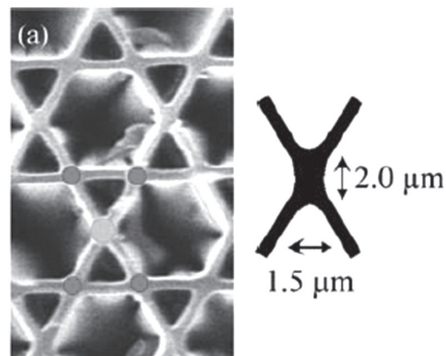


Рис. 4. МКВ с периодической структурной оболочкой типа «кагоме» для генерации суперконтинуума

Технически осуществить использование фотонного волокна можно при условии его стабильного удержания. Учитывая, что волокно без защитной оболочки, его использование составляет определенную техническую трудность. Поэтому в проведенных исследованиях волокно помещалось в стеклянный капилляр диаметром меньше 1 мм. Концы волокна выступали на 2-3 мм за пределы торцов капилляра. Для ввода излучения необходимо сфокусировать выходное излучение лазера на торец фотонного волокна [6].

С помощью такого комплекса можно с большой точностью измерять абсолютные значения частот, связывать оптические частоты с радиочастотами.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты создания системы для измерения оптических частот с использованием фотонного волокна. Показано, что для получения стационарной гребенки использовался разработанный в ХФТИ Ti-Sa лазер.

Установлено, что гребенка является сверхточным измерительным прибором, который способен напрямую сравнивать и связывать оптические частоты с частотами радиоволнового диапазона без потери когерентности фаз.

Разработана система измерения абсолютных значений частот с помощью частотной гребенки Ti-Sa лазера. В состав системы включено микроструктурированное волокно типа «кагоме», которое использовалось для уширения спектра фемтосекундного лазера. Также в комплекс измерения включены поворотные зеркала, микрообъектив, дифракционная решетка, фотодиод и частотомер.

Хотелось бы выразить благодарность нашим коллегам из Саратовского государственного университета имени М. Г. Чернышевского А.А. Занишевской, А.А. Шувалову и Ю.С. Скибиной за предоставленные образцы волокна «кагоме», производство которого они наладили на своей технической базе, а также за помощь в создании системы для измерения оптических частот.

Литература

- [1] *Quinn T.J.* Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiation of the other optical frequency standards [Text] / T.J. Quinn // *Metrologia*. — 2003. — V. 40. — P. 103-133.
- [2] *Хэнш Т.В.* Страсть к точности [Текст] / Т.В. Хэнш // *Успехи физических наук*. — Том 176, № 12. — 2006. — С. 1368–1380.
- [3] Развитие прецизионной технологии измерения оптических частот с использованием фемтосекундного лазера [Текст] / Ю.П. Мачехин, А.М. Негрийко, Л.П. Яценко и др. — Радиотехника. — 2007. — 150 с.
- [4] *Мачехин Ю.П.* Формирование системы абсолютного измерения оптических частот лазеров на базе фемтосекундного лазера [Текст] / А.Ю. Красноголов. — 5 Международная НТК Метрология и измерительная техника : Научные труды. — Том 2. — 2006. — С. 5.
- [5] *Скибина Ю.С.* Фотонно кристаллические волны в биомедицинских исследованиях [Текст] / Ю.С. Скибина, В.В. Турчин, В.И. Безглазов и др. // *Квантовая электроника*. — 2011. — С. 284-301.
- [6] *Glass P.* Supercontinuum generation in a two-dimensional photonic kagome / P. Glas, D. Fischer, G. Steinmeyer // *Applied Physics*. — 2005. — P. 1-9.

Поступила в редколлегию 3.04.2014

Мачехин Юрий Павлович, фото и сведения об авторе см. на стр. 172.



Колесникова Юлия Геннадиевна, аспирант кафедры физических основ электронной техники ХНУРЭ. Научные интересы: особенности излучения фемтосекундных лазеров, лазерная измерительная техника и ее применение.

УДК 535.33

Розробка прецизійного лазерного пристрою для вимірювання абсолютних значень частот з допомогою частотної гребінки Ti-Sa лазера / Ю.П. Мачехин, Ю.Г. Колесникова // *Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал*. — 2014. — Том 13. — № 2. — С. 178–181.

У даній роботі особлива увага надається точному визначенню абсолютних значень частот. Розглядаються особливості фемтосекундних лазерів, частотної гребінки та мікроструктурованого волокна. В результаті була розроблена система для вимірювання абсолютних значень частот з використанням частотної гребінки Ti-Sa лазера. Головною особливістю цієї системи є можливість об'єднання оптичних частот з радіочастотами.

Ключові слова: фемтосекундний лазер, оптична частотна гребінка, мікроструктуроване волокно.

Лл.: 04. Бібліогр.: 06 найм.

UDK 535.33

Developing a precision laser apparatus for measuring the absolute frequency values by frequency comb of Ti-Sa laser / Yu.P. Machehin, Yu.G. Kolesnikova // *Applied Radio Electronics: Sci. Journ.* — 2014. — Vol. 13. — № 2. — P. 178–181.

The paper focuses on the precise definition of absolute values of frequencies. The features of femtosecond lasers, a frequency comb and microstructure fibers are considered. As a result, a system for measuring the absolute values of frequencies by using a frequency comb of a Ti-Sa laser has been developed. The main feature of this system is a possibility to connect the optical frequencies with radio frequencies.

Keywords: femtosecond laser, optical frequency comb, microstructure fiber.

Fig.: 04. Ref.: 06 items.