

УДК 535.33

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ

Ю.П. Мачехин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Харьковского национального университета радиоэлектроники (ХНУРЭ)

Ю.Г. Лимаренко, аспирант ХНУРЭ, г. Харьков

А.В. Васильев, аспирант ХНУРЭ, г. Харьков



Ю.П. Мачехин

Ю.Г. Лимаренко

А.В. Васильев

Статья посвящена точному определению абсолютных значений частот, особенностям фемтосекундных лазеров, частотных гребенок и микроструктурированных волокон. Разработана система для измерения абсолютных значений с помощью частотной гребенки титан-сапфирового лазера. Главной особенностью этой системы является возможность связи оптических частот с радиочастотами.

The article focuses on the precise definition of the absolute values of frequencies and the features of the femtosecond lasers, frequency combs and microstructure fibers. The measurement system for the absolute values of the frequencies using the frequency comb of Ti-Sa laser was developed. The main feature of this system is the possibility to set the links between the optical frequencies and radio ones.

Введение

В течение многих лет, вплоть до 2000 г., 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 частотного моста [1]. Этот метод был крайне сложным, каждое измерение отнимало много часов и требовало значительных усилий и средств. К тому же этот сложный комплекс аппаратуры был неустойчив в работе. Такие радиооптические мосты

в свое время были созданы лишь в нескольких развитых странах мира. В последние годы, в связи с развитием импульсных лазеров, появилась возможность существенно упростить решение задачи точного измерения абсолютного значения частот в оптическом и ближнем ИК-диапазонах.

В начале 90-х гг. были созданы импульсные твердотельные (титан-сапфировые) лазеры, которые обеспечивали генерацию ультракоротких импульсов фемтосекундного диапазона, то есть длительность импульсов излучения таких лазеров находится в интервале $10^{-4} \dots 10^{-15}$ с [2]. Длина волны излучения таких лазеров находится на грани оптического и ИК-диапазонов. Частотное расстояние между отдельными импульсами определяется групповой скоростью излучения внутри резонатора лазера и его геометрией и обычно имеет значение около десятков мегагерц. Поскольку генерируемые импульсы относятся к спектрально ограниченным, то есть для них выполняется условие

$$\Delta\tau \cdot \Delta f = const ,$$

где $\Delta\tau$ – длительность одного импульса, Δf – полная ширина генерируемого спектра, то для уменьшения длительности импульсов необходимо расширять генерируемый спектр излучения. Поэтому, с работой Хэнша [2], началось использование микроструктурированного волокна, которое обеспечивало существенное расширение спектра излучения, благодаря чему на выходе из волокна регистрировалась уменьшенная длительность импульса.

К настоящему времени уже работают научно-производственные фирмы, которые продают под заказ Ti-Sa волоконные лазеры, обеспечивающие генерацию ультракоротких (фемтосекундных) импульсов. Одной из таких фирм является “Menlosystems”, при этом стоимость таких лазеров очень высока, что не позволяет украинским НИИ приобретать их за бюджетное финансирование. В то же время в Украине проводились исследования и разработ-

ки, направленные на создание Ti-Sa лазера для выполнения прецизионных частотных измерений. В настоящей работе исследуются вопросы использования Ti-Sa лазера с синхронизацией мод, разработанного и изготовленного в Институте плазменной электроники и новых методов ускорения ННЦ “ХФТИ” для формирования спектра излучения типа “суперконтинуум”. Главной задачей было установление мощностного порога, при котором нелинейные эффекты в фотонном волокне типа “кагоме” обеспечивают осуществление частотного преобразования.

Цель данной работы – поиск и изучение условий использования волокна на основе фотонного кристалла для преобразования частотного спектра, главная задача – установление мощностного порога для осуществления частотного преобразования.

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, где приняты следующие обозначения: Аг 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 дисперсии групповых скоростей.

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 пропуску через

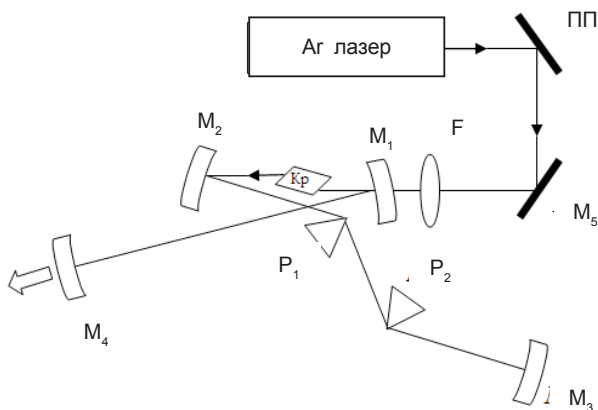


Рис. 1. Схема фемтосекундного Ti-Sa лазера

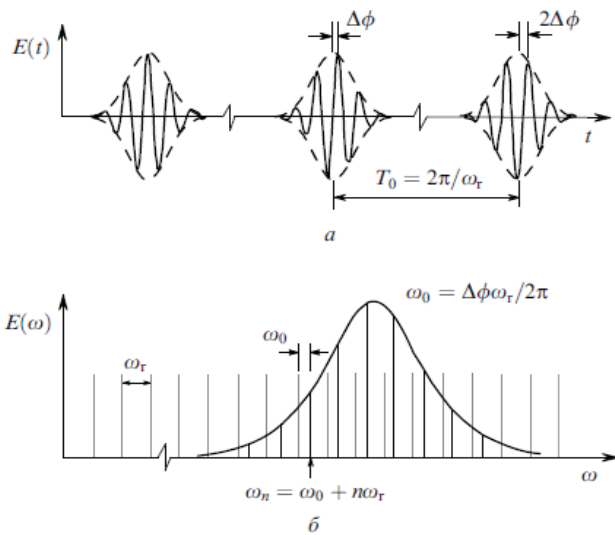


Рис. 2. Характеристики излучения фемтосекундного Ti-Sa лазера с синхронизацией мод: а – временные характеристики; б – спектральные характеристики

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].

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. 2а). 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_g , а несущая волна с частотой ω_c – фазовой скоростью. После каждого обхода резонатора несущая волна приобретает фазовый сдвиг $\Delta\phi$ относительно огибающей.

Значение частоты повторения импульсов обычно находится в пределах от 50 МГц до 1 ГГц и определяется геометрией резонатора лазера:

$$\omega_r = \frac{v_g}{2L},$$

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

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

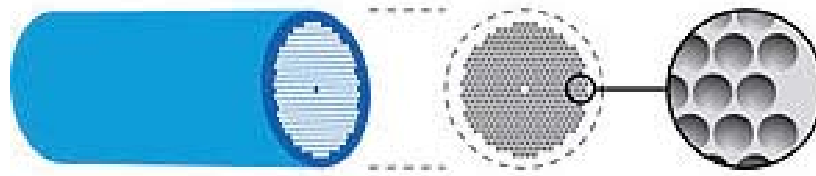


Рис. 3. Пример микроструктурированного волокна

$$\omega_n = \omega_r \cdot N + \omega_0,$$

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.

Система преобразования частотного спектра Ti-Sa лазера

Микроструктурированное волокно

Микроструктурированные волокна (МКВ) открывают новую фазу в нелинейной оптике. Благодаря своим уникальным свойствам, волокна этого типа обеспечивают радикальное усиление основных нелинейно-оптических явлений, открывая новые возможности для преобразования частоты, трансформации спектра и управления параметрами сверхкоротких лазерных импульсов, а также позволяя достигать высоких эффективностей генерации суперконтинуума с использованием нано- и субнаноджоулевых фемтосекундных импульсов. На рис. 3 изображен пример микроструктурированного волокна. Для создания МКВ в основном используют стекло или плавленый кварц с отверстиями, заполненными воздухом. Часть отверстий может быть заполнена другими газами или жидкостями, в том числе жидкими кристаллами. Реже используют МКВ, образованные двумя различными видами стекла, показатели преломления которых сильно отличаются друг от друга.

Точечный дефект в фотонном кристалле фактически создает волновод. Идея создания оптических волокон с периодической оболочкой была высказана еще в 1978 г. Ее новизна заключалась

в формировании многослойной оболочки, концентрические слои которой имеют чередующиеся (высокое/низкое) значения показателя преломления. В такой структуре формируются радиальные фотонные запрещенные зоны, обуславливающие новые направляющие свойства волновода.

В таких волноводах реализуется новый метод управления показателем преломления оболочки, зависящим от параметров ее структуры. При уменьшении показателя преломления оболочки волновода вступает в силу закон полного внутреннего отражения, лежащий в основе механизма удержания оптического излучения в таких волноводах. Волноводы данного типа относятся к классу фотонно-кристаллических волокон с твердой сердцевиной (рис. 4а).

Второй большой класс – это волноводы с поллой сердцевиной (рис. 4б, в). В таких волноводах локализация оптического излучения в сердцевине вследствие полного внутреннего отражения невозможна. Направляющие свойства МКВ с поллой сердцевиной обусловлены наличием фотонной запрещенной зоны у периодической структуры, формирующей оболочку.

В основе механизма отражения света от границы раздела “сердцевина – оболочка” лежит брэгговское отражение от двумерной периодической диэлектрической структуры. Оптическое излучение с резонансными частотами, лежащими в пределах ширины запрещенной зоны кристалла, не проходит сквозь структурную оболочку волновода и распространяется вдоль поллой сердцевины.

Архитектура микроструктурированных волокон чрезвычайно разнообразна: размеры сердцевины и капилляров в оболочке изменяются от микрона до десятков, а набор отверстий в оболочке может представлять либо периодическую структуру, либо вообще состоять из одного цикла отвер-

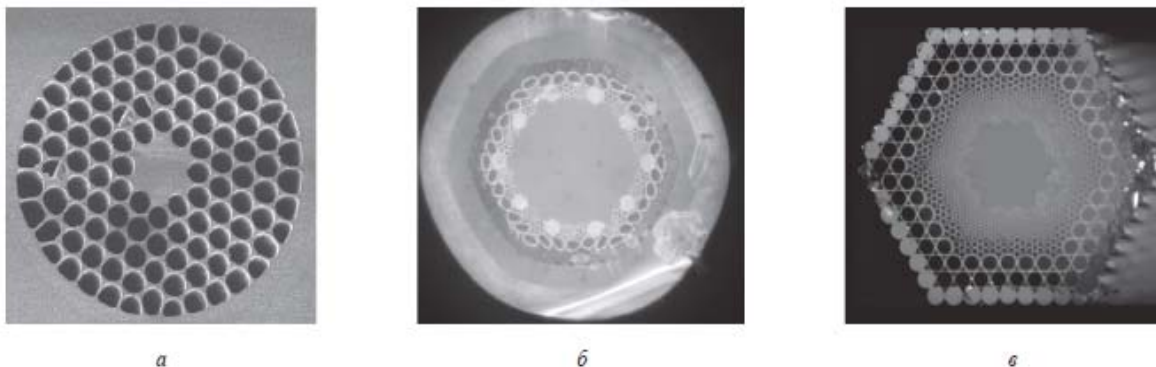


Рис. 4. Микроструктурированное волокно: а – твердая сердцевина; б, в – поллая сердцевина

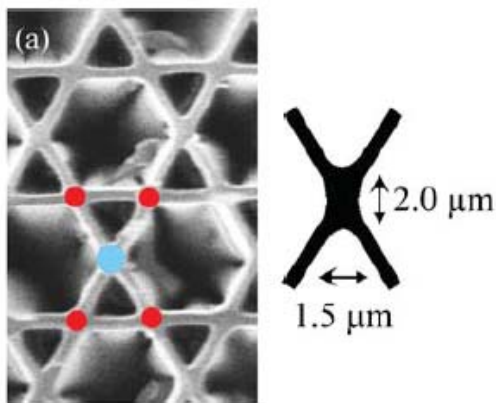


Рис. 5. МКВ с периодической структурной оболочкой типа “кагоме”

стей, что определяет особенности распространения света в микроструктурированных волокнах. В настоящее время потери даже в лучших образцах микроструктурированных волокон еще достаточно сильно превышают потери в стандартных волокнах и речь об их использовании для телекоммуникационных приложений пока еще не идет. Но микроструктурированные волноводы уже прочно занимают позиции во многих научных приложениях, связанных с лазерной физикой и нелинейной оптикой [4].

С технической точки зрения изготовление простейших типов микроструктурированных волокон не представляло сложностей уже на ранних этапах развития волоконной оптики. Однако понимание функциональных возможностей микроструктурированных волокон стало возможным гораздо позже и было достигнуто на основе идейного и технического прогресса сразу в нескольких областях оптики и лазерной физики, включая оптику сверхкоротких импульсов и физику фотонных кристаллов и случайных сред. В настоящее время производство микроструктурированных волноводов налажено несколькими компаниями в Англии, США, Дании и Австралии и является коммерчески доступным продуктом.

В исследованиях, проводимых в данной статье, используется волокно типа “кагоме”, которое изготавливается на технической базе Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Микроструктурированное волокно типа “кагоме” (рис. 5) 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.

Технически осуществить использование фотонного волокна можно при условии его стабильного удержания. С учетом того, 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 пределами торцов капилляра. Для ввода излучения необходимо сфокусировать выходное излучение лазера на торец фотонного волокна [5].

Преобразование частотного спектра Ti-Sa лазера сопряжено с торцевой частью волокна (рис. 6). Края волокна имеют некую неоднородность, что затрудняет его применение в данной задаче.

На данный момент одной из главных задач является обработка краев, так как волокно не имеет защитной оболочки.

Комплекс системы измерения абсолютных частот с помощью частотной гребенки Ti-Sa лазера

В состав разрабатываемой системы измерений абсолютных значений частот входят: Ti-Sa лазер 1; микроструктурированное волокно типа “кагоме” 2 [6], которое крепится держателем волокна; поворотные зеркала 3; измеряемый лазер 4; микрообъектив 5; дифракционная решетка 6; фотодиод 7; частотомер 8 (рис. 7).

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 и фемтосекундного лазеров.

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

Выводы

В данной работе были рассмотрены методы определения абсолютного значения частот оптического диапазона. Было установлено, что в связи с развитием лазерной импульсной техники эта задача упростилась.



Рис. 6. Торцевая сторона волокна “кагоме”

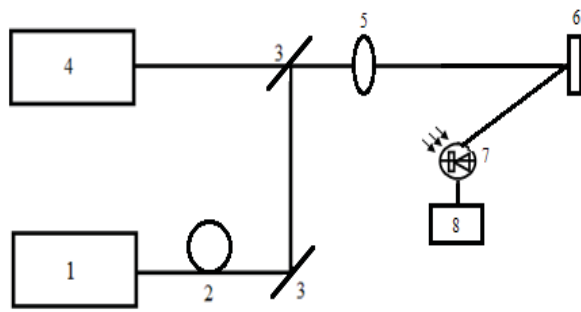


Рис. 7. Система измерения абсолютных значений частот с помощью частотной гребенки Ti-Sa лазера

В ходе выполнения работы мы убедились, что гребенка является сверхточным измерительным прибором, который способен напрямую сравнивать и связывать оптические частоты с частотами радиоволнового диапазона без потери когерентности фаз.

В результате нами 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.

Разработанная система измерения позволяет с высокой точностью определять абсолютные значения частот и связывать оптические частоты с радиочастотами.

Список литературы

1. *Quinn T.J.* Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiation of the other optical frequency standards / T.J. Quinn // *Metrologia*. – 2003. – V. 40. – P. 103–133.
2. *Хэнш Т.В.* Страсть к точности / Т.В. Хэнш // *Успехи физических наук*. – Т. 176, № 12. – 2006. – С. 1368–1380.
3. *Бакланов Е.В.* Оптические стандарты частоты и фемтосекундные лазеры / Е.В. Бакланов, П.В. Покасов // *Квантовая электроника*. – 2003. – Т. 33, № 5. – С. 384–396.
4. *Желтиков А.М.* Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами / А.М. Желтиков // *Успехи физических наук*. – 2006. – Т. 176, № 6. – С. 623–649.
5. *Glass P.* Supercontinuum generation in a two-dimensional photonic kagome / P. Glass, D. Fischer, G. Steinmeyer // *Applied Physics*. – 2005. – V. 81. – P. 209–217.
6. *Фотонно-кристаллические волноводы в биомедицинских исследованиях / Ю.С. Скибина, В.В. Турчин, В.И. Безглазов [и др.] // Квантовая электроника*. – 2011. – Т. 41, № 4. – С. 284–301.