

ПРИВАЛОВ ВАДИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ,  
КАПРАЛОВ ВАЛЕНТИН ПАВЛОВИЧ

## ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ТИТАН-САПФИРОВЫЕ ЛАЗЕРЫ В СТРУКТУРНЫХ СХЕМАХ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены некоторые структурные схемы синтезаторов частот радиодиапазона и возможность их использования в оптическом диапазоне. Приведены схемы генераторов дискретного множества частот, используемых в синтезаторах частот. Дан анализ структурных схем оптических синтезаторов на основе фемтосекундных лазеров.

**Ключевые слова:** лазер; длина волны излучения; синтезатор частоты; связь частот микроволнового и оптического диапазонов.

PRIVALOV V.E.,  
KAPRALOV V.P.

## FEMTOSECOND TITANIUM-SAPPHIRE LASER IN THE STRUCTURAL DIAGRAMS OF OPTICAL FREQUENCY SYNTHESIZERS RANGE

### ABSTRACT

Certain structural diagrams Radio-frequency synthesizers, and the possibility of their use in the optical range. Schemes generators discrete set of frequencies used in the frequency synthesizer. The analysis of structural diagrams of optical synthesizer based on femtosecond lasers.

**Keywords:** laser wavelength; frequency synthesizer; communication frequencies of microwave and optical.

Определение единицы длины – метра 1984 года регламентировало в качестве эталонных длины волн лазерного излучения. Это поставило вопрос о передаче единицы частоты в оптический диапазон. В настоящее время установлена прямая фазо-когерентная связь частот микроволнового диапазона с любой частью спектра оптического диапазона. В оптическом диапазоне реализованы стандарты частоты с коэффициентом добротности резонанса  $Q=1,5 \times 10^{14}$  [1]. Нестабильность частоты при этом не превышает значение  $\approx 10^{-18}$  при времени усреднения 1000ч [2]. Молекулярные переходы вращательного или колебательного происхождения успешно использованы для стабилизации частоты лазеров инфракрасного диапазона. Естественная ширина линий поглощения молекул  $\text{CH}_4$ ,  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{OsO}_4$  составляет единицы кГц и менее [3]. Линии поглощения в оптике имеют ширину порядка единиц Гц (например, переходы ионов  $^{199}\text{Hg}^+$  [4]<sup>88</sup>,  $\text{Sr}^+$  [5],  $\text{Yb}^+$  [6],  $\text{In}^+$  [7]). Погрешности воспроизведения номинала частоты уменьшены до уровня  $4 \cdot 10^{-15}$  [8]. Фазо-когерентные цепи синтеза связаны с цезиевым первичным стандартом [9]. Синтезаторы частот всех диапазонов получили широкое распространение в разносторонних видах аппаратуры и выделены в самостоятельный

класс радиотехнических устройств. Синтезаторы радиодиапазона, генераторы дискретного множества частот (ГДМЧ), радио-оптические частотные мосты (РОЧМ) имеют прямое отношение к разработке структурных схем оптического диапазона. Синтезаторы этого диапазона успешно реализованы на основе фемтосекундного титан-сапфирового лазера. Синхронизация абсолютного значения оптической частоты и частоты биений продольных мод этих лазеров невозможна без систем синтеза в радиодиапазоне для связи с первичным цезиевым эталоном частоты, что показано в работах [37, 39, 48, 49, 50, 51, 52]. На этом пути возможен переход от метрологической вертикали к метрологической сети, которая менее уязвима, в том числе, при террористических актах.

### 1. Синтезаторы частот радиодиапазона

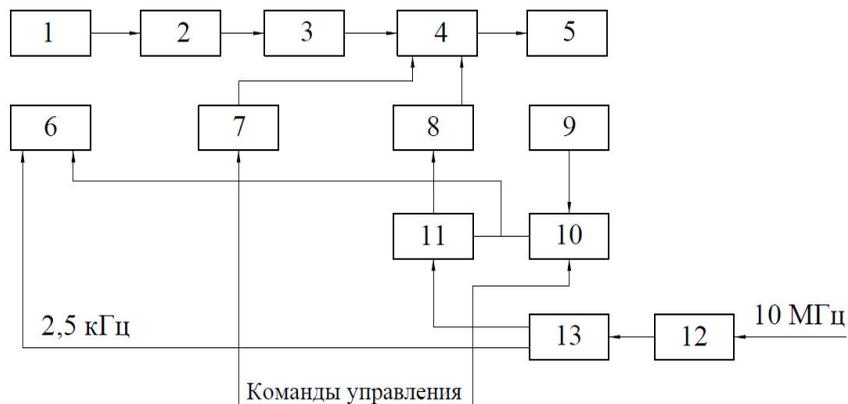
Существует два принципа построения синтезаторов частот: принцип прямого и косвенного синтеза [10]. Первый из них основан на выполнении четырёх арифметических действий с частотой опорного сигнала и последующей фильтрацией при помощи сменных фильтров. При косвенном синтезе выходной сигнал создаётся диапазонным генератором, частота которого синхронизирована

системой фазовой автоматической подстройки частоты [ФАПЧ] с частотой опорного сигнала. Выходной сигнал синтезатора обладает такими техническими характеристиками, как разрешающая способность установки частоты, число значащих цифр и время установления при переключении. Методы и пути построения синтезаторов метровых и дециметровых волн, их классификация, достоинства и недостатки, представлены в книге [11]. Коэффициент деления устанавливается командой управления в двоичном коде. В синтезатор входит система автоматического поиска полосы захвата, включающая цифровой фазовый детектор. (рис.1.)

Представляет интерес система синтеза частот (рис. 2), предложенная в работе [12]. Принятые в ней меры повышения спектральной чистоты выходного колебания позволяют реализовать преимущества, присущие высокостабильным по частоте и фазе генераторам различных диапазонов. В качестве опорного генератора обычно используется кварцевый генератор с  $f_0=100\text{МГц}$ . Частота стабилизируется с помощью системы ФАПЧ

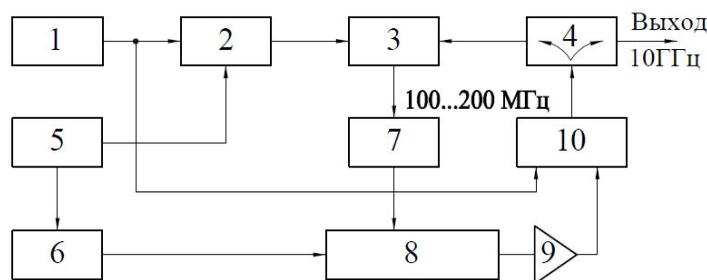
по частоте цезиевого стандарта. Частота тракта переноса образуется путём умножения и фильтрации в кольце ФАПЧ частоты кварцевого генератора. В полосе регулирования ФАПЧ примерно до  $100\text{кГц}$  спектральная плотность  $S_\phi(F)$  определяются шумами опорного КГ, а в дальнейшей зоне – шумами управляемого генератора СВЧ. В качестве последнего используется генератор с резонатором на железиттриевом гранате, обеспечивающим добротность около 4000. В результате при  $F=10\text{кГц}$   $S_\phi(F)\approx -105\text{дБ/Гц}$  на частоте выходных колебаний  $10\text{ГГц}$ . В диапазоне  $10\dots 20\text{МГц}$  частоты синтезатора формируются последовательным включением цифровых синтезаторов частоты с шагом шкалы  $100\text{кГц}$ , охваченных системой ФАПЧ. На выходе каждого цифрового синтезатора устанавливается делитель частоты на 10. В каждом кольце ФАПЧ для обеспечения предельной спектральной чистоты выходного колебания применяются управляемые генераторы с электронной перестройкой.

Метод радиоимпульсного преобразования нашёл применение в синтезаторе частот. С помо-



1-усилитель постоянного тока, 2-фильтр, 3-пропорциональный интегрирующий фильтр, 4-генератор импульсного напряжения, 5-выход, 6-цифровой фазовый детектор, 7-схема коммутации поддиапазона, 8-формирователь ступенчатого напряжения, 9-усилитель, 10-делитель переменных коэффициентов, 11- цифровой частотный детектор, 12-блок управления, 13-делитель фиксированных коэффициентов деления.

Рисунок 1 – Структурная схема синтезатора частот радиодиапазона



1-блок управления, 2-фильтр, 3-смеситель, 4-выход, 5-кварцевый генератор, 6- синтезатор частот, 7-делитель частот, 8-фазовый дискриминатор, 9-усилитель, 10- ЖИГ генератор.

Рисунок 2 – Структурная схема синтезатора частот 10 ГГц

щью радиоимпульсных преобразователей можно получить в одном каскаде коэффициент умножения частоты порядка нескольких сотен, а амплитуду гармоник наибольшей независимо от коэффициента умножения [13].

Принцип построения радиоимпульсных преобразователей частоты в различных частотных диапазонах на колебательных системах с сосредоточенными и распределёнными параметрами показан на рис. 3.

В отличие от обычных умножителей и смесителей выходным сигналом являются гармоники спектра последовательности радиоимпульсов. Колебания имеют вид радиоимпульсов с частотой заполнения, периодом повторения и формой огибающей, соответствующей видеоимпульсу. Следует отметить, что принцип построения радиоимпульсных преобразователей может быть применен в оптическом диапазоне в синтезаторе частот.

## 2. Радио-оптический частотный мост (РОЧМ)

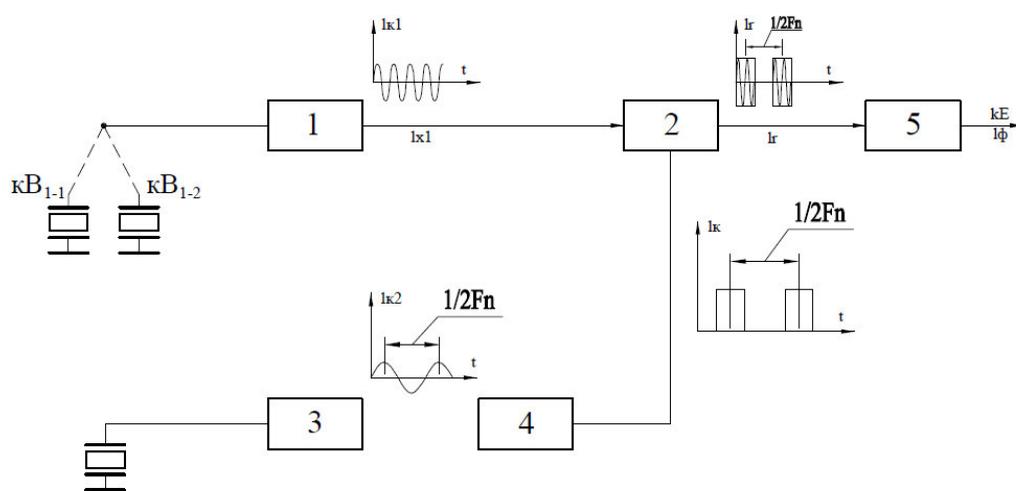
Диапазон частот лазеров ИК и видимого спектра, в котором находится большинство эталонных линий поглощения, составляет интервал от 29 до 617 ТГц. Традиционные частотные измерения использовали радио-оптические синтезаторы на основе прямого синтеза гармоник сигналов промежуточных лазеров. Такие цепи синтеза представляют довольно сложные системы. Они включают в себя несколько каскадов стабилизированных промежуточных лазеров, обладающих высокой точностью и стабильностью, как в радио, так и в оптическом диапазонах. Кроме того, требовались соответствующие фотоприёмники и нелинейные элементы для генерации гармоник

высокого порядка. Некоторые фазо-когерентные цепи синтеза связаны с цезиевым первичным стандартом: Cs-HeNe/I<sub>2</sub> (633нм) [14], Cs-HeNe/CH<sub>4</sub> (3,39 мкм) [15], Cs-HeNe/I<sub>2</sub> (576 нм) [16], Cs-CO<sub>2</sub>/OsO<sub>4</sub> (10 мкм) [17], Cs-<sup>40</sup>Ca [9].

В работе [9] представлены первые фазо-когерентные частотные измерения в видимой области спектра с помощью радио-оптического частотного моста. Было измерено абсолютное значение частоты, соответствующей комбинационному переходу атомов кальция изотопа <sup>40</sup>Ca, помещенных в магнитно-оптическую ловушку. СКО=0,43кГц,  $\Delta f/f = 10^{-12}$ . Переход <sup>3</sup>P<sub>1</sub>-<sup>1</sup>S<sub>0</sub> <sup>40</sup>Ca, обеспечивающий ширину линий поглощения 400 Гц, является эталонным для оптического стандарта частоты  $f = 455986240493,93$  кГц.

Фазо-когерентный синтезатор (РОЧМ) включает в себя лазер на красителе, и первичный стандарт частоты и времени <sup>133</sup>Cs. Такой синтезатор позволяет одновременно измерять частоты HeNe/CH<sub>4</sub>  $\lambda=3,39$  мкм и CO<sub>2</sub>/OsO<sub>4</sub>  $\lambda=10,6$  мкм. Все частоты промежуточных лазеров связаны по фазе с частотой первичного эталона. Варианты других структурных схем РОЧМ и результаты измерений частот стабилизированных лазеров приведены в работах [18-19].

В работе [19] предложена более простая структурная схема синтезатора. Схема основана на делении частотного интервала от оптического до микроволнового диапазонов. Успешная работа ключевых систем синтезатора достигалась применением эффективных элементов преобразования частот, точностью синхронизации диодных лазеров и известной схемой оптического генератора шкалы частот. Предложенный метод деления частотных интервалов значительно упрощает структурную



1, 3 – кварцевые генераторы, 2-модулятор, 4-импульсный генератор, 5-фильтр.

Рисунок 3 – Структурная схема синтезатора частот с радиоимпульсным преобразованием

схему радио-оптического частотного моста [20]. Таким образом, наметилась тенденция к практической реализации более простых структурных схем синтезатора. Схемы включают делители частоты [19], оптические параметрические генераторы (ОПГ) [21], генераторы дискретного множества частот (ГДМЧ) [22], сумматоры частот ИК диапазона [23]. Используется деление частот на три [24], четырёх волновое смещение в лазерном диоде [25] и деление частоты на девять [26].

Одной из наиболее перспективных структурных схем синтезатора является синтез путём генерации оптического дискретного множества частот с помощью электрооптического модулятора (ЭОМ) помещенного в оптический резонатор с малыми потерями [24]. Оптические резонаторы с несущей частотой и гармониками боковых полос создают калиброванный спектр с полосой несколько ТГц.

Делитель оптической частоты на 3 дает возможность синхронизовать фазу стандарта  $^{88}\text{Sr}^+$  ( $f=445\text{ТГц}$ ) с фазой лазера  $\text{Tm:YAG}$  ( $f=148\text{ТГц}$ ) [27]. Подобная схема синтеза реализует фазо-когерентную связь стандарта частоты в инфракрасной области спектра на длине волны 1596 нм с длиной волны 780 нм. Линии  $D_2$  перехода  $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{5/2}$   $^{87}\text{Rb}$  [28].

В лаборатории мер и весов Франции [29] предложена и реализована модернизированная структурная схема синтезатора частот. РОЧМ от цезиевого эталона частоты до эталона частоты  $\text{CO}_2/\text{O}_5\text{O}_4$  лазера был дополнен каскадами промежуточных лазеров и перекрыл полный спектр от  $^{133}\text{Cs}$  до ультрафиолетового диапазона. РОЧМ позволил измерить абсолютное значение частоты 385,3 ТГц, соответствующее двухфотонному переходу  $^{85}\text{Rb}$ . Два лазерных диода были синхронизованы со спектром поглощения рубидия с погрешностью  $\pm 10$  Гц. Были измерены частоты  $\text{He-Ne}/\text{CH}_4$  и  $\text{He-Ne}/I_2$  лазеров с погрешностью не более  $7 \times 10^{-12}$ . Лазер на центрах окраски  $\text{KCl:Li(CCL)}$  перекрывает диапазон (2,4-2,8) мкм. Лазерные диоды работают в диапазоне (1,2-1,4) мкм. Вторая гармоника этих лазеров (0,6-0,7) мкм синхронизована с частотой стандарта  $^{40}\text{Ca}$  ( $\lambda=657\text{нм}$ ). Частоты, соответствующие переходу  $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{5/2}$   $^{85}\text{Rb}$ , использованы для абсолютных измерений частоты излучения лазеров  $\text{He-Ne}/^{127}\text{I}_2$  ( $\lambda=633\text{нм}$ ) и  $\text{He-Ne}/\text{CH}_4$  ( $\lambda=3,39\text{мкм}$ ). Погрешность не превышала значения  $\pm 5$  кГц.

Традиционный радио-оптический частотный мост (РОЧМ) успешно использован в измерении абсолютных значений оптических частот лазеров

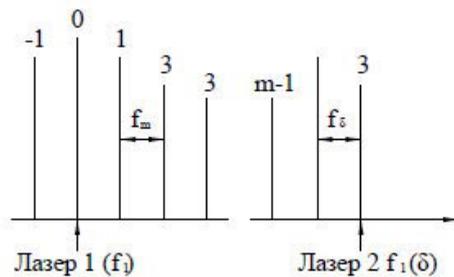
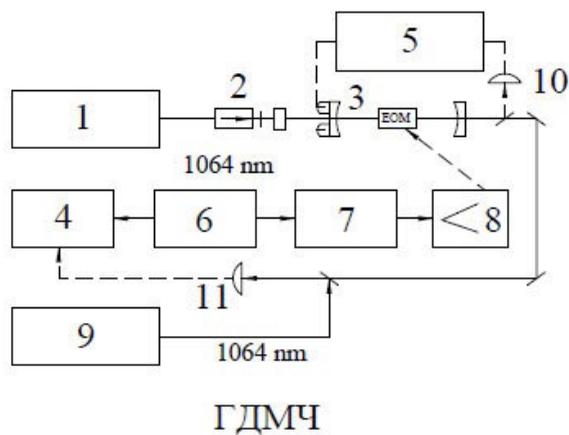
[54]. Так в международных сличениях частота излучения лазера (INMS-3) Национального исследовательского центра Канады была измерена с помощью оптического стандарта на одиночном ионе  $^{88}\text{Sr}^+$  и системы (РОЧМ). Абсолютное значение частоты второго лазера (JILA-145) США было измерено однокаскадным фемтосекундным титан-сапфировым синтезатором. Эти измеренные частоты сравнивали. Погрешность не превышала значений  $\pm 770\text{Гц}$

### 3. Генераторы дискретного множества частот (ГДМЧ)

Множество дискретных частот было получено с помощью электрооптического модулятора, размещенного внутри оптического резонатора типа Фабри-Перо [30]. Спектр боковых частот в полосе 3 ТГц возбуждался на частоте 10,5 ГГц. Широкополосный фазомодулированный параметрический генератор реализован в работе [31]. ГДМЧ состоит из параметрического генератора с фазовым модулятором. Генератор возбуждался излучением лазера  $\lambda=532$  нм. В диапазоне 1,5 мкм была получена полоса генерации мод в оптическом диапазоне равная 50 ТГц [32]. Пикосекундные импульсы с частотой повторения 20 ГГц были реализованы в ГДМЧ [33]. Высокие гармоники микроволнового диапазона использовались в дискретном множестве частот [34]. Оптический ГДМЧ  $\lambda=1064$  нм с частотой модуляции 2 ГГц в электрооптическом модуляторе (ЕОМ) реализован и подробно описан в работе [35].

В работе [36] впервые наблюдали с помощью оптического ГДМЧ дополнительные сверхтонкие структуры в спектре  $^{127}\text{I}_2$  в низкочастотной области (рис.4).

Два  $\text{Nd:YAG}/I_2$  лазера монолитной кольцевой конструкции резонатора были стабилизированы на длине волны 532 нм по сверхтонким структурам  $^{127}\text{I}_2$  [37]. ИК луч лазера 1 ( $\lambda=1064$  нм) направляли во внешний интерферометр Фабри-Перо с кристаллом  $\text{LiNbO}_3$  модулятора. Микроволновый резонанс на частоте 2 ГГц и полосой 10 МГц возбуждался радиочастотным синтезатором, синхронизованным с цезиевым стандартом частоты. Модулятор размещён посредине оптического резонатора сфера-сфера с радиусом кривизны 500 мм длиной 125 мм. Коэффициент отражения зеркал 98%. Резонатор синхронизован с излучением лазера 1 системой АПЧ. Сигнал биения частот с лазером 2 ( $\lambda=1064$  нм) и ГДМЧ детектировался лавинным



1, 9 – лазеры Nd:YAG/I, 2 – фазовращатель, 3 – внешний интерферометр Фабри-Перо, 4 – частотомер, 5 – система АПЧ, 6 – цезиевый стандарт частоты, 7 – синтезатор частот 2ГГц, 8 – усилитель мощности, 10, 11 – фотодиоды.

Рисунок 4 – Структурная схема генератора дискретного множества частот

фотодиодом 11 и далее направлялся на электронно-счетный частотомер. Все измеренные частоты инвертировались в зеленую область спектра  $\lambda=532$  нм. Частотные интервалы между колебательными переходами  $^{127}\text{I}_2$  в области спектра 532 нм были измерены относительно компоненты  $a_{10}$  перехода линии R (56) 32-0 с помощью оптического ГДМЧ. Девиация частоты биений не превышало 80 Гц при  $\tau=1$ с. Конструкция другого электрооптического фазового модулятора использует отрезок микроволнового волновода с кристаллом  $\text{LiNbO}_3$  ( $1,25 \times 10 \times 200$  мм в кубе). Волноводный электрооптический модулятор расположен внутри оптического резонатора для повышения эффективности его работы. Частота модуляции 5,8 ГГц, мощность возбуждения 10 Вт [36].

Структурная схема ГДМЧ, использующего комбинации суммы и разности частот двух лазеров и смесителей на нелинейных кристаллах, представлены в работе [38]. Оптический Фурье синтезатор генерирует короткие световые импульсы. Отдельные лазерные генераторы на разных частотах синхронизируются системой АПЧ и используя гармоники и суммы частот. Два синхронизованные по фазе непрерывные лазеры генерируют  $f_1=2f$ ,  $f_2=3f$  и образуют шесть когерентных частот  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ ,  $5f$ ,

$6f$ , составляющие ГДМЧ.

О возможности использования фемтосекундного титан-сапфирового лазера в структурных схемах ГДМЧ сообщалось в работе [39]. Эти лазеры генерировали короткие (10-20 фс) импульсы при мощности накачки 5 Вт во всех линиях. Ширина полосы контура излучения лазера простиралась от 520 до 1200 нм.

Конструкция компактного беспризменного фемтосекундного титан-сапфирового лазера с многоходовым резонатором предложена в работе [40]. Лазер обеспечивает эффективную работу при низком пороге возбуждения. Авторы увеличили выходную мощность за счёт резонатора многоходовой оптической схемы. При эффективной длине резонатора 5 метров изготовлена компактная конструкция лазера, луч которого очерчивает площадь размером  $30 \times 45 \text{ см}^2$ . При мощности накачки 1,5 Вт Nb:YVO<sub>4</sub> лазер  $\lambda=532$  нм генерирует импульсы 23 фс с частотой повторения 31,25 МГц и средней мощностью 88 мВт.

ГДМЧ на основе титан-сапфирового беспризменного лазера с самокалибровкой спектра излучения получен авторами [41]. Компенсация дисперсии обеспечивается chirпированными зеркалами и  $\text{BaF}_2$  клиньями.

В работе [42] исследуется фемтосекундный лазер с резонатором в виде сложенного кольца в котором для компенсации дисперсии применили низкодисперсионные призмы из фторида лития. Кольцевой резонатор имеет ряд преимуществ: лазер менее чувствителен к возвращению луча назад в резонатор и менее вероятна генерация спутников или двойных импульсов. Симметричная схема кольцевого резонатора позволяет получить фемтосекундный режим в центре области устойчивости резонатора.

Фемтосекундный титан-сапфировый кольцевой лазер с частотой повторения импульсов 2 ГГц и длительностью импульса 23 фс реализован в работе [43]. Лазер обладал высокой средней мощностью излучения, малыми габаритами и высоким отношением сигнал/шум при регистрации частоты биений продольных мод. Чирпированные зеркала с высоким коэффициентом отражения позволяют генерировать импульсы длительностью 50 фс с частотой повторения несколько ГГц. Титан-сапфировый кристалл  $L=2,2$  мм с коэффициентом поглощения  $5\text{см}^{-1}$  и  $\lambda=532\text{нм}$  установлен под углом Брюстера.

Вторая гармоника  $\text{Nb:YVO}_4$  лазера [44] мощностью 3,7 Вт фокусируется на кристалл хром-форстерита. Фемтосекундный кольцевой лазер генерирует импульсы 30 фс с частотой повторения 420 МГц средней мощностью 500 мВт. Компактная твердотельная конструкция и широкий спектральный диапазон сделали этот лазер привлекательным для телекоммуникационных систем в диапазоне 1,3-1,5 мкм. Дополнительное расширение спектра в диапазоне длин волн 1,06-2,17 мкм осуществлялось отрезком кристаллического волокна. ГДМЧ может быть синхронизован с оптическим стандартом частоты. Ст-форстерит кристалл с коэффициентом поглощения  $\alpha=1,1\text{см}^{-1}$ , на  $\lambda=1075$  нм размещен под углом Брюстера между двумя сферическими зеркалами с радиусом кривизны 5 см. Кристалл размещен в медном блоке охлаждаемом до  $0^\circ\text{C}$  с целью достижения более высокого коэффициента усиления. Лазер установлен на температурно-регулируемую плиту. Пороговая мощность накачки равна 1,5 Вт. Одно из зеркал резонатора укреплялось на пьезоэлементе для управления частотой лазера.

Пятиэлементный титан-сапфировый фемтосекундный кольцевой ГДМЧ [45] излучает широкополосный спектр в диапазоне от 560 до 1150 нм. Частота межмодовых биений равна 1 ГГц.

Дальнейшее совершенствование титан-сапфировых лазеров с высоким значением частоты

межмодовых биений описано в работах [43], [46]. В [46] рассмотрены фемтосекундные титан-сапфировые с частотой межмодовых биений порядка 4 ГГц. В этой области достигается наибольшее отношение сигнал/шум при детектировании полезного сигнала. Однако для синхронизации и самокалибровки ГДМЧ рекомендована частота 1,4 ГГц. Ограничение вызвано энергией импульса, достаточной для полосы самокалибровки.

Частотный интервал 5 ГГц является достаточным для пространственного и частотного разделения мод и их регистрации в двухразмерном формате.

Прямой доступ к нумерации индивидуальных мод в параллельной архитектуре обеспечивает уникальную возможность для новой техники спектроскопии с высоким разрешением. Появилась возможность контроля за амплитудой и фазой каждой моды. Описание конструкции фемтосекундного лазера приведено в работах [43], [47]. Часть мощности с выхода лазера 120 мВт направляли в спектрометр с высоким разрешением, включающий в себя VIPA (virtually imaged phase array) виртуальное изображение фазовой решетки. ГДМЧ другой конструкции излучал фемтосекундные импульсы длительностью 42 фс с частотой повторения мод 10 ГГц. Спектральное расширение контура усиления обеспечивалось отрезком микроструктурного волокна. Ширина контура 250 нм дает возможность генерации 500 продольных мод с мощностью 1 мВт в каждой моде. Авторам [47] удалось наблюдать спектр линии  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$  ( $\lambda=780$  нм, переход  $5S_{1/2}$  à  $5D_{3/2}$ , 6,8 ГГц).

Титан-сапфировый кристалл возбуждался излучением мощностью 6,5 Вт лазера на длине волны 532 нм. Радиус кривизны зеркал равен 8 мм и общая длина резонатора равна 30 мм. Полная ширина спектра излучения составляла диапазон 500-950 нм. Каждая индивидуальная мода ГДМЧ разрешалась дифракционным спектрометром с шагом 2400 линий/мм. Основная известная оптическая частота, соответствующая переходу линий  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$ , может быть использована для синхронизации всех мод ГДМЧ. Кроме того мощность любой индивидуальной моды может быть использована для спектроскопии насыщенного поглощения в переходе  $^{87}\text{Rb}$ . Спектральное разрешение достигает величины порядка  $10^{-10}$ . Комбинация ГДМЧ с техникой насыщенного поглощения в парах рубидия позволяет идентифицировать индекс мод и измерить сдвиг спектра континуума  $f_c$ .

#### 4. Фемтосекундный титан-сапфировый лазер в структурных схемах синтезаторов частот оптического диапазона

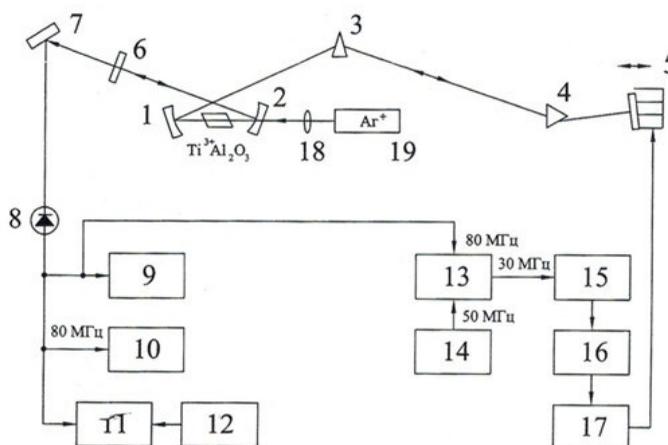
Первый синтезатор оптических частот на основе фемтосекундного лазера был реализован в 1998 году. Моды стабилизированного фемтосекундного титан-сапфирового лазера были использованы как масштабная линейка при передаче значения частот всей шкалы от видимого до радиочастотного диапазонов [39]. Прямое преобразование Фурье периодической последовательности коротких импульсов приводит к области дискретного множества продольных мод. Появление фемтосекундных титан-сапфировых лазеров обеспечили необходимую полосу усиления частот 20 ТГц. Возможность стабилизации и контроля широкой полосы спектра позволяет эффективно его использовать в качестве генератора дискретного множества частот ГДМЧ. Однако лазер имеет две степени свободы перемещения спектра. Дисперсия резонатора и кристалла приводит к разности фазовой и групповой скоростей при многопроходном поступательном движении импульса внутри резонатора. В частотной области этот эффект приводит к сдвигу всего множества частот в сторону их увеличения на величину  $f_c$  от точного значения мод резонатора. Во временной области происходит фазовое скольжение между несущей и огибающей частот спектра. В этом случае возникла необходимость активной стабилизации частоты межмодовых биений к частоте стандарта и компенсацию сдвига. Абсолютное значение может быть определено выражением  $f_x = f_c + n \cdot f_{\text{мно}}$ ,  $n$ -целое число

межмодовых интервалов. Для компенсации сдвига необходимо расширение спектра ГДМЧ на октаву с помощью кристаллического волокна. Метод компенсации предполагает удвоение частоты длинноволновой части спектра и интерференцию с коротковолновой частью ГДМЧ.

Для компенсации эффектов, связанных с дисперсией импульсов внутри резонатора лазера устанавливают призмный компенсатор. Схема на рис.5 поясняет ход лучей в резонаторе лазера [48].

Излучение системы, образованной сферическими зеркалами  $R=80$  мм проходит последовательно призмы 3,4. После прохождения призмы 4 луч отражается от зеркала 5, укрепленного на пьезокерамике КП1. Плоское зеркало 6 является выходным. Коэффициент пропускания зеркал 3-5%. Вспомогательное зеркало 7 направляет излучение лазера мощностью 150 мВт на фотоприемник 8. Титан-сапфировый кристалл с брестеровскими гранями крепится в охлаждаемом держателе внутри резонатора, образованного зеркалами. Излучение аргонового лазера «Инверсия» мощностью 5 Вт фокусируется линзой 18 на кристалл.

Коэффициент отражения зеркал резонатора лазера 99,9% в диапазоне длин волн 700-900 нм. Фемтосекундный лазер излучал последовательность импульсов длительностью 70 фс с частотой повторения 80 МГц. Ширина спектра выходного излучения достигала 20 нм. Измерительный блок состоит из группы радиоизмерительных приборов 9-17: С1-91, ЧЗ-34 для измерения частоты межмодовых биений. Анализатор спектра СК4-56 и син-



1, 2, 5, 6-зеркала лазера, 7-вспомогательное зеркало, 8-фотодиод ЛФД-2, 3,4-призмный компенсатор, 9-осциллограф С1-91, 10-частотомер ЧЗ-34, 11-анализатор спектра С4-56, 12-синтезатор частот Ч6-31, 13-смеситель, 14-синтезатор частотомера ЧЗ-38, 15-усилитель промежуточной частоты, 16-частотный детектор, 17-усилитель постоянного тока.

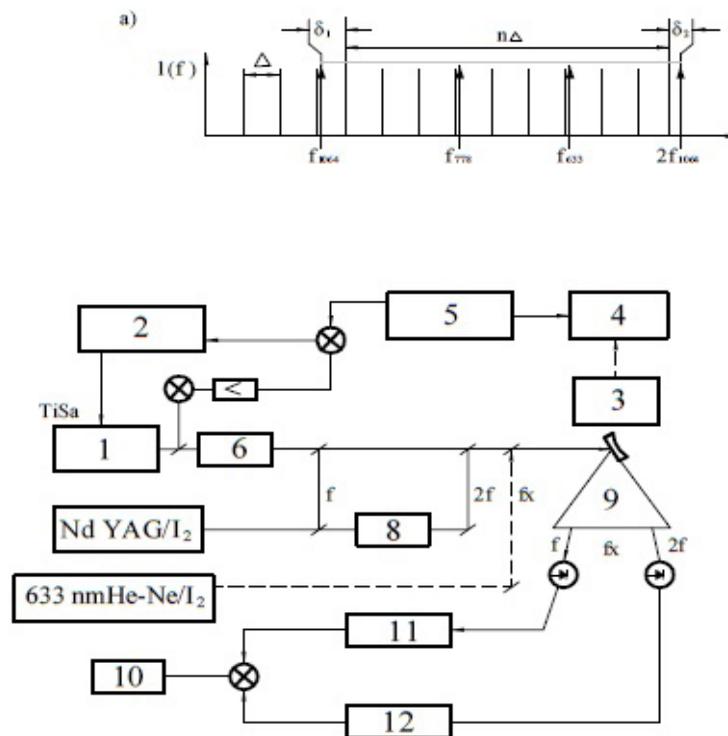
Рисунок 5 – Структурная схема фемтосекундного титан-сапфирового синтезатора Фемто-1

тезатор частот Ч6-31 преобразуют частоту сигнала биений мод 80 МГц в более низкую 20 кГц. Функциональная схема системы автоматической настройки резонатора лазера на среднее значение разброса частот межмодовых биений включает в себя смеситель частот, синтезатор частотомера Ч3-38, усилитель промежуточной частоты, частотный детектор. Сигнал с выхода частотного детектора через усилитель постоянного тока управляет перемещением зеркала резонатора лазера. В режиме синхронизации и стабилизации мод система АПЧ сохраняет среднее значение  $f_{\text{мбс}}$  погрешностью  $\pm 3$  Гц. Широко используемая структурная схема фемтосекундного синтезатора на основе титан-сапфирового лазера (ГДМЧ) приведена на рис. 6. Схема объединяет в единую систему ГДМЧ и стабилизацию ФАП [49]. ФАП синхронизирует по фазе с цезиевым стандартом частоты через радиочастотный синтезатор 10 ГГц и рубидиевый стандарт продольные моды ГДМЧ [50]. Расширение спектра излучения ГДМЧ реализуется отрезком фотонно-кристаллического волокна. Излучение Nd:YAG/I<sub>2</sub> лазера 1064 нм направляют на умножитель частоты кристалл бората бария и

совмещают с излучением ГДМЧ. Пространственное разделение спектра происходит на дифракционной решетке для детектирования сигналов биений частот лазеров.

Компенсация сдвига полного спектра ГДМЧ реализуется акусто-оптическим модулятором, регулирующим мощность возбуждения кристалла. Существует и другой вариант устройства для компенсации сдвига спектра ГДМЧ [51]. Этот вариант реализует техника самокалибровки. Лазер Nd:YAG/I<sub>2</sub> исключается и используется собственный спектр ГДМЧ. Длинноволновая часть спектра генерирует вторую гармонику кристаллом бората бария. Коротковолновая часть спектра направляется через АОМ. Модулятор сдвигает спектр и компенсирует первоначальное смещение. Фемтосекундный титан-сапфировый лазер возбуждался второй гармоникой Nd:YVO<sub>4</sub> лазера на длине волны 532 нм. Лазер генерирует импульсы длительностью 10 фс с частотой повторения 90 МГц. Контур излучения расширенного спектра находится в диапазоне 510-1125 нм.

Абсолютные измерения частот гелий-неоновых лазеров, стабилизированных по резонансам



1-титан-сапфировый лазер, 2-система ФАП, 3-цезиевый стандарт частоты, 4-рубидиевый стандарт, 5-10ГГц-синтезатор частот, 6-отрезок кристаллического волокна, 7-лазер Nd:YAG/I<sub>2</sub> стабилизированный по резонансу поглощения иода 127, 8-умножитель частоты на кристалле бората бария, 9-дифракционная решетка, 10 -частотомер, 11 12 –осциллографы.

Рисунок 6 – Функциональная схема фемтосекундного титан-сапфирового синтезатора.  
ба- спектр частот лазеров; бб – функциональная схема

поглощения в йоде были выполнены с помощью фемтосекундных синтезаторов на основе титан-сапфировых лазеров. Подробности измерительных установок приведены в работах [49, 51]. Измеренное значение компоненты  $i$  линии 11-5 R127 равно 473611941089 (ско 0,3 кГц).

Другая схема радиочастотного стандарта для стабилизации ГДМЧ была реализована в центре измерительных стандартов [52]. Частота межмодовых биений синхронизована с генератором 1 ГГц. Сигнал этого генератора синтезирован от двух кварцевых генераторов 10 МГц и 100 МГц с низким уровнем шума. Кварцевый генератор 10 МГц синхронизован с рубидиевым стандартом частоты с погрешностью  $2 \cdot 10^{-11}$ . Долговременная стабильность поддерживалась синхронизацией с цезиевым стандартом частоты в ChuugheaTelecomTaiwan через глобальную позиционирующую систему GPS с воспроизводимостью  $5 \cdot 10^{-12}$ . В центре измерительных стандартов оптический синтезатор на основе фемтосекундного титан-сапфирового лазера внедрен в систему периодического контроля эталонов Nd:YAG/ $I_2$ . Лазер 532 нм стабилизирован по компоненте  $a_{10}$  линии R(56) 32-0 перехода в  $^{127}I_2$  с нестабильностью  $3 \cdot 10^{-12}$ . Измеренное значение на длине волны 532 нм равно 583260223482 кГц.

В работе [53] реализована передача сигнала эталонного лазера на длине волны 1062 нм в диапазон синхронизируемого лазера на длине волны 1542 нм. Погрешность синхронизации не превышала величину  $4 \cdot 10^{-18}$  при времени усреднения 1 с. Фемтосекундный лазер обеспечил довольно широкую полосу спектра продольных мод в диапазоне от 1000 нм до 2000 нм. Таким образом, была реализована фазокогерентная связь эталонного лазера с синхронизируемым лазером.

Представленная техника позволяет синхронизовать по фазе частоту любого лазера в диапазоне 1000-2000 нм. Генерация второй гармоники этого лазера расширяет возможности синхронизации лазеров в видимом диапазоне спектра и дает возможность абсолютных измерений частот этих лазеров.

### Заключение

В обзоре представлен сравнительный анализ и технические характеристики синтезаторов частот. Кратко обозначена эволюция структурных схем от радиодиапазона до оптического. Подробно рассмотрен радиоимпульсный метод преобразования частот (ГДМЧ). Этот метод получил дальнейшее

развитие в оптическом диапазоне как оптико-импульсное преобразование частот. Фемтосекундный лазер стал основой однокаскадного синтезатора. Поэтому в обзоре подробно рассмотрены реальные структурные схемы синтезаторов частот оптического диапазона на основе фемтосекундного титан-сапфирового лазера. Обобщение результатов сравнительного анализа указанных синтезаторов позволяет развить далее данное научное направление и передать значение единицы длины-метра в нанодиапазон.

### Список литературы

1. Parker T. E. Metrologia, 47, (2010) 1
2. Hinkley N., Sherman J.A., Phillips N.B., Schip-po M., Lemke N.D., Beloj K., Pizzocaro M., Oates C.W., Ludow A.D Sciens, 341, (2013) 1215
3. Quinn J. J. Metrologia . 36, (1999) 214
4. Bergquist J. C. , Curtis E.A., Driellinger R. E., Hollberg L., Itano W.M., Lee W. D. ,Oates C.W., Vogel K.R., Wineland D.J. Science 293, (2001) 825.
5. Barwood G.P, Margelis G., Huang G. Gill P. and Klein I. A. Phis. Rev. Lett. 93, ( 2004) 133001.
6. Schnatz H., Lipphardt B., Degenhard C., Peik F., Schulider T., Sterr U., Tamm C . IEEE Trans. Instrum. Measure. 54, (2005) 750
7. Eichenserr. G., Nevsky A.Y., Schwedes C., Zan-ther J., and Walther H. J. phys. B. At. Mol. Opt. phys. 36, (2003) 553.
8. Robertson J. Yb. L., Picard S., M a L. S., and Hall J.L. IEEE Trans. Instrum. Meas. 48, (1999) 544.
9. Snats H., Lipphart B., Helmke J., Riehle F. Phys. Rev. Lett. 76, (1996) 18.
10. Рожков А.В. , Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1991. – 263с.
11. Левин В. А., Малиновский В. Н., Романов С. К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. – М.: Радио и связь, 1989. – 232с.
12. Левин В. А. Стабилизация дискретного множества частот. – М.: Энергия, 1977. – 327 с.
13. Григулевич В. И. Имореев И. Я. Радиоимпульсное преобразование частоты. – М.: Сов. радио, 1966. – 375с.
14. Acef O. Zandy J., Aded M. Opt. Commun. 97 (1993), 29.
15. Evenson K. M., Wells J. S., Peterson F R., Danielson B. L., Daj G. W. Appl. Phys. Lett. 22, (1973) 192.
16. Pollack C. R., Jenings D. A., Peterson D. K. Opt. Lett. 8 , (1983) 133.

17. Chiron A., Hamani B., Filimon A. IEEE Trans. Instr. Meas. 34, (1985) 263.
18. Привалов В. Е. Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. – Л.: Судостроение, 1989. – 237 с.
19. Telle H. R., Meschede D., Hansch T. W. Opt. Lett. 15, (1990) 532.
20. Nakagawa K., Kouragi M., Ohtsu M. Appl. Phys. B 57 (1993) 425.
21. Wong. N.C. Opt. Lett. 15, (1990) 1129.
22. Kouragi M., Nakagawa K., Ohtsu M. IEEE. Qunt. Elect. 29, (1993) 2693.
23. Vonback D. A., and Hollberg L. Opt. Lett. 19, (1994) 1586.
24. Prister O., Murtz M., Welss J.S. Opt. Lett. 2. (1996) 1387.
25. Koch C., and Telle L.A. Optical. Physics 13, (1990) 1066.
26. Nee P. T., and Wong N.R. Opt Lett . 23, (1998) 46.
27. Bernard J.E., Whitford B.G., and Marmet L. Opt. Lett. 24 (1999) 98.
28. Slusarev S., Ikegami T., and Ohehima S. Optic. Lett. 24 (1999) 24.
29. Tourahri D., Acef O., Klairon A., Zondy J. J., Felder R., Nilico L., Beanvour B., Biroden F., Nes F. Optical. Comm. 133, (1997) 471.
30. Geng J., Wada S., Urata Y., and Taschito H. Opt. lett. 24, (1999) 676.
31. Diddams S.A., Ma L.S., Ye J., and Hall. J.L. Opt. lett. 22, (1997) 1015.
32. Brathers L. R., and Wong N. C. Opt. Lett. 22, (1997) 1025.
33. Xiao S., Hollberg L., and Diddams S A. Opt.Lett. 34, (2009) 85.
34. Sterr U., Lipphardt D., Wolf A., Telle H. R. IEEE Trans. Instr.Measure. 48. (1999) 574.
35. Udem T., Holzwerth R., Huntch T.W. Nature 416, (2002) 233.
36. Hong F. L., Ishikagawa J., Onae A., Matsumoto H. JOSA B1, (2001) 1416.
37. Hong F. L., Ishikawa J., Bi.Y., Zang J., Seta K., Onae A., Yoda J. IEEE Trans. Instrum. Meas. 50 (2001) 486.
38. Hansch T. W. Optics Communication 80, (1990) 71.
39. Reichert J., Holzwarth R., UdemTh., Hansch T. W. Opt. Commun. 172, (1999) 59.
40. Sennagoglu A., Kovaloviez A.M., Kartner X., and Fujimoto G. Opt.Lett. 28, (2003) 1674.
41. Mattos L., Klopner D., Kuzuci O., Schibli T. R., Kim J. Ippen E.P., Kaerther F. X. Opt. Lett. 29. (2004) 1683.
42. Бабин А. А., Куселев А. М., Курсанов А. В., Степанов А. И. // Квантовая электроника. – 2003. – № 32. – с. 401.
43. Bartels A., Dekorsy T., Kurz H. Opt. Lett. 24, (1999) 996.
44. Thomann I., Bartels A., Corwin K. L., Newbary N. R., Hollberg L. Opt. lett. 28, (2003) 1368.
45. Bartels A., and Kurz. H. Opt.Lett. 27, (2002) 1368.
46. Bartels A., Heineke D., and Diddams C. A. Opt. lett. 33 (2008) 1842.
47. Fortier T. M., Bartels A., Diddams S. A. Opt. Lett. 31. (2006) 1011.
48. Герасимов А. В., Капралов В. П., Шемко А. А. // Письма в ЖТФ. – 2007. – №33,12,89.
49. Diddams S.A., Jones D.J., Ye J., Candiff S.T., and Hall J.L. Phis. Rev. Lett. 84, (2000). 5102.
50. Diddams S A., Jones D J., Ye J., Cundiff T., Hall J. L., Ranka J. K., Wendeler R. S. IEEE Trans. Instr. Measure. 50, (2001) 552.
51. Jones D. J., Diddams S. A., Ranka J. K., Stentz A., Wendeler R. S., Hall J.L. . Candiff S. T., Science. 288. (2000) 635.
52. Akn H., Shu R. H., Wendeler R. S., and Peng J. L., IEEE Trans.Instr.Meas. . 54. (2005) 767.
53. Nicolodi D. ,Argence B. ,Zhang W. ,Targat R., Santarelli G., Coq Y. Nature photonics 8, (2014) 219
54. Багаев С. Н., Чебомаев В. П. УФН. 148, (1986) № 1, 144.