



УДК 621.317.757.018.4:621.373.826

А. Васянович, кандидат фізико-математичних наук, професор, декан факультету,
Ю. Мачехін, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,
Ю. Старчевський, кандидат фізико-математичних наук, доцент,
 Харківський національний університет радіоелектроніки,
М. Данаїлов, науковий співробітник науково-виробничої фірми «Елетра», м. Трієст, Італія

Докладно розглянуто сучасні методи вимірювання оптичних частот, зокрема прецизійного вимірювання за допомогою частотної гребінки фемтосекундного лазера частот, стабілізованих за частотою лазерів. Проведено дослідження рідкокристалічних (РК) чарунок у складі волоконного кільцевого фемтосекундного лазера й показано, у який спосіб можна управляти поляризацією мод для забезпечення їх синхронізації, поліпшити конструкцію такого лазера для його використання як робочого засобу вимірювання.

The article discussed in detail the modern methods of measurement of optical frequencies. In particular, the study examines precision measurement by means of a frequency comb of the femtosecond laser of frequencies of the lasers stabilized on frequency. The authors are conducted the researches of liquid crystal cells as a part of the fiber ring femtosecond laser. It is shown how to controll polarization of modes for ensuring their synchronization and how to improve a design of the fiber femtosecond laser in order to be used as a working measuring instrument.

Частотна метрологія й прецизійна вимірювальна техніка у сфері час-частотних вимірювань нерозривно пов'язані з науковими досягненнями у фундаментальних областях фізики. Прогрес у цьому виді вимірювань пов'язаний з активним розвитком квантової механіки й електроніки, початок яких припав на 20—30-ті роки ХХ ст. Починаючи з 40-х років, набувають активного розвитку електронні годинники, засновані на використанні радіочастотного випромінювання, пов'язаного зі стабільними квантовими переходами [1]. І. Рабі зі співробітниками [2] у 1937 році розробили резонансний пучковий метод, який дозволяв використовувати надтонкі квантові рівні

атомів цезію. Метод Рабі у сфері радіоспектроскопії забезпечив вирішення іншого завдання — створення первинного стандарту частоти на основі радіочастотних реперів, в основу яких покладено квантові ефекти. У 1949 році створено перший годинник на переході молекул аміаку в радіочастотному діапазоні, а до 1955 року вже працював годинник на пучку атомів цезію [3]. Стандарт частоти на пучку атомів цезію дуже швидко було удосконалено і досліджено у багатьох лабораторіях світу, вже у 1967 році секунду в системі SI було визначено як період часу, протягом якого атом цезію здійснює 9 192 631 770 коливань на переході надтонкої структури в основному

атомному стані. У цьому визначенні секунди не встановлювалися технічні параметри й характеристики вимірювального процесу, що дозволяло постійно удосконалювати стандарт шляхом уточнення технічних умов його реалізації. Сьогодні цезієвий стандарт залишається первинним еталоном з невизначеністю «цезієвої» секунди $1 \cdot 10^{-15}$.

Подальший розвиток стандартів часу й частоти відбувався в напрямку використання більш короткохвильового випромінювання, аж до оптичного. Уже створено ряд оптичних стандартів частоти на основі лазерних джерел випромінювання, які використовуються як вторинні стандарти часу й частоти [4].

На первісному етапі розвитку оптичних стандартів частоти використовувалися оптичні частотні реперери — лінії поглинання різних газів і пари речовин [5]. Із підвищенням вимог до стабільності й відтворюваності частоти змінювалися вимоги до частотних реперів. Останніми роками розвинено технологію лазерного охолодження атомів та іонів різних речовин, що дало можливість довести теплову швидкість атомів та іонів до декількох одиниць мікрорельєва. Ширина лінії поглинання та її стабільність у цьому випадку дозволяють значно поліпшити характеристики оптичних стандартів. Саме лазерне охолодження атомів цезію дозволило реалізувати ідею «цезієвого фонтана», яка забезпечила зменшення ширини лінії резонансу до 1 Гц. Однак, подальшого підвищення відтворюваності частоти «цезієвого фонтана» у недалекому майбутньому фахівці не очікують. Разом з тим оптичні стандарти на холодних

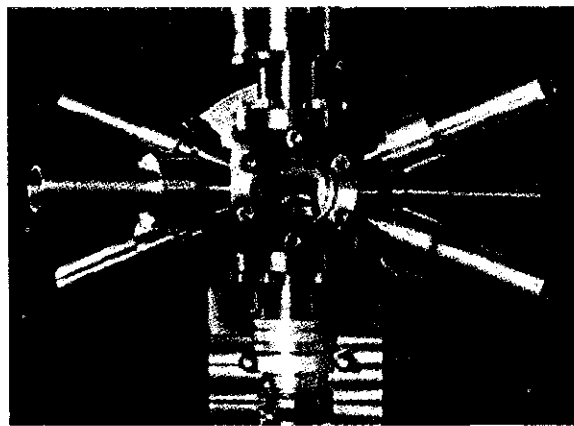


Рис. 1. Стронцієвий годинник. Оптична пастка, в якій охолоджуються іони стронцію

атомах та іонах навпаки розвиваються усе успішніше, й очікується, що невизначеність стабілізованої частоти випромінювання може зменшитися до 10^{-18} . Представимо вакуумну камеру (рис. 1), в якій шість лазерних променів забезпечують охолодження іонів стронцію й створюють «патоку» іонів [6].

Зараз до списку рекомендованих Міжнародним консультативним комітетом з довжини (CCL) стабілізованих за частотою лазерів включено двадцять один лазер. Частина з них використовує охолоджені атоми або іони як частотний репер, завдяки чому наразі вони використовуються як вторинні еталони часу й частоти.

На сайті Міжнародного бюро з мір і вагів (BIPM) представлено рисунок, на якому показано розташування деяких частот стабілізованих лазерів (рис. 2), рекомендованих для реалізації метра.

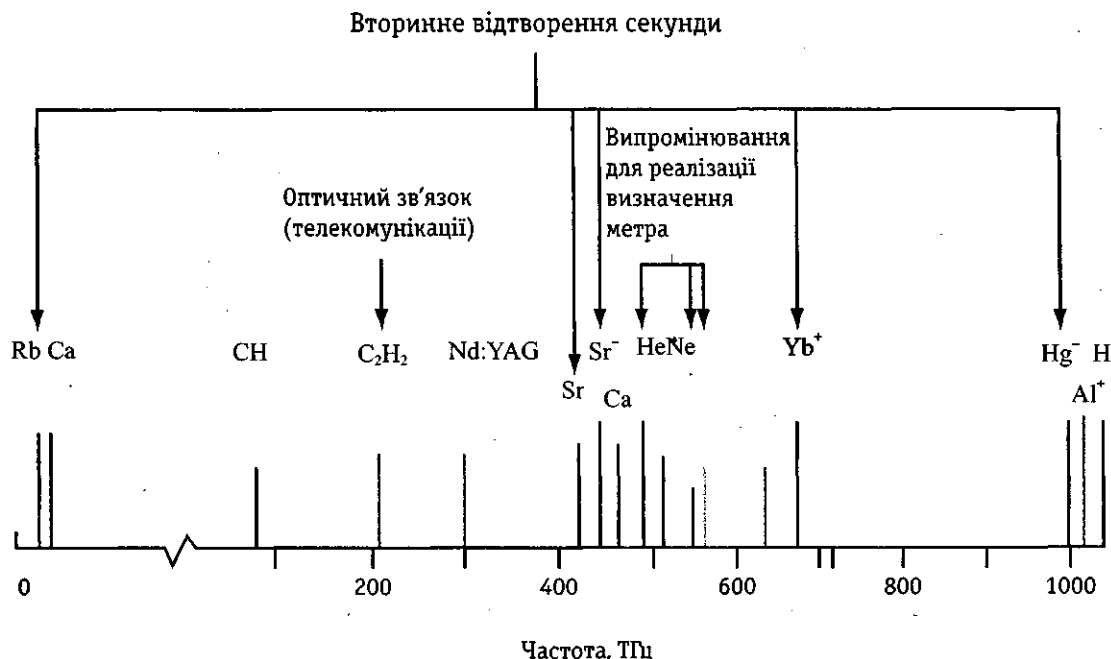
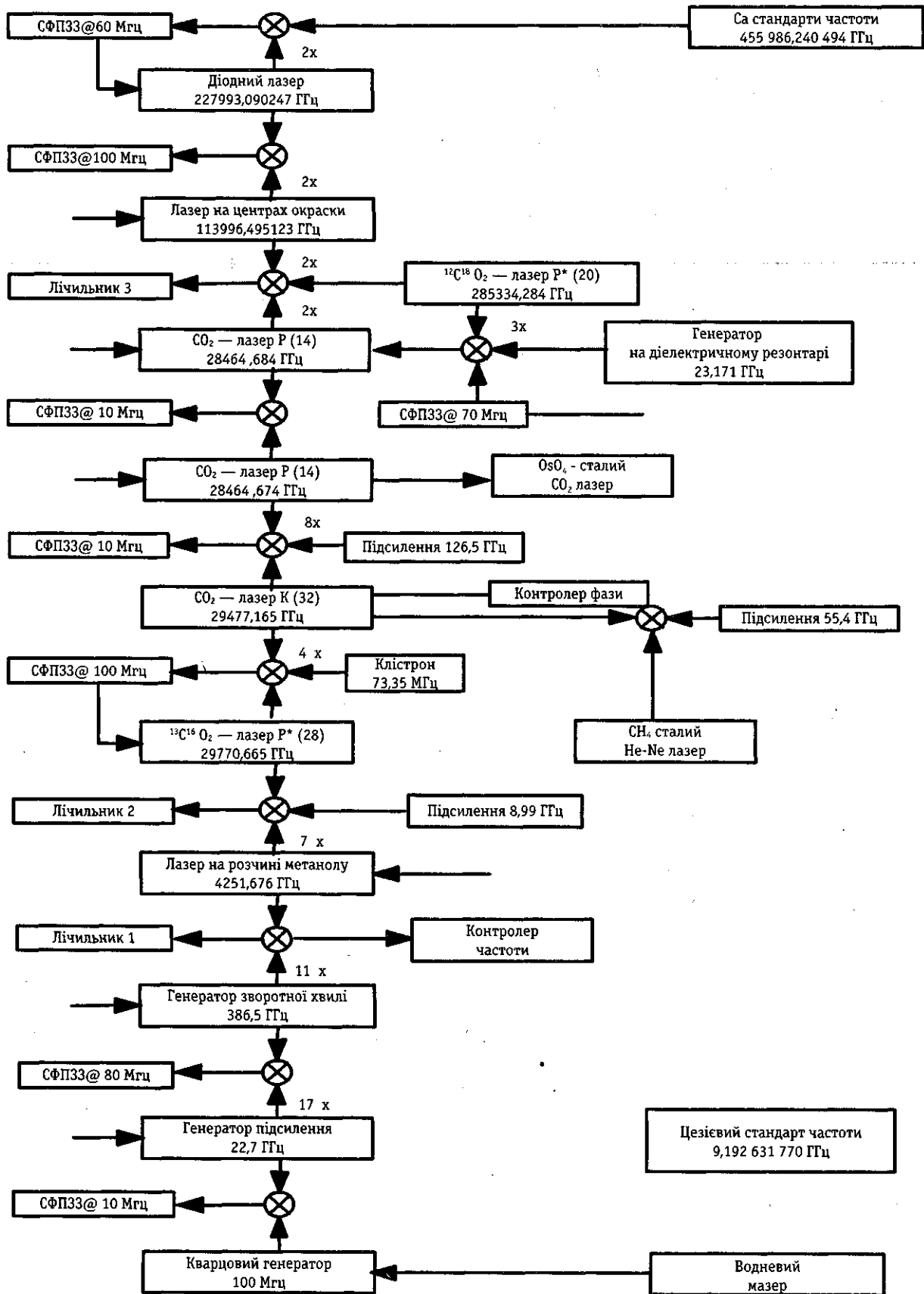


Рис. 2. Основні частоти стабілізованих за частотою лазерів



СФПЗЗ — стабілізація фази за петлю зворотного зв'язку

Рис. 3. Схема РОЧМ, яка забезпечує вимірювання частоти Са стандарта частоти

Одночасно з розвитком оптичних стандартів частоти розвивалися методи вимірювання абсолютного значення частоти оптичного випромінювання.

Слід звернути увагу на той факт, що в оптичному діапазоні у долазерну епоху частотою взагалі ніхто не цікавився, вимірювалася довжина хвилі, й то достатньо грубо. Часто застосовувалася величина, яка чисельно дорівнювала кількості довжин хвиль, що укладаються на одному сантиметрі. Однак, усі використовувані величини ніякого відношення до прецизійного вимірювання оптичної частоти не мали, оскільки, як вимірити абсолютне значення оптичної частоти ніхто не знав, не було навіть ідеї створення оптичного частотоміра.

З появою мазерів і лазерів та нелінійних пристроїв, що забезпечують множення оптичної частоти, з'явилися умови генерації оптичного випромінювання, спектр якого міг складатися з дискретних мод, ширина яких могла становити кілька десятків кГц. Така унікальна в оптиці ситуація природно призвела до необхідності вимірювання частоти оптичного випромінювання. Було розроблено радіооптичний частотний міст (РОЧМ), заснований на послідовному множенні частоти цезієвого стандарту аж до оптичного діапазону [7]. Як ілюстрацію (рис. 3) наведено типову схему РОЧМ, яка забезпечувала вимірювання частоти оптичного стандарту частоти на кальції.

У світі створили кілька таких мостів, і вони забезпечували вимірювання частоти лазерів у фіксованих точках оптичного спектра. Спочатку такими частотними точками були частоти He-Ne лазера, що працюють на довжинах хвиль 3,39 і 0,633 мкм. Для кожної нової довжини хвилі випромінювання стабілізованих лазерів необхідно доповнювати РОЧМ новою апаратурою, яка створюється для перенесення частоти в частотну область досліджуваного лазерного джерела випромінювання.

З розширенням списку стабілізованих за частотою лазерів вимірювання оптичних частот цих лазерів з використанням РОЧМ ставало все проблематичнішим. Звичайно, РОЧМ дозволяв вимірювати одну оптичну частоту, для забезпечення вимірювання іншої частоти схему необхідно доопрацювати й дооснащувати, що у деяких випадках було реалізовано. Проте, розвиток оптичних частотних вимірювань не пішов шляхом постійного опрацювання РОЧМ, оскільки не дозволяв оперативно здійснювати вимірювання будь-яких оптичних частот.

Метою цієї роботи є дослідження умов використання кільцевих волоконних лазерів для вимірювання абсолютних оптичних частот.

ЧАСТОТНА КОМБ МЕТРОЛОГІЯ

Необхідне рішення несподівано прийшло завдяки дослідженням умов генерації ультракоротких лазерних імпульсів. У 2005 році Нобелівську премію з фізики присуджено Т. Хеншу, Дж. Холу й Рою Глауберу за внесок у розвиток точної спектроскопії, заснованої на лазерах, включаючи техніку прецизійного розрахунку світлового зсуву в оптичних стандартах частоти (оптичних гребінках) [8]. Роботи, виконані нобелівськими лауреатами, були спрямовані не лише на розвиток фундаментальних основ квантової електродинаміки, але й вивчення й реалізацію умов прецизійних вимірювань оптичних частот. Результати цих досліджень виявилися затребуваними в метрології, й протягом декількох років багато наукових метрологічних центрів світу стали застосовувати розроблену технологію в практиці прецизійних частотних вимірювань в оптичному діапазоні [8].

Оптичні частотні гребінки, формовані фемтосекундними лазерами із синхронізованими модами, дозволяють установити прямий зв'язок між оптичними й радіочастотами. Оскільки зв'язок між тривалістю імпульсів випромінювання й шириною оптичного спектра описується простим виразом $\Delta\tau\Delta f = \text{const}$, домагаючись скорочення тривалості імпульсу, можна забезпечити розширення спектра випромінювання. Окрім того, якщо ці спектрально обмежені імпульси пропустити через нелінійне середовище, таке як фотонний кристал, можна добитися розширення спектра випромінювання на октаву й тим самим зменшити тривалість імпульсів. Саме цей розширений дискретний спектр випромінювання і є частотною лінійкою, за допомогою якої можна вимірювати оптичні частоти, які потрапляють до сфери частотних гребінок (рис. 4) [9].

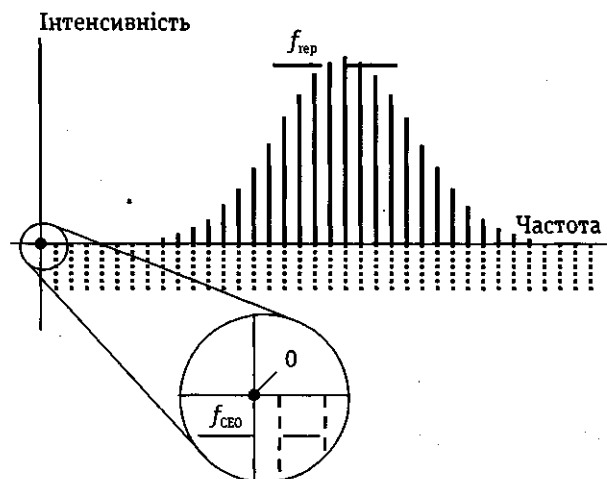


Рис. 4. Частотна гребінка фемтосекундного лазера

Частотні гребінки стали стандартним інструментом високоточної спектроскопії й оптичної частотної метрології в усьому світі. Розширюючи можливості частотної метрології, оптичні частотні гребінки дозволяють вимірювати оптичні частоти, використовуючи для цього засоби вимірювання частот у радіодіапазоні. Специфіка застосовуваної методики полягає в тому, що частотний спектр, у якому всі спектральні компоненти розташовуються еквідистантно, і якщо подумки подовжити спектр у бік нульової частоти, одна із віртуальних частот або збіжиться з нульовою позначкою частоти, або стоятиме від неї на певній частотній відстані, значення якої буде меншим, ніж інтервал між спектральними компонентами. Щоби використовувати частотну лінійку для вимірювання абсолютних частот оптичного випромінювання, необхідно знати дві величини, які її характеризують. До них належать відстань між компонентами f_{rep} й величина відхилення першої віртуальної моди від нульової позначки на частотній осі — f_{ceo} (рис. 4):

$$f_N = Nf_{rep} + f_{ceo} \quad (1)$$

Абсолютне значення оптичної частоти кожного піку визначається шляхом вимірювання значень радіочастот f_{rep} і f_{ceo} , що принципово спрощує завдання вимірювання оптичних частот з максимальною точністю. Оскільки вимірювання цих частот можна провести за допомогою високоточних частотомірів, каліброваних за водневими або рубідієвими стандартами частоти, обумовлене значення оптичної частоти буде пов'язано із частотою первинного стандарту частоти — цезієвого. f_{rep} дорівнює частоті міжмодового інтервалу і міститься у діапазоні (100—1000) Мгц. $f_{rep} = c_g / 2L$, де L — довжина резонатора, а c_g — групова швидкість випромінювання усередині резонатора. Визначення f_{ceo} здійснюється шляхом використання Nd:YAG лазера, що генерує основну довжину хвилі 1,064 мкм і другу гармоніку — 0,532 мкм, а значення величини визначається як $f_{ceo} = f_b^{532} - 2f_b^{1064}$, через вимірені радіочастотним способом величини частотних зсувів між спектральними компонентами N і $2N$ і гармоніками випромінювання лазера (рис. 5).

Для вимірювання невідомої частоти оптичного випромінювання необхідно вимірити частотну різницю між гармонікою спектра, яка є ближчою до шуканої частоти, й є самою частотою:

$$f = N \cdot f_r + f_{ceo} \pm f_b, \quad (2)$$

де f_b — вимірювана частота биттів між спектральним компонентом гребінки з номером N і вимірюваною частотою.

Невизначеність вимірювання частоти визначатиметься невизначеністю частот, що характеризують

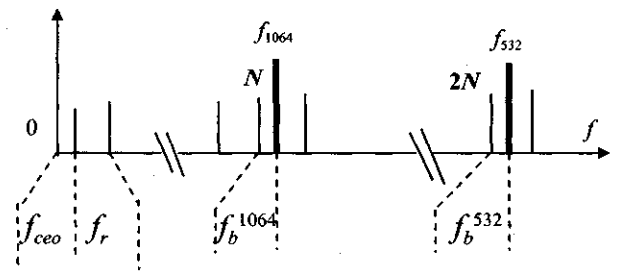


Рис. 5. Вимірювання f_{ceo} за допомогою стабілізованого Nd:YAG лазера

комб ґратки f_{rep} і f_{ceo} , й невизначеністю вимірювання різницевої частоти f_b . Оскільки ці частоти розташовуються у радіодіапазоні, їх вимірюють за допомогою прецизійних радіочастотомірів. Отже, невизначеність вимірювання оптичних частот визначається невизначеністю вимірювання трьох частот у радіодіапазоні. Крім того, для виконання всіх перерахованих вимірювань необхідно, щоб і частота досліджуваного лазера, й комб гребінка були стабілізовані.

Для формування такої частотної сітки (гребінки) розробляються як твердотільні титан-сапфірові лазери, що працюють у ближньому ІЧ діапазоні, спектр яких повністю перекриває весь видимий діапазон, так і волоконні лазери, що працюють в ІЧ діапазоні.

Зараз можна виділити кілька напрямків частотних вимірювань, заснованих на оптичній гребінці. До них, у першу чергу, належить частотна метрологія, яка забезпечує вимірювання оптичних частот усіх лазерних джерел видимого й ближнього ІЧ діапазонів. Для цих цілей використовується як волоконний ербієвий лазер, так і титан-сапфіровий лазер. Частотна гребінка ефективно застосовується у спектроскопічних дослідженнях, активно розвиваються оптичні частотні вимірювання в астрономії, як один із нових напрямів дистанційної спектроскопії. До складу оптичних годинників вводяться пристрої для вимірювання оптичної частоти, тобто фемтосекундні лазери із системою реєстрації сигналів биттів.

РОЗРОБЛЕННЯ ЛАЗЕРІВ ДЛЯ ОПТИЧНИХ ЧАСТОТНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Лазери, що генерують ультракороткі імпульси, розробляються й створюються на основі твердотільних, напівпровідникових і волоконних активних середовищ [10]. При цьому центральна довжина хвилі спектра випромінювання, залежно від використовуваного активного середовища, може встановлюватися в інтервалі від 700 до 2000 нм. У 80-х роках минулого століття проведені дослідження основних

фізичних принципів роботи й конструктивно-го виконання фемтосекундних лазерів. Окрім того, що лазери на основі твердотільних активних середовищ здатні випромінювати імпульси тривалістю аж до 5 фс, їх основна перевага полягає у можливості формування імпульсів з петаватним рівнем імпульсної потужності. Такі лазери застосовуються для прискорення електронів [11] і в експериментах із лазерного термоядерного синтезу [12].

Іншим типом лазера, що генерує ультракороткі імпульси, є волоконний лазер [13]. Починаючи з 90-х років [14], такі лазери активно розвивалися. Вони отримали широкого поширення в інформаційних технологіях. Розвиток цих лазерів відбувається й сьогодні. Останнім часом найбільший інтерес виявляється до волоконних лазерів, як лінійних, так і кільцевих, що працюють у режимі генерації ультракоротких імпульсів. Тому більшу частину лазерів, що перебувають в експлуатації у метрологічних центрах та університетах, створено на базі волоконних лазерів. Проте, робочих засобів вимірювань на основі волоконних лазерів поки що у потрібній кількості в метрологічних центрах і промислових лабораторіях немає. Тому розвиток робочих засобів вимірювань оптичних частот є актуальним завданням, вирішення якого частково отримано у цій роботі.

Типову схему кільцевого, волоконного лазера, що працює в режимі генерації ультракоротких імпульсів, наведено на рис. 6 [15]. У кільцевих лазерах застосовувалася синхронізація мод, яка досяга-

лася за рахунок обертання поляризації мод. Для керування поляризацією в таких лазерах застосовуються дискретні поляризаційні елементи, що вміщують у кільцевий резонатор лазера. До складу волоконного кільцевого резонатора фемтосекундного лазера входять такі елементи: лінзова оптика, що забезпечує колімацію пучків випромінювання у відкритому просторі й уведення випромінювання у волокно; пасивне волокно з негативною дисперсією (SMF28); волокно, активоване іонами ербію, з позитивною дисперсією; WDM розгалужувач, що забезпечує уведення випромінювання накачування з довжиною хвилі 980 нм у резонатор; поляризаційні пластинки ($\lambda/4$ і $\lambda/2$); поляризаційний діляльний кубик (PBS), що забезпечує виведення випромінювання із лазера. Однонаправлене поширення випромінювання у кільцевому резонаторі забезпечує ізолятор (isolator). Чверть і напівхвильові пластинки, встановлені у резонаторі, забезпечують прецизійне й відтворюване керування поляризацією мод, порівняно із застосуванням волоконних, поляризаційних контролерів.

Для максимальної ефективності взаємодії випромінювання з активним середовищем використовується волокно без підтримання поляризації, тому за межами оптичного волокна використовуються поляризаційні пластинки, які забезпечують як трансформацію кругової поляризації у лінійну (і назад), так і поворот лінійної поляризації. Поворот поляризації випромінювання має відновлювати той напрямок поляризації, за яким випромінювання виводиться з волокна.

У результаті поляризаційної синхронізації мод забезпечується генерація ультракоротких (фемтосекундної тривалості) імпульсів. Залежно від кута повороту вектора електричного поля в лінійно поляризованій хвилі регулюється частка енергії, яка виводиться із резонатора через PBS.

У цій роботі досліджено умови керування поляризацією поздовжніх мод випромінювання за допомогою РК чарунок, якими звичайно управляють з використанням електричного поля. До складу кільцевого волоконного лазера вводяться РК чарунки, які забезпечують коригування положення вектора поляризації. Структуру досліджуваного лазера представлено на схемі (рис. 7), у якій РК чарунки замінили напівхвильові пластинки.

Для використання такого волоконного кільцевого лазера як робочого засобу вимірювання частоти необхідно забезпечити ефективне управління поляризацією випромінювання в автоматичному режимі. У лабораторних умовах використовується ручне, механічне регулювання положення поляризаторів.

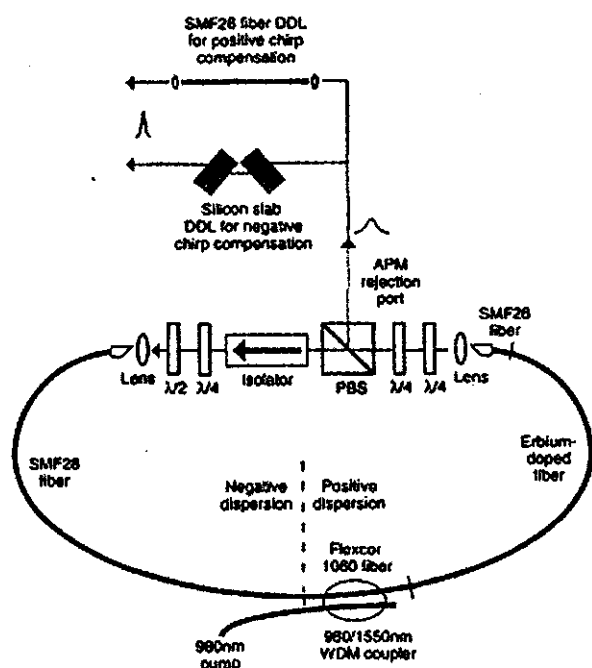


Рис. 6. Кільцевий волоконний лазер із синхронізацією мод

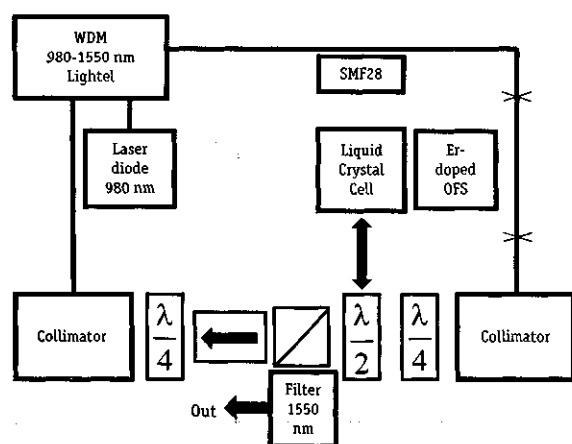


Рис. 7. Схема кільцевого волоконного лазера із РК чарункою

Для автоматичного керування положеннями поляризаторів використовується система із кроковими двигунами (Ultrafast Fiber Laser TG-1550 компанії Menlo Systems). Однак, у такому виконанні вартість лазерів та їх експлуатації стає дуже високою. Тому в цій роботі вивчено умови, за яких поляризацією випромінювання управляють за допомогою РК чарункою.

Для заміни дискретних напівхвильових пластинок РК чарунками необхідно було перевірити їхні електрооптичні властивості. Оптичну схему для перевірки умов заміни пластинки $\lambda/2$ на РК чарунку представлено на рис. 8.

Для заміни напівхвильової пластинки РК чарункою необхідно визначити їхні характеристики й провести порівняння. Випромінювання з лінійною вертикальною поляризацією виводилося через перший PBS із волоконного лазера (рис. 8). Фільтр 1550 нм не пропускав випромінювання накачування 980 нм. РК чарунка й напівхвильова пластинка розміщалися за чергою перед другим PBS, який розділяв випромінювання за поляризацією у взаємно перпендикулярних напрямках. Напрямок випромінювання

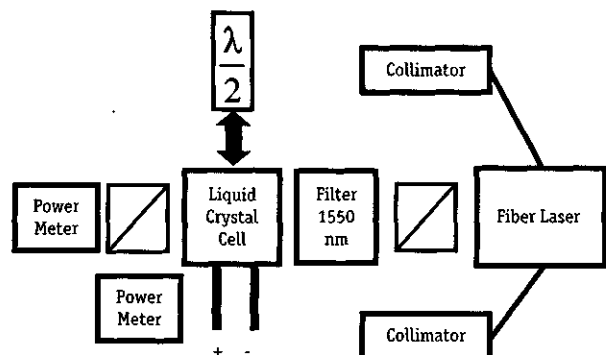


Рис. 8. Схема дослідження обертання поляризації випромінювання

з вертикальною поляризацією повертається на 90° і виводиться із резонатора, а випромінювання з горизонтальною поляризацією не міняє свого напрямку поширення. Кожна складова випромінювання реєструвалася вимірником потужності. Результати вимірення потужності, що проходить через вимірвальний тракт, залежно від кута повороту напівхвильової пластинки представлено на рис. 9. А результати вимірень потужності, що проходить залежно від напруги на РК чарунці — на рис. 10. Згідно з рис. 9 напівхвильова пластинка у разі повороту на 45° повертає площину поляризації випромінювання на 90° . При цьому вимірник потужності реєструє всі значення від мінімуму до максимуму. За повний оберт напівхвильова пластинка створює у резонаторі однакові умови 8 разів, тому для настроювання резонатора можна обмежити діапазон обертання пластинки 45° . З рис. 10 видно, як змінюється реєстрована потужність випромінювання за зростання й спадання напруги між електродами РК чарунки. Це відповідає обертанню площини поляризації випромінювання на 90° . До особливостей роботи РК чарунки можна віднести наявність мінімуму пропускання на рівні 2,7 В. Потім іде ділянка до 4 В, де пропускання випромінювання залежить від напруги на чарунці лінійно, і далі до 10 В спостерігається ділянка насичення, де пропускання зі збільшенням напруги змінюється повільно. Для точного настроювання резонатора ділянка з повільною зміною напруги є більш зручною. Необхідною є можливість обертання РК чарунки для вибору початкової орієнтації в резонаторі з наступним налаштуванням напругою.

Проведено вимірювання пропускання РК чарунки за схемою (рис. 8) шляхом реєстрації показань вимірника потужності без чарунки (18,15 мВт) і з чарункою (13,27 мВт). Втрати потужності випромінювання на довжині хвилі 1,54 мкм склали приблизно 27%. Спеціальних заходів для зменшення втрат не приймалося, тому існує можливість їх зниження.

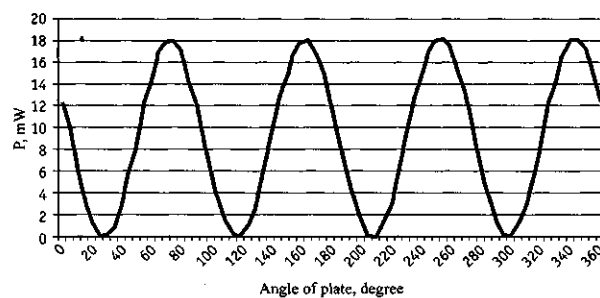


Рис. 9. Залежність потужності, що пропускається, від кута повороту напівхвильової пластинки

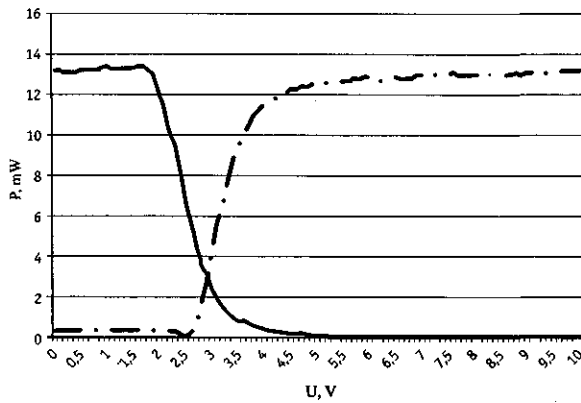


Рис. 10. Залежність потужності, що пропускається, від напруги на РК чарунці

Порівнюючи графіки (рис. 9, 10), видно, що напівхвильова пластинка, як і чарунка, потребують правильної початкової орієнтації у резонаторі й установки напруги. Обертання напівхвильової пластинки у діапазоні 45° відповідає зміні напруги на чарунці від 2,7 до 10 В. Чарунка вносить істотні втрати у резонатор порівняно із напівхвильовою пластинкою, що може перешкоджати отриманню режиму синхронізації мод в імпульсному волоконному лазері.

ВИСНОВКИ

1. Показано можливість заміни дорогої системи керування фемтосекундним лазером на основі обертання фазових пластинок кроковими двигунами системою на основі РК чарунки, керованої низьковольтною напругою. Пропонований варіант є дешевшим і надійнішим, оскільки не містить рухомих елементів.

2. Проведено дослідження обертання площини поляризації РК чарункою у разі подання на неї напруги до 10 В. Показано, що дія РК чарунки на поляризацію випромінювання за зміни напруги на електродах у діапазоні від 2,7 до 10 В еквівалентна дії напівхвильової пластинки за її обертання у діапазоні 45° . При цьому площина поляризації випромінювання повертається від 0 до 90° .

3. Проведено експериментальне дослідження втрат, що вносяться чарункою у вимірювальний тракт. Показано, що ці втрати становлять 27 % потужності випромінювання, що падає на чарунку. Для зниження втрат необхідно вживати спеціальних заходів — нанесення висвітлювальних покриттів, удосконалювання електродів, рідких кристалів тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пихтелев Л.И., Ульянов А.А., Фатеев Б.П. и др. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов. — М., Сов. Радио, 1978. — 304 с.
2. Аркадьев В.К. О магнитной спектроскопии и радиоспектроскопии атомного ядра // УФН. — 1951. — Т. 44. — Вып. 1. — С. 80—88.
3. Басов Н. Г., Беленов Е. М. Квантовые стандарты частоты. — М., 1968. — С. 164—194.
4. Quinn T.J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) // Metrologia. — 2003. — Vol. 40. — PP. 103—133.
5. Мачехин Ю.П., Негрійко А.М., Соловйов В.С., Яценко Л.П. Оптические стандарты частоты. — Част. 1. — He-Ne/I₂ лазеры, практика создания и эксплуатации.
6. Champenois C., et al. Evaluation of the ultimate performances of a Ca⁺ single-ion frequency standard, Phys. Lett. A. — 2004. — Oct. — Vol. 331. — PP. 298—2311.
7. Домнин Ю.С., Малимон А.Н., Татаренков В.М., Шумяцкий П.С. Радиооптический мост единого эталона времени, частоты и длины // Измерительная техника. — 1986. — № 6.
8. Хол Дж.Л. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических частот — и не только // УФН. — 2006. — Т. 176. — № 12. — С. 1353—1367.
9. Мачехин Ю.П., Негрійко А.М., Яценко Л.П., Мацнев І.А., Литвиненко А.С., Красногоров А.Ю., Мунтян К.І. Развитие прецизионной технологии измерения оптических частот с использованием фемтосекундного лазера // Радиотехника. — 2007. — Вып. 150.
10. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. — М.: Наука, 1988. — 312 с.
11. Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника — 2001. — Т. 31. — № 2. — С. 95—119.
12. Шиканов А.С. Лазерный термоядерный синтез // Соросовский образовательный журнал. — № 8Б. — 1997. — С. 86—91.
13. Grossmann F. Theoretical Femtosecond Physics // Springer. — 2008. — 206 p.
14. Дианов Е.М., Прохоров А.М. Лазеры и волоконная оптика // УФН. — 1986. — Т. 148. — Вып. 2. — С. 289—309.
15. Tamura K., Doerr C.R., Nelson L.E., Haus H.A., Ippen E.P. Technique for obtaining high-energy ultrashort pulses from an additive-pulse mode-locked erbium-doped fiber ring laser // Optics Letters. — 1994. — Vol. 19. — № 1. — PP. 46—48. ■