

УДК 621.39

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/08>**Корчак О.В.**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Крутинь Я.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Резніков М.І.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фелінський Г.С.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ТЕРАГЕРЦОВЕ ДЖЕРЕЛО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЛАЗЕРНОЇ ВКР ФОТОНІКИ

У результаті огляду останніх публікацій сформульовано основні проблеми наявних методів отримання високоефективного джерела терагерцового випромінювання, починаючи з твердотільних лазерів і закінчуючи повністю волоконними лазерами, побудованими на ефекті вимушеного комбінаційного розсіювання (ВКР). У роботі запропонована схема реалізації ефективного терагерцового джерела випромінювання тракту формування й передавання сигналів телекомунікаційної системи. Попередні схеми оптичних передавачів на основі напівпровідникових лазерних діодів мають проблеми, що пов'язані зі стабілізацією їх частоти й заданої різниці фаз. Повністю волоконне виконання ВКР-лазерів є безсумнівною перевагою в порівнянні з лазерними діодами, оскільки такий лазер не містить зовнішніх оптичних елементів, має високу ефективність і стабільність генерації при високій якості пучка. Крім того, підвищення частотної стабілізації двох когерентних джерел випромінювання забезпечує спільна лазерна накачка. Запропонований двохвильовий (2λ) волоконний лазер відрізняється тим, що генерація створюється за рахунок ефекту вимушеного комбінаційного розсіювання. У результаті терагерцове джерело даватиме суттєве зменшення фазових шумів, якого варто очікувати за рахунок генерації обох лазерів від спільного джерела помпування. Показано, що оптимальним вибором активного волокна можна зменшити порогову потужність накачки в десятки або навіть сотні разів (наприклад, завдяки застосуванню КР волокна, легованого 20% GeO_2 у серцевині замість «чистого» кварцового волокна SiO_2), а це, у свою чергу, дасть змогу значно зменшити масо-габаритні характеристики двохвильового ВКР-лазера шляхом оптимізації його конструкції. Визначено параметри лазерних резонаторів і коефіцієнтів підсилення двохвильового ВКР-лазера для трьох смуг прозорості в актуальному для застосування сучасних телекомунікаційних систем терагерцовому діапазоні. Показано, що запропонований спосіб реалізації джерела випромінювання дає змогу суттєво спростити його схематичне рішення в порівнянні з аналогічними конструкціями.

Ключові слова: вимушене комбінаційне розсіяння, волоконна бреггівська ґратка, волоконний лазер, джерело накачки, лазерний діод.

Постановка проблеми. Одним із головних і невирішених нагепер завдань для сучасних телекомунікаційних систем є розробка й реалізація ефективного терагерцового джерела випромінювання тракту формування та передавання сигналів. Сьогодні існує велика кількість підходів до вирішення цього питання, проте компактний пристрій із високою ефективністю й низькою собівартістю, ще й здатний працювати за нормальних умов експлуатації досі ще не створено.

Загальні вимоги до джерел випромінювання для волоконно-оптичних систем зв'язку можна сформулювати так:

довжина хвилі випромінювання джерела повинна співпадати з одним із мінімумів спектральних втрат волоконних світловодів;

конструкція джерела повинна забезпечувати досить високу потужність вихідного випромінювання й ефективно введення його у волоконні світловоди;

джерело повинно мати високу надійність і великий термін служби;

габаритні розміри, маса та споживана потужність повинні бути мінімальними;

простота технології має забезпечувати невисоку вартість і високу відтворюваність характеристик.

Особливості конкретних систем висувають низку специфічних вимог до характеристик джерел випромінювання. Цілком жорсткими ці вимоги є у високошвидкісних системах передачі інформації на великі відстані з використанням одномодових волоконних світловодів. Насамперед ідеться про спектральні характеристики випромінювання. Розширення світлових імпульсів в одномодових волокнах унаслідок дисперсії пропорційно ширині спектра випромінювання, швидкість передачі обернено пропорційна їй.

У перспективних волоконно-оптичних системах передачі з когерентним прийомом необхідні джерела не тільки з вузьким спектром, а й із високою довготривалою стабільністю центральної довжини хвилі. Водночас у високошвидкісних системах передачі значні вимоги пред'являються й до динамічних характеристик джерел світла. Найзручніше використовувати джерела, що допускають пряму модуляцію інтенсивності, частоти або фази випромінювання без істотних змін інших параметрів (модового складу тощо), появи самопульсацій тощо.

Таким чином, розробка та схмотехнічна реалізація ефективного джерела випромінювання, яке б задовольняло всім вищезазначеним вимогам, є поки що невирішеним у повному обсязі завданням.

Аналіз досліджень і публікацій. Перший волоконний ВКР-лазер, у якому резонатор утворений об'ємними дзеркалами, продемонстрований Столеном та ін. [1] у 1972 р. невдовзі після появи скляних волоконних світловодів з низькими оптичними втратами.

У ранніх роботах щодо волоконних ВКР-лазерів як джерела накачки використовувалися твердотільні лазери, або лазери на барвниках, а резонатор утворювався об'ємними елементами [2].

На початку 90-х років ситуація кардинально змінилася у зв'язку з появою та розвитком досить потужних ітербієвих і неодимових волоконних лазерів на германосилікатному волокні [3–5], а також техніки запису волоконних фотоіндукованих брегівських ґраток [6]. Це дало змогу перейти до створення компактних, повністю волоконних пристроїв, перспективних для практичного використання (рис. 1) [7].

Тільки до середини 90-х років завдяки бурхливому розвитку волоконної оптики та волоконно-оптичного зв'язку розроблені повністю волоконні ефективні ВКР-лазери [8], у яких дзеркалами резонатора слугували внутрішньоволоконні брегівські ґратки показника заломлення, а як активне

середовище використовувався германосилікатний волоконний світловод. Хоча такий ВКР-лазер мав високу ефективність, проте його суттєвим недоліком була мала величина стоксового зсуву ($\sim 430 \text{ см}^{-1}$), яка потребувала генерації стоксових компонентів високого порядку для отримання випромінювання в області 1,4–1,5 мкм. Для цього потребувалося записати у волоконному світловоді 5–6 пар брегівських ґраток, що сильно ускладнювало конструкцію лазера. Тому подальші дослідження були спрямовані на пошук скляних волоконних світловодів із більшим стоксовим зсувом. Виявилося, що фосфоросилікатний світловод має дві смуги комбінаційного розсіювання зі стоксовими зсувами 490 й 1330 см^{-1} [9]. Використання стоксового зсуву 1330 см^{-1} дало змогу сильно спростити конструкцію волоконного ВКР-лазера й створити сімейство ВКР-лазерів, які генерують випромінювання практично на будь-якій довжині хвилі в спектральній області 1,1–1,65 мкм [5].

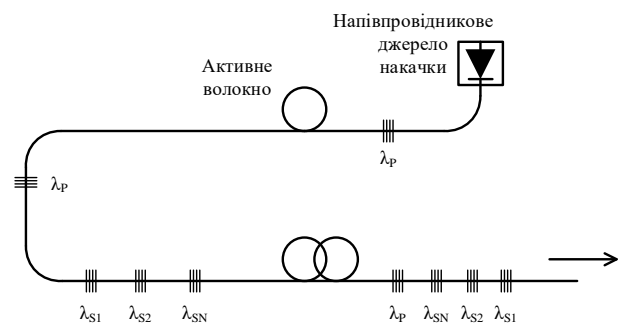


Рис. 1. Узагальнена схема багатоступінчастого ВКР-лазера

На рисунку 2 [10] наведено схему трьохкаскадного волоконного ВКР-лазера, у якому для генерації випромінювання з $\lambda = 1407 \text{ нм}$ використовувався фосфоросилікатний світловод [11].

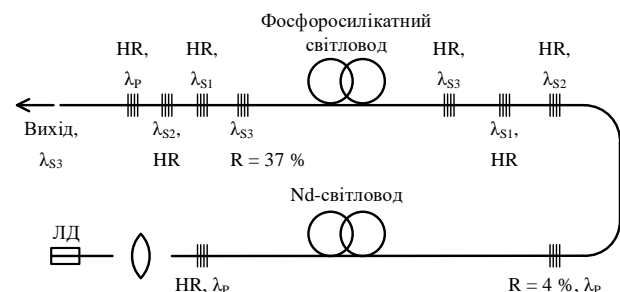


Рис. 2. Схема ВКР-лазера на фосфоросилікатному світловоді на довжину хвилі 1407 нм:
HR – високівідбиваюча брегівська ґратка,
R – коефіцієнт відбиття

У сучасних телекомунікаційних системах уже досить тривалий час волоконні ВКР-лазери зна-

ходять широке застосування як джерела накачки ВКР та ербієвих підсилювачів [12].

ВКР волоконні джерела, які випромінюють на двох і більше довжинах хвиль, запропоновані для розширення спектра підсилення ВКР волоконних підсилювачів і покращення їх шумових характеристик [13]. Як правило, у таких пристроях як активне середовище використовується спеціалізоване волокно, а генерація на декількох довжинах хвиль досягається встановленням відповідного числа пар волоконних бреггівських ґраток (ВБГ), які утворюють резонатори волоконного лазера.

Експериментальні дослідження показали, що накачку волоконних КР генераторів можна здійснювати від напівпровідникових лазерних діодів (далі – ЛД). Сполучення лазерної накачки від діодів з волоконним КР генератором дає можливість створити компактний, ефективний і недорогий лазер для ближньої інфрачервоної області, зокрема, для помпування ВКР-підсилювачів (ВКРП). Проте насамперед потрібно було вирішити проблеми ефективного вводу потужного випромінювання лазерного діода в серцевину одномодового волокна з одночасним забезпеченням променевої стійкості активного волокна до помпування. Цю проблему вирішено з розробкою волокон із подвійним покриттям (ВПП) і серцевиною, легованою іонами Nd^{3+} (Yb^{3+}), та оптимальною структурою для накачування від лазерних діодів. Зокрема, у роботі [14] запропоновано структуру активного волокна з подвійною оболонкою для вдосконалення накачки волоконних КР генераторів світла напівпровідниковими ЛД. На рис. 4 [15] зображено типову схему лазера на волоконі з подвійним покриттям (ВПП) із внутрішньою серцевиною, легованою іонами Yb^{3+} (Nd^{3+}).

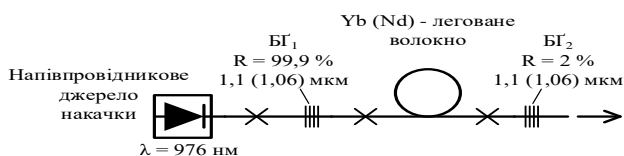


Рис. 3. Типова схема лазера на волоконі з подвійним покриттям і внутрішньою серцевиною, легованою іонами Yb^{3+} (Nd^{3+}). Резонатор утворений двома бреггівськими ґратками БГ_1 та БГ_2 , а помпування – від лінійки потужних напівпровідникових лазерних діодів

Таким чином, напівпровідникові ЛД, що розроблені для діапазону 1420–1510 нм, за своїми основними параметрами, зокрема за рівнем вихідної потужності та якістю спектра випромінювання, стали цілком придатними для широкого застосування для накачування ВКРП, але останнім

часом дуже серйозну конкуренцію їм створили волоконні лазери, оскільки застосування окремих оптичних передавачів на основі напівпровідникових ЛД викликає низку проблем, що пов'язані зі стабілізацією їх частоти та заданої різниці фаз. Повністю волоконне виконання ВКР лазерів є безсумнівною перевагою в порівнянні з лазерними діодами. Водночас у сучасних джерелах помпування ВКРП застосовуються високоефективні та компактні напівпровідникові лазерні діоди з розподіленим зворотним зв'язком і волоконні ВКР лазери з параметрами, що задовольняють досить жорстким вимогам до пристроїв нелінійної оптики. Для розширення робочої смуги ВКР підсилення застосовується помпування на кількох довжинах хвиль, а для оптимального вибору частотного положення окремих джерел накачки та розподілу їх за потужностями необхідно застосовувати спеціальні методи розрахунку.

Однією з перших робіт з отримання двохвильового випромінювання у волоконному лазері була робота [16], у якій використовувалися дві волоконні бреггівські ґратки, налаштовані на дві близькі довжини хвилі (1534 нм і 1536 нм, відповідно), а як джерело випромінювання було обрано кільцевий ербієвий лазер.

Поряд із використанням стандартних бреггівських волоконних ґраток як оптичних фільтрів у волоконних лазерах для виділення необхідних ділянок спектра вихідного випромінювання застосовується низка інших методів. Серед них можна відзначити волоконні бреггівські ґратки з фазовим зсувом [17], інверсійний аподизований волоконний фільтр Гауса [18] і чирпований волоконний бреггівський фільтр [19]. Переваги таких методів описані, зокрема, у роботі [17], у якій продемонстрована схема на основі двох каскадних волоконних бреггівських ґраток із фазовим зсувом, котрі формували волоконний лазер із розподіленим зворотним зв'язком.

Доповненням до вузькосмугових фільтрів для генерації двохвильового випромінювання виступають гребінчасті фільтри. Одним із найкращих прикладів є двопрхідний фільтр Маха-Цендера, застосування якого продемонстровано в роботі [20]. Фільтр убудовувався в кільцевий волоконний лазер, активна область якого легована іонами ербію. Оптичний спектр системи мав можливість перебудови в межах 1530–1567,5 нм.

Порівняно нещодавно був запропонований новий підхід, спрямований на отримання двохвильового випромінювання у волоконному лазері [21]. Авторами запропоновано використати

вужкосмуговий режекторний фільтр, що є мікро-волоконним кільцевим резонатором. Мікро-волоконно виступало як гребінчастий фільтр. Випромінювання, що генерується, на різницевій частоті в мікрохвильовому діапазоні мало співвідношення «сигнал/шум» у 35 дБ. Подібні результати також отримані з використанням мікрохвильових відгалужувачів [22].

Більш простий підхід запропонований у роботі [23]. У цій праці рознесення довжин хвиль плавно регулювалося шляхом механічного переміщення, яке стискало або розтягувало бреггівське дзеркало, змінюючи тим самим резонансну довжину хвилі.

У роботі [24] чисельно досліджується можливість генерації різницевої частоти в планарному хвилеводі, серцевина якого складалася з матеріалу LiNbO_3 домішкою іонів титану. Авторами відзначено, що при виборі певної структури й параметрів волокна реалізується фазовий синхронізм на всій довжині взаємодії двоххвильового випромінювання. У подібному виді схеми може бути реалізована як безперервна, так й імпульсна генерація різницевої частоти. В аналогічній роботі [24] як нелінійний матеріал для серцевини був обраний AlGaAs . У роботі [25] представлена перша експериментальна демонстрація генерації випромінювання різницевої частоти у двомірному фотонно-кристалічному волокні із серцевиною на основі GaP.

Коротко розглянемо роботи, які вже мають фактично готові схемотехнічні реалізації.

Відома робота [26], у якій запропонована схема монохроматичного ТГц джерела, яке перебудовується, заснованого на генерації різницевої частоти в нелінійно-оптичному кристалі DAST. Двох-

вильовий оптичний параметричний генератор із двома кристалами КТР побудований як джерело світла для генерації різницевої частоти, де ефект синього кольору вперше спостерігався за допомогою двоххвильової накачки (рис. 4).

Недоліком запропонованої схеми є відносна складність її реалізації й імпульсний режим роботи пристрою.

Для усунення вищезазначених недоліків запропонований пристрій генерації випромінювання в терагерцовому діапазоні [27], який реалізує такий спосіб формування терагерцового випромінювання, коли два зустрічно направлених лазери, які генерують хвилі в оптичному діапазоні, взаємодіють в активному елементі (лазерні джерела накачки й сигнальної хвилі з різними частотами генерації) зі сформованою на його поверхні бреггівською ґраткою, яка забезпечує фазовий синхронізм (рис. 6).

Принцип роботи пристрою заснований на зустрічній взаємодії колінеарно спрямованих хвиль оптичного діапазону: накачки й сигнальної хвилі [28]. Зустрічна взаємодія сигнальної хвилі та хвилі накачки всередині активного елемента генерують хвилю з різницевою частотою в терагерцовому діапазоні. Напрямок випромінювання терагерцової хвилі співпадає з напрямком хвилі накачки. Недоліком реалізації вищезазначеного способу формування терагерцового випромінювання є поява фазових шумів на виході пристрою генерації вужкосмугового генератора терагерцового випромінювання.

Постановка завдання. У сучасних телекомунікаційних системах терагерцового діапазону, які описані в літературі (див., зокрема, [29]), у тракті

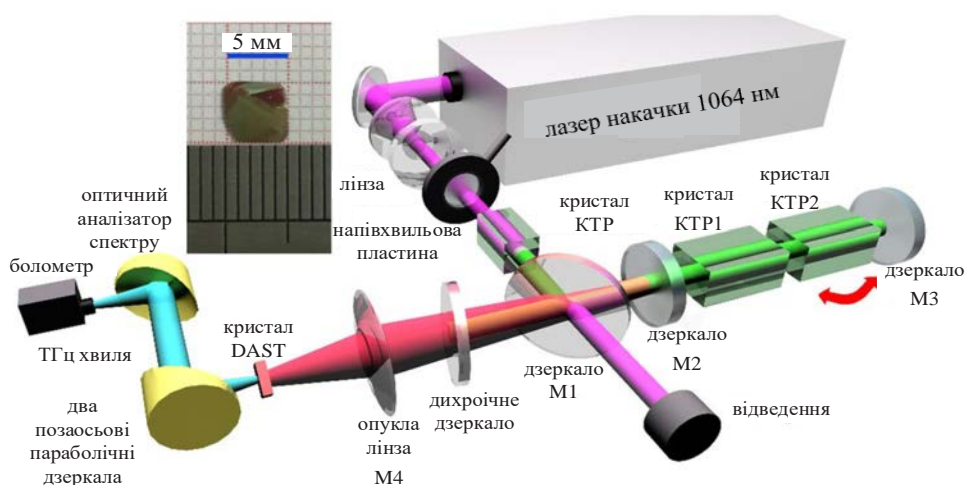


Рис. 4. Схема монохроматичного ТГц джерела, яке перебудовується, заснованого на генерації різницевої частоти в кристалі DAST

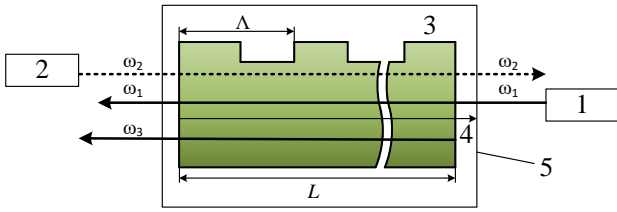


Рис. 5. Вузкосмуговий генератор терагерцового випромінювання на основі кристалу ZnTe

Пристрій включає в себе:

- 1 – твердотільний (або волоконний) лазер № 1 (джерело накачки);
- 2 – твердотільний (або волоконний) лазер № 2 (джерело сигнальної хвилі);
- 3 – кристал телуриду цинку з брегівською ґраткою на поверхні нелінійного кристалу;
- 4 – оптичну вісь;
- 5 – термостат, який забезпечує підтримку необхідної температури;
- ω_1 – частота хвилі накачки, яка генерується лазером № 1;
- ω_2 – частота хвилі накачки, яка генерується лазером № 2;
- ω_3 – частота терагерцової хвилі, яка генерується.

формування та передавання сигналів застосовуються два незалежні, як правило, напівпровідникові лазери (рис. 6).

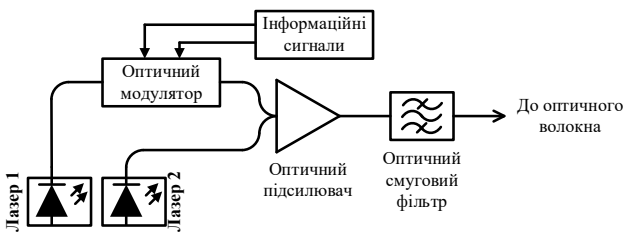


Рис. 6. Узагальнена схема оптичного передавача ВКР-лазера з 2-ма незалежними лазерами

У схемі (рис. 6) в оптичному модуляторі накачка лазера 1 модулюється інформаційними сигналами за допомогою амплітудної модуляції. Лазер 2 зі зміненою частотою генерації використовується як гетеродин. За допомогою змішувача, побудованого на оптичному підсилювачі, виділяється різницева частота обох лазерів і формується терагерцова несуча частота, модульована корисним сигналом. Саме цей сигнал у терагерцовому діапазоні використовується для бездротової передачі до пристрою користувача шляхом випромінювання у вільному просторі [30].

Основним недоліком елементів такої системи є некогерентність сигналів у випадку двох незалежних лазерів, що призводить до появи в змішувачі значних фазових шумів. Цей додатковий шум, що заважає прийому корисного сигналу, може

набувати принципового значення, особливо після великих втрат в атмосфері.

Отже, перше завдання полягало в реалізації терагерцового джерела випромінювання на базі двоххвильового лазера, у якому за рахунок створення двох довжин хвиль єдиним лазером забезпечиться зменшення рівня фазових шумів одночасно із забезпеченням широкої смуги пропускання. Також нашим завданням дослідження можливості реалізації зазначеного терагерцового джерела випромінювання за допомогою пристрою спрощеної конструкції в порівнянні з аналогами.

Основний матеріал дослідження. Основою вибору 2λ ВКР-лазера є тип волокна, яке використовується як активне середовище. Саме властивості цього середовища й визначають параметри такого лазера. У роботах [31–33] детально розглянуті та досліджені наявні типи волокон, які використовуються у 2λ ВКР-лазерах.

Ураховуючи все вищевикладене, ми запропонували нове джерело випромінювання тракту формування й передавання сигналів телекомунікаційної системи терагерцового діапазону [34], у якому два окремі лазери замінені на один 2λ волоконний лазер (рис. 7).

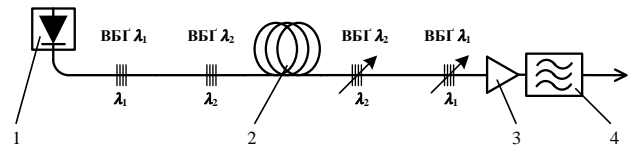


Рис. 7. Схема формування терагерцового випромінювання на базі двоххвильового ВКР-лазера

Для схемотехнічної реалізації ВКР-лазера [35] обрано такі початкові дані:

- лазерний діод накачки 1 генерує на частоті, яка відповідає $\lambda_p = 1450$ нм. Потужність накачки не більше 100 мВт;
- активне середовище 2 – волокно, леговане 20% GeO₂ у серцевині, яке використовує явище комбінаційного розсіювання (КР). Довжина КР волокна обраного типу становить 0,1 км ... 10 км;
- змішувач 3 – фотодіод або фотоміксер;
- фільтр 4 – смуговий фільтр.

Вхідна й вихідна брегівські ґратки, які позначено ВБГ_{λ₁}, формують область першого резонатора. Відповідно, вхідна й вихідна брегівські ґратки, які позначено ВБГ_{λ₂}, формують область другого резонатора. Періоди кожної з пар ВБГ, що використовуються як дзеркала з власними коефіцієнтами відбиття R_1 та R_2 , відповідають довжинам хвиль λ_1 і λ_2 відповідно. Кожна пара ВБГ,

безпосередньо нанесена на активне середовище 2, фактично формує лазерний резонатор. Монолітне виконання ВБГ суттєво покращує якість лазерних резонаторів і стабільність їх характеристик.

Результати моделювання ВБГ однозначно вказують на можливість реалізації двохвильового ВКР лазера для використання як джерела випромінювання в терагерцових телекомунікаційних системах.

Регулювання порогу генерації та вихідної потужності запропонованих лазерів можна здійснювати зміною коефіцієнтів відбиття вихідних брегівських ґраток.

Новим у запропонованому способі реалізації джерела випромінювання є те, що використовується єдине (спільне) джерело лазерної накачки для обох вихідних довжин хвиль замість двох окремих лазерів. Терагерцове випромінювання є результатом виділення різницевої частоти від обох лазерних довжин хвиль, генерацію яких здійснюють безінверсним фотонним методом, базуючись на ефекті ВКР, від спільного лазерного джерела накачки, потужність випромінювання якого перевищує поріг нелінійно-оптичного ВКР підсилення на кожній із обох заданих довжин хвиль в області стоксового зсуву в одномодовому волокні. Крім того, використання такого джерела дає змогу як лазер використовувати не напівпровідниковий лазерний діод, а будь-який інший лазер, потужність випромінювання якого перевищує поріг нелінійно-оптичного підсилення ВКР на кожній із обох заданих довжин хвиль в області стоксового зсуву. Також у такій реалізації як активне середовище волоконного двохвильового ВКР лазера може використовуватися будь-який тип волокна, генерація в якому отримується за рахунок ефекту ВКР світла.

За допомогою моделювання ВБГ у GeO_2 активному ВКР волокні однозначно вказано на можливість реалізації двохвильового ВКР-лазера, побудованого на одному волоконному лазері. Крім того, нами розраховані його відповідні параметри (таблиця 1).

Висновки. В роботі представлена схема 2λ ВКР-лазера, в якій як активне середовище за певних обставин (у випадку, коли генерація в волокні отримується за рахунок ефекту ВКР світла) можливе використання будь-яких типів волокон у терагерцовому діапазоні від 0 до 10 ТГц, а також вибрано оптимальний, за думкою авторів, тип активного волокна (леговане 20% GeO_2 у серцевині). Проведені розрахунки параметрів лазерних резонаторів і коефіцієнтів підсилення лазера для трьох смуг прозорості в терагерцовому діапазоні однозначно підтверджують можливість практичної реалізації двохвильового ВКР-лазера для використання як джерела випромінювання в терагерцових телекомунікаційних системах.

Таким чином, запропонована реалізація джерела випромінювання за вказаного схематичного рішення дасть змогу покращити якість корисного сигналу шляхом зменшення рівня фазових шумів, зменшити порогову потужність накачки в десятки або навіть сотні разів (із 40 Вт чи більше в чистому SiO_2 до 100 мВт у КР волокні, легovanому 20% GeO_2 у серцевині), а це, у свою чергу, дасть змогу значно зменшити масо-габаритні характеристики двохвильового ВКР лазера шляхом оптимізації його конструкції. Крім того, проведені розрахунки дають можливість кількісно оцінити перспективи вдосконалення запропонованих лазерів, зокрема зменшення довжини КР волокна до величин $L < 0,5$ км.

Таблиця 1

Параметри лазерних резонаторів і коефіцієнтів підсилення двохвильового ВКР лазера для трьох смуг прозорості в терагерцовому діапазоні

№	Параметр	Смуга 1 ($f_{\text{центр}} = 0,48$ ТГц)		Смуга 2 ($f_{\text{центр}} = 0,64$ ТГц)		Смуга 3 ($f_{\text{центр}} = 0,84$ ТГц)	
		перший резонатор	другий резонатор	перший резонатор	другий резонатор	перший резонатор	другий резонатор
1	Довжина хвилі, мкм	1,5483	1,5517	1,5476	1,5524	1,5466	1,5534
2	Поріг підсилення, мВт	18,2	18,8	18,1	18,9	18,1	19,2
3	Коефіцієнт підсилення ^а , дБ/км км ⁻¹	2,25 0,518	2,16 0,498	2,26 0,520	2,14 0,493	2,26 0,521	2,11 0,485
4	Довжина волокна, км	1	1	0,5	0,5	1,5	1,5
5	Коефіцієнт відбиття ВБГ R_2^b , %	60	60	80	80	20	20
6	Порогова потужність генерації, Вт	0,072	0,072	0,075	0,075	0,123	0,123

^а підсилення одиниці довжини активного волокна між ВБГ₁ та ВБГ₂ при $P_p = 100$ мВт;

^б уважається $R_1 = 95\%$.

Список літератури:

1. Stolen R.H., Ippen E.P., Tynes A.R. Raman Oscillation in glass Optical Waveguide. *Applied Physics Letters*. 1972. Vol. 20. № 2. P. 62–64.
2. A tunable 1.1- μm fiber Raman oscillator / Chinlon Lin, R.H. Stolen, L.G. Cohen. *Applied Physics Letters*. 1977. Vol. 31. № 2. P. 97–99.
3. 1.3 μm Cascaded Raman Amplifier in Germanosilicate Fibers / S.G. Grubb, T. Erdogan, V. Mizrahi, T. Strasser, W.Y. Cheung, W.A. Reed, P.J. Lemaire, A.E. Miller, S.G. Kosinski, G. Nykolak, P.C. Becker and D.W. Peckham. *Optical Amplifiers and Their Applications*. 1994. Vol. 14 of 1994 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 1994), paper PD3.
4. Волоконно-оптичний ВКР-усилитель сигналів на довжині хвилі 1.3 мкм / Е.М. Дианов, Д.Г. Фурса, А.А. Абрамов, М.И. Беловолов, М.М. Бубнов, А.В. Шипулін, А.М. Прохоров, Г.Г. Дев'яток, А.Н. Гурьянов, В.Ф. Хопін. *Квантова електроніка*. 1994. № 21:9. С. 807–809.
5. Medium-power CW Raman fiber lasers / E.M. Dianov, A.M. Prokhorov. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2000. Vol. 6. P. 1022–1028.
6. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication / K.O. Hill, Y. Fujii, D.C. Johnson, B.S. Kawasaki. *Applied Physics Letters*. 1978. Vol. 32. № 10. P. 647–649.
7. Курков А.С. Волоконні лазери на ефекті вимушеного комбінаційного розсіяння. *Вісник Нижгородського університету ім. Н.И. Лобачевського*. 2008. № 2. С. 32–38.
8. High-Power 1.48 μm Cascaded Raman Laser in Germanosilicate Fibers / S.G. Grubb, T. Strasser, W.Y. Cheung, W.A. Reed, V. Mizrahi, T. Erdogan, P.J. Lemaire, A.M. Vengsarkar, D.J. DiGiovanni, D.W. Peckham and B.H. Rockney. *Optical Amplifiers and Their Applications*. 1995. Vol. 18. OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 1995), paper SaA4.
9. Dianov E.M. Grekov M.V. et al. CW high power 1.24 μm and 1.48 μm Raman lasers based on low loss phosphosilicate fibre. *Electronics Letters*. 1997. Vol. 33. № 18. P. 1542–1544.
10. Дианов Е.М. Волоконні лазери. *Успехи фізических наук*. 2004. Т. 174. № 10. С. 1139–1142.
11. Three-cascaded 1407-nm Raman laser based on phosphorus-doped silica fiber / E.M. Dianov, I.A. Bufetov, M.M. Bubnov, M.V. Grekov, S.A. Vasiliev and O.I. Medvedkov. *Optics Letters*. 2000. Vol. 25. № 18. P. 402–404.
12. Волоконні ВКР лазери та підсилювачі оптичного випромінювання : монографія / В.І. Григорук, В. Загородній, А.В. Іванчук та ін. Київ : Каравела, 2018. 382с. С. 62–128.
13. Six wavelength Raman fiber laser for C- and L-band Raman amplification and dynamic gain flattening / M.D. Mermelstein, C. Horn, S. Radic, C. Headley. *Electronics Letters*. 2002. Vol. 38. № 13. P. 636–638.
14. Doubly clad high brightness Nd fiber laser pumped by Ga Al As phased array / H. Po, E. Snitzer, L. Tumminelli, F. Hakimi, N. M. Chu and T. Haw. *Optical Fiber Communicatioins Conf.* Houston, TX, 1989.
15. Коротков П.А., Фелінський Г.С. ВКР підсилення світла в одномодових кварцових волокнах. *Український фізичний журнал. Огляди*. 2009. Т. 6. № 2. С. 103–168.
16. Moon D.S., Chung Y. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser assisted with four-wave mixing of dispersion-shifted fiber. *Optics Communications*. 2013. Vol. 286. P. 239–243.
17. High-frequency microwave signal generation using dual-wavelength emission of cascaded DFB fiber lasers with wavelength spacing tunability / G.E. Villanueva, J. Palaci, J.L. Cruz et al. *Optics Communications*. 2010. Vol. 283. P. 5165–5168.
18. Dual-wavelength fiber laser using an inverse-Gaussian apodized fiber Bragg grating for tunable microwave generation / B. Lin, S.C. Tjin, M. Jiang, P.P. Shum, Yan He and Yao Ge. *Proc. 16th Opto-Electronics and Communications Conference*. Taiwan, 2011. P. 196–197.
19. Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser with CMFBG filter and saturable absorber / S. Feng, S. Lu, W. Peng and Qi Li. *Optics Laser Technology*. 2013. Vol. 45. P. 32–36.
20. A Tunable and Switchable Single-longitudinal-mode Dual-wavelength Fiber Laser for Microwave Generation / F. Koyama, S. Chuang, G. Duan, and Y. Huang, eds.. *Optoelectronic Materials and Devices V*. 2010. Vol. 7987. P. 728–729.
21. A microwave photonic notch filter using a microfiber ring resonator / Z. Yu, Z. Xin-Liang, X. En-Ming, H. De-Xiu and C. Guo-Jie. *Chinese Physics Letters*. 2010. Vol. 27. P. 74207–074207.
22. Compact Dual-Wavelength Laser Generation Using Highly Concentrated Erbium-Doped Fiber Loop Attached to Microfiber Coupler / A. Sulaiman, S.W. Harun, M.Z. Muhammad and H. Ahmad. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2013. Vol. 49. № 7. P. 586–588.
23. Widely tunable dual-wavelength Er³⁺-doped fiber laser for tunable continuouswave terahertz radiation / Min Yong Jeon, Namje Kim, Jaeheon Shin, Jong Sool Jeong, Sang-Pil Han, Chul Wook Lee, Young Ahn Leem, Dae-Su Yee, Hyang Sook Chun, and Kyung Hyun Park. *Optics Express*. 2010. Vol. 18. № 12. P. 12291–12297.
24. Design of a Photonic Crystal Waveguide for Terahertz-Wave Difference-Frequency Generation / T. Chen, J. Sun, L. Li, J. Tang and Y. Zhou. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2012. Vol. 24. № 11. P. 921–923.

25. Saito K., Tanabe T., Oyama Y. THz-Wave Generation from GaP THz Photonic Crystal Waveguides under Difference-Frequency Mixing. *Optics and Photonics Journal*. 2012. Vol. 2. P. 201–205.
26. High-energy and ultra-wideband tunable terahertz source with DAST crystal via difference frequency generation / H. Yixin, Y. Wang, Xu De-Gang, M. Nie, C. Yan, L. Tang, J. Shi, J. Feng, D. Yan, H. Liu, B. Teng, H. Feng, J. Yao. *Applied Physics B*. 2017. № 124.
27. Корисна модель RU 187 069 U1 від 18.02.2019 / И.С. Паняев, Д.Г. Санніков, Ю.С. Дадоєнкова, І.О. Золотовський.
28. Ярив А. Квантовая электроника / пер. с англ. ; под ред. Я.И. Ханина. 2-е изд. Москва : Сов. радио, 1980. Пер. изд. : Yariv A. Quantum electronics. США, 1975. 488 с., ил.
29. Fiber Bragg Grating Cavities in Two-Wave Raman Laser for Terahertz Telecommunication Application / M.I. Reznikov, G.S. Felinskyi, A.V. Korchak and I.V. Tarashchuk. *Conference proceedings of the 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. April 16–18, 2019. Kyiv, 2019.
30. TeraHertz Photonics for Wireless Communications / A.J. Seeds, Haymen Shams, Martyn J. Fice and Cyril Renaud. *Journal of Lightwave Technology*. 2014. Vol. 33. № 3. P. 1–1.
31. A method to predict the Raman gain spectra of germanosilicate fibers with arbitrary index profiles / J. Bromage, K. Rottwitt and M.E. Lines. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2002. Vol. 14. № 1. P. 24–26.
32. Dianov E.M. Advances in Raman fibers. *Journal of Lightwave Technology*. 2002. Vol. 20. № 8. P. 1457–1462.
33. Сердега І.В., Григоруку В.І., Фелінський Г.С. Спектроскопічні особливості профілів ВКР підсилення в одномодових волокнах на основі кварцового скла. *Український фізичний журнал*. 2018. Т. 63. № 8. С. 681–699.
34. Корисна модель UA 148586 U від 25.08.2021 / В.І. Григоруку, О.В. Корчак, М.І. Резніков, Г.С. Фелінський.
35. Суцільно-волоконний двохчастотний ВКР лазер для телекомунікаційних систем терагерцового діапазону / В.А. Дружинін, О.В. Корчак, М.І. Резніков та Г.С. Фелінський. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»*. Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». 2020. № 80. С. 63–72.

Korchak O.V., Krutin Y.V., Reznikov M.I., Felinskyi G.S. TERAHERTZ RADIATION SOURCE BASED ON LASER SRS PHOTONICS

As a result of the review of publications, the main problems of existing methods of obtaining a highly efficient source of terahertz radiation, ranging from solid-state lasers to all-fiber lasers based on the effect of stimulated Raman scattering (SRS), are formulated. The paper proposes a scheme for implementing an effective terahertz radiation source of the signal formation and transmission path of the telecommunications system. Preliminary optical transmitter circuits based on semiconductor laser diodes have problems related to frequency stabilization and a given phase difference. The all-fiber design of fiber Raman lasers is an undeniable advantage over laser diodes, since such a laser contains no external optical elements, has high efficiency and stability of generation with high beam quality. In addition, increased frequency stabilization of two coherent radiation sources is provided by a common laser pump. The proposed two-wavelength (2λ) fiber laser is characterized by the fact that the generation is created by the effect of stimulated Raman scattering. As a result, the terahertz source will give a significant reduction in phase noise, which should be expected due to the generation of both lasers from a common pump source. It is shown that an optimal choice of active fiber can reduce the threshold pumping power by tens or even hundreds of times (for example, through the use of Raman scattering fiber doped with 20% GeO_2 in the core instead of pure silica fiber SiO_2), and this, in turn, will significantly reduce the mass and size characteristics of the two-wave fiber Raman laser by optimizing its design. The parameters of laser resonators and amplification factors of a two-wave fiber Raman laser for three bands of transparency in the terahertz range relevant for the application of modern telecommunications systems were determined. It is shown that the proposed method of implementation of the radiation source allows to simplify its circuit design in comparison with similar designs.

Key words: *stimulated Raman scattering, fiber Bragg grating, fiber laser, pump source, laser diode.*