

УДК 621.39

Суцільно-волоконний двохчастотний ВКР лазер для телекомунікаційних систем терагерцового діапазону

Дружинін В. А., Корчак О. В., Резніков М. І., Фелінський Г. С.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

E-mail: felinskyi.gs@gmail.com

З метою вдосконалення терагерцових технологій та підвищення ефективності джерел випромінювання для телекомунікаційних систем терагерцового діапазону запропоновано двохвильовий (2λ) волоконний лазер, в якому генерація створюється за рахунок ефекту вимушеного комбінаційного розсіювання. За результатами аналізу наявних експериментальних даних у роботі встановлено, що профіль підсилення вимушеного комбінаційного розсіювання в одномодових волокнах дозволяє реалізувати 2λ лазер у повністю волоконному виконанні. Головною перевагою запропонованого терагерцового джерела є суттєве зменшення фазових шумів, якого слід очікувати за рахунок генерації обох лазерів від спільного джерела помпування. Визначено головні параметри волоконних бреггівських ґраток для 2λ лазерних резонаторів, сукупність яких доводить їх відповідність сучасним вимогам монолітної інтеграції пристрою у повністю волоконну конструкцію. Шляхом моделювання у різних типах волокна встановлено можливість зменшення порогової потужності накачки щонайменше у 400 разів, що дозволить значно зменшити масо-габаритні характеристики такого лазера.

Ключові слова: вимушене комбінаційне розсіяння; волоконна бреггівська ґратка; волоконний лазер; лазерний резонатор; потужність накачки; порогова потужність; телекомунікаційні системи; терагерцовий діапазон

DOI: [10.20535/RADAP.2020.80.63-72](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.63-72)

1 Стан та перспективи освоєння терагерцового діапазону для бездротового зв'язку

Стрімке зростання вимог до підвищення швидкості передачі даних та їх обсягу у кабельних і бездротових комунікаціях спостерігається вже протягом останніх десятиліть [1, 2]. Така тенденція обумовлюється перш за все збільшенням кількості користувачів мереж з одночасним підвищенням їх вимог до послуг, які надаються провайдерами телекомунікаційного контенту (дані надвисокої чіткості, завантаження великого обсягу інформації у найкоротші терміни, надшвидкий обмін даними між окремими користувачами та групами користувачів, швидке відновлення мережевих підключень у районах стихійного лиха, тощо). За прогнозами аналітиків таке зростання триватиме протягом наступного десятиліття [3–6]. Високошвидкісні з'єднання на основі технології "волокно до будинку" вже широко застосовуються, однак вони не здатні задовольнити усім вимогам, що висуваються користувачами, через велику кількість обмежень, до яких, зокрема, відносяться: ускладнене географічне роз-

ташування телекомунікацій, неузгодженість стратегій постачальників послуг, руйнування у випадку природних (неприродних) катастроф. У цьому сенсі бездротові мережі у сполученні із волоконно-оптичним зв'язком стають ключовим будівельним блоком для розгортання наступного покоління телекомунікаційних мереж, здатних надавати послуги в будь-якому місці та в будь-який час [7, 8]. З технічної точки зору, волоконно-оптичні лінії з великою інформаційною ємністю, що поєднані із бездротовим зв'язком, який вирізняється простотою установки та меншою вартістю, можуть бути синергетично об'єднані з метою задоволення зазначених вимог взагалі та реалізації мобільного зв'язку більшої пропускної спроможності зокрема [9, 10].

За цих умов стає актуальною проблема узгодження швидкостей оптичних та бездротових мереж доступу. Тому для бездротових систем передачі даних необхідно значне збільшення пропускної спроможності для забезпечення швидкості передачі даних більше, ніж 100 Гбіт/с, яку вже типово забезпечують волоконно-оптичні комунікації, зокрема з використанням ефекту комбінаційного розсіяння (КР) світла в одномодових волокнах. Крім того,

швидкості передачі даних понад 100 Гбіт/с (навіть до 10 Тбіт/с) забезпечуються зараз завдяки застосуванню оптичних підсилювачів на ефекті вимушеного комбінаційного розсіяння (ВКР).

На відміну від волоконно-оптичних комунікацій у сфері бездротового зв'язку звичайні смуги частот до 60 ГГц майже повністю заповнені [11, 12]. Тому багато зусиль зараз зосереджено на освоєнні смуг на вищих частотах, зокрема в міліметровому діапазоні та у майже невивченому терагерцовому діапазоні [13–17].

Дотепер значна частина терагерцового діапазону електромагнітного спектра залишається неосвоєною через такі суттєві проблеми [17–20]:

- надвелике згасання сигналів цього діапазону у земній атмосфері;
- відсутність дієвих схмотехнічних рішень та апаратної реалізації (у промислових масштабах) джерел і приймачів сигналів терагерцового діапазону.

1.1 Особливості розповсюдження сигналів терагерцового діапазону

З використанням терагерцового діапазону постають значні обмеження на умови функціонування сучасних телекомунікаційних систем, оскільки втрати в атмосфері збільшуються пропорційно квадрату значення частоти-носія. Тому передача сигналу терагерцового діапазону в атмосфері можлива тільки на невеликі відстані (до 100 м) і тільки у певних вікнах (смугах) прозорості. У роботах [19, 20] опубліковані результати досліджень особливостей розповсюдження і згасання сигналів у діапазоні 0,1 ТГц ... 1,0 ТГц.

Показано, що передача сигналу зазначеного діапазону у вільному просторі можлива дійсно на невеликі відстані і тільки у трьох вікнах (смугах) прозорості із загальною смугою частот 28 ГГц, а саме:

- смуга 1: 0,44 ... 0,52 ТГц ($f_{центр} = 0,48$ ТГц);
- смуга 2: 0,56 ... 0,72 ТГц ($f_{центр} = 0,64$ ТГц);
- смуга 3: 0,82 ... 0,86 ТГц ($f_{центр} = 0,84$ ТГц),

в яких згасання сигналу становить 125 дБ ... 140 дБ. Отже, такі значення втрат сигналу слід враховувати при формуванні технічних вимог до потужності передавача та енергетичного потенціалу лінії зв'язку.

Залежність питомого згасання сигналу терагерцового діапазону від частоти [18] показано на рис. 1, на якому також зазначені 3 смуги прозорості, і саме вони зараз складають предмет найбільш актуальних досліджень [19].

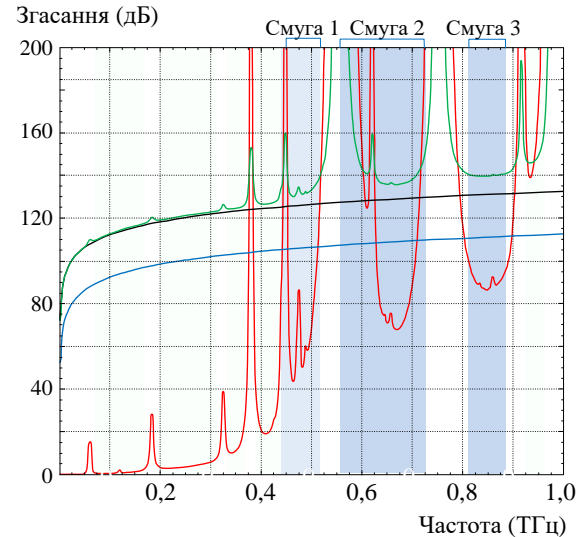


Рис. 1. Залежність згасання сигналу терагерцового діапазону від частоти

1.2 Аналіз схмотехнічної реалізації джерел випромінювання терагерцового діапазону

Нові фотонні системи [18–20] дозволяють вирішувати проблеми застосування терагерцового діапазону для бездротового зв'язку шляхом їх поєднання із потенціалом оптико-волоконних технологій. Саме це дозволяє принципово уникнути головної проблеми надзвичайно великих втрат при розповсюдженні сигналів в атмосфері та перевести зв'язок у терагерцовому діапазоні у практичну площину для задоволення вимог усе більшої пропускної здатності сучасних систем зв'язку. Водночас, одним з головних та не вирішених натеper завдань терагерцових технологій є розробка і реалізація ефективного джерела випромінювання.

У телекомунікаційних системах терагерцового діапазону, які описані в літературі (див. зокрема [18]), у тракці формування та передавання сигналів застосовуються два незалежних (як правило напівпровідникових) лазери. Накачка одного з цих лазерів модулюється інформаційними сигналами (інформаційна складова), використовуючи амплітудну модуляцію. Інший лазер зі зміщеною частотою генерації використовується в якості гетеродина. За допомогою змішувача, який виділяє різницеву частоту обох лазерів, формується терагерцова несуча частота, яка модульована корисним сигналом. Саме цей сигнал у терагерцовому діапазоні буде використаний для бездротової передачі до пристрою користувача шляхом випромінювання у вільному просторі.

Основним недоліком елементів такої системи є некогерентність сигналів у випадку двох незалежних лазерів, що призводить до появи у змішувачі

значних фазових шумів. Цей додатковий шум, що заважає прийому корисного сигналу, може набувати принципового значення, особливо після великих втрат в атмосфері.

Вже досить тривалий час волоконні лазери, які використовують ефект вимушеного комбінаційного розсіювання (ВКР) знаходять широке застосування в якості джерел накачки ВКР та ербієвих підсилювачів [21]. ВКР волоконні джерела, які випромінюють на кількох довжинах хвиль, були запропоновані для розширення спектра підсилення ВКР волоконних підсилювачів та покращення їх шумових характеристик [22]. Як правило, в таких пристроях в якості активного середовища використовується спеціалізоване волокно, а генерація на декількох довжинах хвиль досягається встановленням відповідного числа пар волоконних бреггівських ґраток (ВБґ), які утворюють резонатори волоконного лазера. У нашій роботі двоххвильовий (2 λ) ВКР лазер запропоновано використати для генерації терагерцового випромінювання.

Науковим завданням даної роботи є доведення можливості створення двоххвильового ВКР лазера для джерела терагерцової несучої частоти, два резонатори якого побудовані із використанням ВБґ (вхідних і вихідних) за різних значень коефіцієнтів відбиття цих ВБґ.

2 Обґрунтування можливості реалізації двоххвильового ВКР лазера

В даній роботі запропоновано нове джерело випромінювання тракту формування і передавання сигналів телекомунікаційної системи терагерцового діапазону, в якому два окремих лазери замінені на один 2 λ волоконний лазер. У такому лазері в якості активного середовища може використовуватись будь-який тип волокна, а генерація отримується за рахунок ефекту ВКР світла [23]. Використання 2 λ ВКР лазера дає змогу позбутися некогерентності сигналів лазерів (генерація отримується від спільного джерела лазерної накачки), зменшити рівень фазових шумів і покращити якість сигналу, що передається до пристрою користувача.

Крім того, у роботі проведений порівняльний аналіз і обґрунтовані переваги КР волокна, легованого 20% GeO₂ у серцевині, у порівнянні зі звичайним "чистим" кварцовим волокном SiO₂.

Основою вибору 2 λ ВКР лазера є тип волокна, яке використовується в якості активного середовища. Саме властивості цього середовища й визначають параметри такого лазера. У роботах [24–26] детально розглянуті та досліджені існуючі типи волокон, які використовуються в 2 λ ВКР лазерах.

2.1 Вибір активного волокна для ВКР лазера

У роботі [27] описаний ВКР лазер з робочою довжиною хвилі 940 нм. Для цього лазера в якості активного середовища розглядалося лише звичайне "чисте" кварцове волокно SiO₂, генерація (накачка) якого здійснюється за допомогою лазерного діода (ЛД). Термін "чисте" кварцове волокно SiO₂ є загальноприйнятим для позначення волокон з відносно малими концентраціями (не більше, ніж 3% ... 4%) домішок GeO₂, які необхідні для утворення серцевини. Для такого типу волокна максимальне значення коефіцієнта ВКР підсилення складає $g_{Rmax}=0,4$ (Вт·км)⁻¹ [24].

Утім, у КР волокні, легованому 20% GeO₂ у серцевині, виміряне значення g_{Rmax} щонайменше на порядок перевищує коефіцієнт ВКР підсилення звичайного "чистого" кварцового волокна SiO₂. Профілі ВКР підсилення волокон зазначених типів зображено на рис. 2.

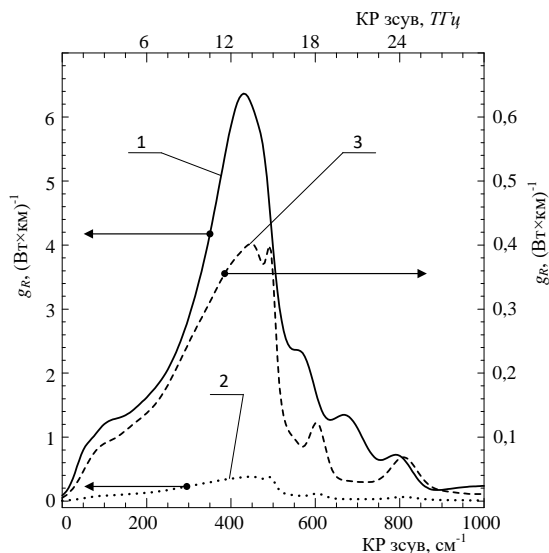


Рис. 2. Профілі ВКР підсилення: 1 – КР волокна, легованого 20% GeO₂ у серцевині; 2 – звичайного "чистого" кварцового волокна SiO₂; 3 – звичайного "чистого" кварцового волокна SiO₂, збільшений у 10 разів

На рис. 2 пунктирною лінією позначена крива, якій відповідає збільшений у 10 разів профіль ВКР підсилення "чистого" кварцового волокна SiO₂. На цьому ж рисунку суцільною лінією позначена крива, яка відповідає профілю ВКР підсилення КР волокна, легованого 20% GeO₂ у серцевині.

Ліва шкала (рис. 2) відноситься до профілів ВКР підсилення "чистого" кварцового волокна SiO₂ і КР волокна, легованого 20% GeO₂ у серцевині. Права шкала (рис. 2) відповідає збільшеному в 10 разів профілю ВКР підсилення "чистого" кварцового волокна SiO₂.

Аналіз профілів ВКР підсилення показує, що КР волокно, леговане 20% GeO₂ у серцевині, має $g_{Rmax}=6,38$ (Вт·км)⁻¹, а у "чистому" кварцовому волокні SiO₂ $g_{Rmax}=0,4$ (Вт·км)⁻¹. Таким чином, використання КР волокна, легованого 20% GeO₂ у серцевині, в якості активного середовища для створення 2λ ВКР лазера є більш доцільним. Крім того, частотна залежність профілю ВКР підсилення КР волокна, легованого 20% GeO₂ у серцевині, має суттєво меншу нерівномірність в області головного максимуму.

Збільшення g_{Rmax} майже у 16 разів у КР волокну, легованому 20% GeO₂ у серцевині, у порівнянні із звичайним "чистим" кварцовим волокном SiO₂ дозволяє суттєво зменшити потужність накачки.

2.2 Схемотехнічна реалізація двохвильового ВКР лазера

За умови забезпечення потужності випромінювання, яка перевищує поріг генерації [23], в якості джерела накачки у 2λ ВКР лазері можливо використовувати як напівпровідникові ЛД, так і будь-який інший лазер.

Запропонована схема ВКР лазера зображена на рис. 3. Вхідна і вихідна бреггівські ґратки, які позначено ВБГ_{λ1}, формують область першого резонатора. Відповідно, вхідна і вихідна бреггівські ґратки, які позначено ВБГ_{λ2}, формують область другого резонатора. Періоди кожної з пар ВБГ, що використовуються в якості дзеркал 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 волокно, фактично формує лазерний резонатор. Монолітне виконання ВБГ суттєво покращує якість лазерних резонаторів і стабільність їх характеристик.

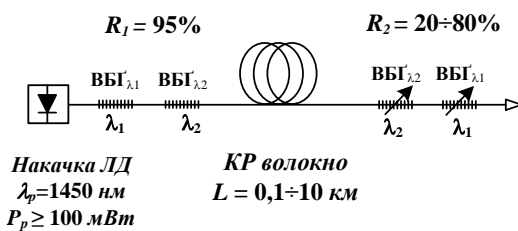


Рис. 3. Схема двохчастотного ВКР лазера

Вибір в якості активного середовища КР волокна, легованого 20% GeO₂ у серцевині, обумовлений тим, що цей тип волокна має найбільший коефіцієнт підсилення ($g_{Rmax} = 6,38$ (Вт·км)⁻¹, див. рис. 2). Лазерний діод накачки має параметри $\lambda_p = 1450$ нм і $P_p = 100$ мВт для того, щоб забезпечувати відповідне зміщення частоти (генерація повинна відбуватися на частоті $\lambda_0 = 1550$ нм), а потужність на виході була б достатньою для подачі сигналу на на-

ступні елементи тракту формування і передавання сигналів телекомунікаційної системи терагерцового діапазону. Довжина КР волокна обрана 0,1 км ... 10 км, виходячи з необхідності забезпечення можливості генерації сигналу стоксової хвилі на виході 2λ ВКР лазера.

Для схемотехнічної реалізації 2λ ВКР лазера обрано такі початкові дані:

- активне середовище – КР волокно, леговане 20% GeO₂ у серцевині;
- лазерний діод накачки генерує на частоті, яка відповідає $\lambda_p = 1450$ нм;
- потужність накачки не більше 100 мВт;
- довжина КР волокна обраного типу складає 0,1 км ... 10 км.

3 Моделювання двохвильового ВКР лазера

3.1 Режим повної прозорості в активному волокну

Порогова потужність помпування або функція повної прозорості, що забезпечує режим повної прозорості КР волокна для ВКР лазера, визначається за такою формулою [28]:

$$P_p^{th}(\omega) = \frac{\alpha_s}{g_R(\omega)}, \quad (1)$$

де α_s – коефіцієнт втрат на стоксовій частоті, $g_R(\omega)$ – профіль ВКР підсилення, який можна отримати в аналітичному вигляді у [26].

Оцінити параметри підсилення у КР волокну за умов $P_p > P_p^{th}$ на заданих частотах стоксового зсуву та $\lambda_p = 1450$ нм можна, використовуючи функцію повної прозорості $P_p^{th}(\omega)$, яка визначається за допомогою формули (1).

На рис. 4 показано профіль надпорогового підсилення у КР волокну обраного типу або функція повної прозорості цього волокна [23]. Як видно з рис. 4, ВКР волокно, леговане 20% GeO₂ у серцевині, перетворюється в активне середовище у всьому діапазоні довжин хвиль від 1,51 мкм до 1,59 мкм за умови потужності накачки $P_p = 100$ мВт, що відповідає зсуву частоти ~ 10 ТГц.

Тому стоксові частоти навколо $\lambda_s = 1550$ нм будуть забезпечувати роботу у 1-3 смугах вищезгаданих терагерцових телекомунікаційних вікон. Крім того, відповідна вихідна потужність повинна бути достатньою для сигналів, які надходять на подальші елементи шляху формування і передачі сигналів терагерцової телекомунікаційної системи.

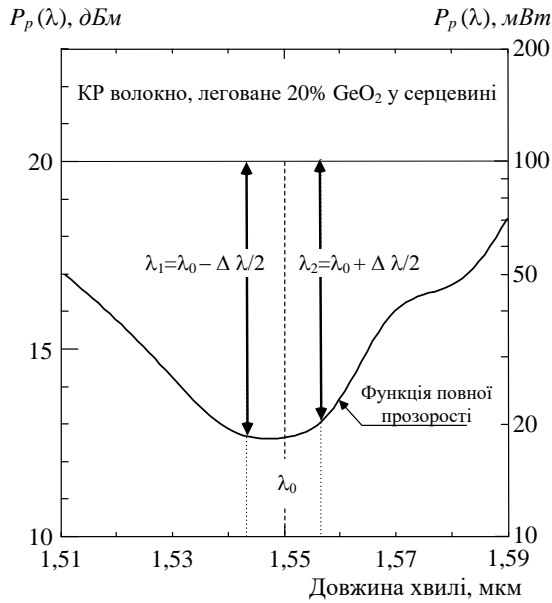


Рис. 4. Функція повної прозорості у КР волокні, що зображена суцільною кривою, а вертикальними стрілками позначено чисте підсилення для $\lambda_p = 1450$ нм та $P_p = 100$ мВт. Зсув $\Delta\lambda$ між довжинами хвиль λ_1 та λ_2 вибрано симетричним відносно $\lambda_0 = 1,55$ мкм

Генерація сигналу на будь-якій заданій довжині хвилі λ_i можлива, якщо значення потужностей накачки вище кривої, зображеної на рис. 4. Значення ж потужностей накачки нижче цієї кривої, відповідають режиму згасання стоксових хвиль. У роботі [28] розраховані значення порогових потужностей накачки 2λ ВКР лазера і коефіцієнти підсилення для смуг прозорості з центральними частотами в 0,48 ТГц, 0,6 ТГц і 0,84 ТГц.

3.2 Аналіз резонатора двоххвильового ВКР лазера

Аналіз проводився у наступній послідовності:

- i. Оптимізація спектра ВКР підсилення активного волокна відносно мінімуму коефіцієнта втрат;
- ii. Оцінка порогу генерації на стоксовій частоті для різних значень коефіцієнта відбиття R_2 вихідної бреггівської ґратки;
- iii. Розрахунок довжини резонатора та порогових потужностей генерації в 2λ ВКР лазері для трьох реальних терагерцових діапазонів.

3.3 Спектр ВКР підсилення та мінімум втрат в активному волокні лазера

Профіль ВКР підсилення $g_R(\lambda)$ та спектр втрат $\alpha(\lambda)$ кварцового ВКР волокна в діапазоні від 1,25 мкм до 1,7 мкм показано на рис. 5 [29]. Для усіх стандартних телекомунікаційних кварцових волокон [25] максимум стоксового зміщення в спектрі ВКР підсилення складає близько 13 ТГц. Це дозволяє стверджувати, що максимум профілю ВКР підсилення для ВКР волокна розміщений на $\lambda_s = 1,55$ мкм у випадку, коли довжина хвилі накачки дорівнює $\lambda_p = 1,45$ мкм. Таким чином, коефіцієнти втрат α_p і α_s для подальшого розрахунку параметрів резонатора можуть бути визначені безпосередньо з рис. 5.

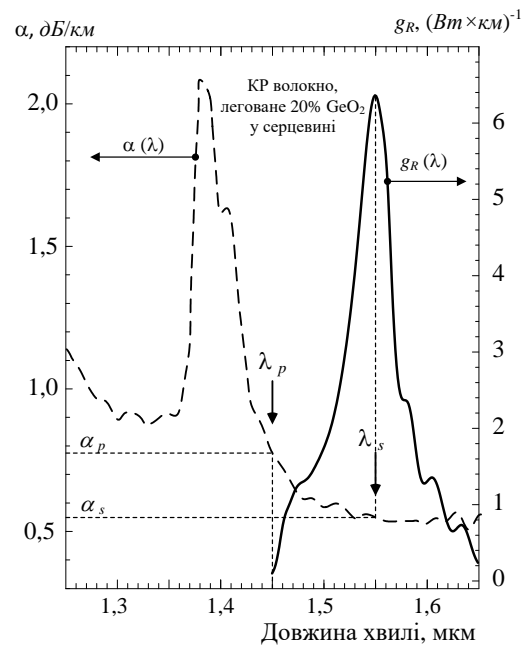


Рис. 5. Профіль ВКР підсилення $g_R(\lambda)$ КР волокна, легованого 20% GeO_2 у серцевині та спектральний розподіл коефіцієнта втрат $\alpha(\lambda)$ в діапазоні довжин хвиль від 1,25 мкм до 1,7 мкм

На рис. 5 характерні точки відмічені стрілками, а їх числові значення відраховуються на вертикальній та горизонтальній шкалі, відповідно. Особливо необхідно відзначити, що для довжини накачки 2λ ВКР лазера $\lambda_p = 1,45$ мкм коефіцієнт втрат α_p дорівнює 0,77 дБ/км, а у той же час на стоксовій довжині хвилі $\lambda_s = 1,55$ мкм, як бачимо, коефіцієнт втрат α_s набуває свого мінімального значення, яке дорівнює 0,55 дБ/км. Саме тому, згідно з (1), порогова потужність помпування, яка перетворює волокно в активне лазерне середовище, також буде мінімальною.

3.4 Поріг генерації на стоксовій довжини хвилі

Поріг генерації на стоксовій частоті потужності накачки визначається як [27]:

$$P_{th} = \frac{2\alpha_s L - \ln(R_1 R_2)}{2g_R L_{eff}}, \quad (2)$$

де L – довжина волокна між двома бреггівськими ґратками, R_1 і R_2 – коефіцієнти відбиття вхідної та вихідної бреггівських ґраток відповідно, L_{eff} – ефективна довжина взаємодії хвиль накачки та стоксової хвилі, що визначається як [28]:

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha_p L)}{\alpha_p}, \quad (3)$$

де α_p – коефіцієнт поглинання (втрат) на довжині хвилі накачки.

Залежності порогової потужності накачки від довжини волокна L між двома бреггівськими ґратками (теоретично вона може варіюватися від 0 км до 10 км) для сталого значення коефіцієнта відбиття вхідної бреггівської ґратки $R_1 = 0,95$ та чотирьох значень коефіцієнта відбиття вихідної бреггівської ґратки R_2 (0,2; 0,4; 0,6; 0,8) наведено на рис. 6.

Очевидним висновком з рис. 6 є те, що навіть за значень довжини волокна L до 1 км можлива генерація сигналу стоксової хвилі на виході. Очевидним також є той факт, що менші величини порогової потужності стоксової хвилі можуть бути досягнуті шляхом збільшення значень коефіцієнта відбиття вихідної бреггівської ґратки R_2 .

Наприклад, за довжини волокна $L = 1,5$ км та значень коефіцієнта відбиття вихідної бреггівської ґратки $R_2 = 0,2$ і $R_2 = 0,8$ порогова потужність стоксової хвилі буде дорівнювати 110 мВт і 25 мВт відповідно. За значень довжини волокна L від 2 км і більше порогова потужність майже не змінюється і визначається в межах від 40 мВт до 70 мВт для усіх значень R_2 .

Порогова потужність, виходячи з рис. 6, різко збільшується для довжини волокна менше одного кілометра. У випадку необхідності використання менших довжин волокнами повинні забезпечувати більш високі потужності накачки і навпаки. Оптимальна довжина визначається як $(1,5 \pm 0,1)$ км за допомогою використання критерія мінімальної порогової потужності стоксової хвилі для ВКР волокна.

¹ підсилення одиниці довжини активного волокна між ВБГ₁ та ВБГ₂ при $P_p = 100$ мВт.

² вважається, що $R_1 = 95\%$

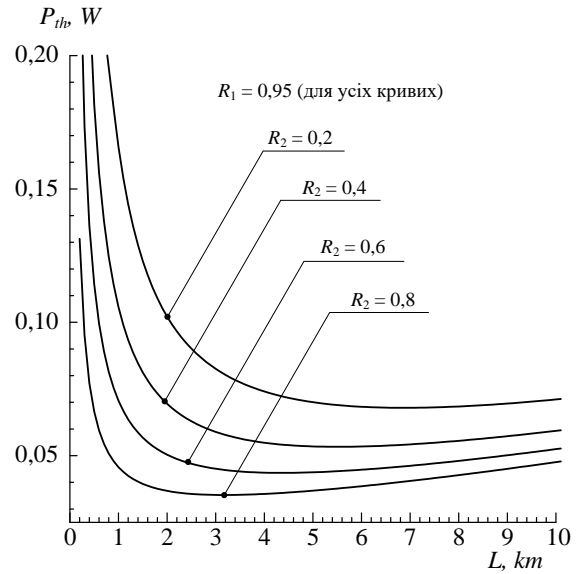


Рис. 6. Порогова потужність стоксової хвилі як функція довжини волокна між двома бреггівськими ґратками за різних значень коефіцієнта відбиття вихідної бреггівської ґратки

3.5 Параметри лазерного резонатора

Нами визначено параметри всіх трьох пар ВБГ у 2λ ВКР лазерах, кожний з яких призначений для роботи у відповідній смузі прозорості терагерцового діапазону, а саме з центральними частотами, які складають 0,48 ТГц, 0,64 ТГц та 0,84 ТГц. Ці параметри зведено до табл. 1. Згідно з аналізом у п.3.4 активним середовищем лазерів слід використовувати КР волокно, що леговане 20% GeO₂ у серцевині. Це є оптимальним вибором з точки зору забезпечення мінімальних значень як порогової потужності помпування P_p^{th} згідно з (2) (див. також рис. 3), так і порогу генерації лазерних резонаторів згідно з (3).

Саме завдяки найвищим значенням ВКР підсилення, згідно з даними табл. 1, усі параметри трьох 2λ ВКР лазерів для кожного заданого діапазону можна реалізувати за значень потужності накачки не більше 100 мВт із застосуванням довжини волокна не більше, ніж $(1,5 \pm 0,1)$ км. Зауважимо, що значна лінійна довжина волокна не заперечує можливість його досить компактного укладання у реальному пристрої. Дійсно для стандартного зовнішнього діаметру волокна у 125 мкм загальний об'єм кварцового скла (без захисних покриттів) складає всього 12,3 см³ на кожний кілометр довжини, а відповідна маса скла не перевищує $m \leq 27$ г.

Отже, наше моделювання показує можливість створення високоефективних 2λ ВКР лазерів у суцільно-волоконному виконанні, яке забезпечує ви-

Табл. 1 Параметри лазерних резонаторів та коефіцієнтів підсилення двохвильового ВКР лазера для трьох смуг прозорості у терагерцовому діапазоні

№	Параметр	Смуга 1 (0,48 ТГц)		Смуга 2 (0,64 ТГц)		Смуга 3 (0,84 ТГц)	
		1-й рез-р	2-й рез-р	1-й рез-р	2-й рез-р	1-й рез-р	2-й рез-р
1.	Довжина хвилі λ_s , мкм	1,5483	1,5517	1,5476	1,5524	1,5466	1,5534
2.	Поріг підсилення P_p^{th} , мВт	18,2	18,8	18,1	18,9	18,1	19,2
3.	Коеф. підсилення ¹ G_R , дБ/км	2,25	2,16	2,26	2,14	2,26	2,11
	G_R , км ⁻¹	0,518	0,498	0,520	0,493	0,521	0,485
4.	Довжина L , км	1,0	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5
5.	Коеф. відбиття ² R_2 , %	60	60	80	80	20	20
6.	Поріг генерації P_{th} , мВт	72	72	75	75	123	123

соку надійність оптичних компонентів із цілком прийнятним для практики масо-габаритними характеристиками пристрою.

Висновки та напрями подальших досліджень

Результати моделювання волоконних бреггівських ґраток в GeO_2 активному ВКР волокні однозначно вказують на можливість реалізації двохвильового ВКР лазера для використання у якості джерела випромінювання в терагерцових телекомунікаційних системах. В роботі запропонована універсальна схема конструкції 2 λ ВКР лазера для використання в якості активного середовища будь-яких типів волокон у терагерцовому діапазоні від 0 до 10 ТГц та вибрано оптимальний тип активного волокна. Показано, що параметри 2 λ ВКР лазера, створеного відповідно до запропонованої схеми, будуть залежати тільки від параметрів лазерних резонаторів, побудованих на основі волоконних бреггівських ґраток. Крім того, регулювання порогу генерації та вихідної потужності лазерів можна здійснювати зміною коефіцієнтів відбиття вихідних бреггівських ґраток. Параметри лазерних резонаторів за результатами моделювання представлені для трьох актуальних смуг у низькочастотній області терагерцового діапазону, що мають найменші показники згасання.

Детальний аналіз переваг 2 λ ВКР лазера, побудованого на КР волокні, легovanому 20% GeO_2 у серцевині, представлено у порівнянні зі звичайним "чистим" кварцовим волокном SiO_2 . В результаті доведено, що порогову потужність накачки можна зменшити як мінімум у 400 разів, а саме з 40 Вт чи більше в чистому SiO_2 до 100 мВт у КР волокні, легovanому 20% GeO_2 у серцевині. Таким чином показано можливість значного зменшення масо-габаритних характеристик 2 λ ВКР лазера шляхом оптимізації його конструкції. Представлені результати дають можливість кількісної оцінки перспектив вдосконалення запропонованих лазерів, зокрема зменшення довжини КР волокна до величин $L < 0,5$ км.

Перелік посилань

- 1 Hesler J., Prasankumar R., and Tignon J. Advances in terahertz solid-state physics and devices. *J. App. Phys.*, vol.126, no.11, p.110401, (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5122975>
- 2 Shi Jia, Xianbin Yu, Hao Hu, Jinlong Yu, Pengyu Guan, Francesco Da Ros, Michael Galili, Toshio Morioka, and Leif K. Oxenlowe. THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band. *OPTICS EXPRESS*, Vol. 24, No. 21, 17 Oct 2016, 23777- 23783.
- 3 M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photonics* 1(2), 97–105 (2007).
- 4 H. J. Song and T. Nagatsuma, "Present and future of terahertz communications," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* 1(1), 256–263 (2011).
- 5 S. Cherry, "Edholm's law of bandwidth," *IEEE Spectr.* 41(7), 58–60 (2004).
- 6 Y. Choi, J. W. Choi, and J. M. Cioffi, "A geometric-statistic channel model for THz indoor communications," *J. Infrared Milli. Terahz Waves* 34(7-8), 456–467 (2013).
- 7 A. Kanno, T. Kuri, I. Hosako, T. Kawanishi, Y. Yoshida, Y. Yasumura, and K. Kitayama, "Optical and millimeter-wave radio seamless MIMO transmission based on a radio over fiber technology," *Opt. Express* 20(28), 29395–29403 (2012).
- 8 A. J. Seeds, H. Shams, M. J. Fice, and C. C. Renaud, "Terahertz photonics for wireless communications," *J. Lightwave Technol.* 33(3), 579–587 (2015).
- 9 M. J. Fice, E. Rouvalis, F. van Dijk, A. Accard, F. Lelarge, C. C. Renaud, G. Carpintero, and A. J. Seeds, "146-GHz millimeter-wave radio-over-fiber photonic wireless transmission system," *Opt. Express* 20(2), 1769–1774 (2012).
- 10 J. Yu, G. K. Chang, Z. Jia, A. Chowdhury, M. F. Huang, H. C. Chien, Y. T. Hsueh, W. Jian, C. Liu, and Z. Dong, "Cost-effective optical millimeter technologies and field demonstrations for very high throughput wireless-over-fiber access systems," *J. Lightwave Technol.* 28(16), 2376–2397 (2010).
- 11 T. Shao, H. Shams, P. M. Anandarajah, M. J. Fice, C. C. Renaud, F. V. Dijk, A. J. Seeds, and L. P. Barry, "Phase noise investigation of multicarrier sub-THz wireless transmission system based on an injection-locked gain-switched laser," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* 5(4), 590–597 (2015).

- 12 G. Ducournau, P. Szriftgiser, A. Beck, D. Bacquet, F. Pavanello, E. Peytavit, M. Zaknoute, T. Akalin, and J.-F. Lampin, "Ultrawide-bandwidth single-channel 0.4-THz wireless link combining broadband quasi-optic photomixer and coherent detection," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* 4(3), 328–337 (2014).
- 13 T. Ishibashi, Y. Muramoto, T. Yoshimatsu, and H. Ito, "Unitraveling-carrier photodiodes for terahertz applications," *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* 20(6), 79–88 (2014).
- 14 A. Dyson, I. D. Henning, and M. J. Adams, "Comparison of type I and type II heterojunction unitravelling carrier photodiodes for terahertz generation," *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* 14(2), 277–283 (2008).
- 15 X. Yu, Y. Chen, M. Galili, T. Morioka, P. U. Jepsen, and L. K. Oxenløwe, "The prospects of ultra-broadband THz wireless communications," in *Proceedings of IEEE 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON, 2014)*, paper Th.A3.3.
- 16 J. Federici and L. Moeller, "Review of terahertz and subterahertz wireless communications," *J. Appl. Phys.* 107(11), 111101 (2010).
- 17 H. Shams, M. J. Fice, K. Balakier, C. C. Renaud, F. van Dijk, and A. J. Seeds, "Photonic generation for multichannel THz wireless communication," *Opt. Express* 22(19), 23465–23472 (2014).
- 18 H Shams and A Seeds "Photonics, fiber and THz wireless communication," *Optics and Photonics News* 28 (3), 24-31, 2017.
- 19 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, Ukraine.
- 20 Y. Khlaponin, G Zhyrov, "Analysis and Monitoring of Telecommunication Networks Based on Intelligent Technologies" CEUR Workshop Proceedings, Selected Papers of the XVI International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security"(ITS 2016). Vol-1813 urn:nbn:de:0074-1813-0 pp. 32 – 39.
- 21 В.І.Григорук, І.В.Сердега, Г.С.Фелінський, П.А.Коротков. Волоконні ВКР лазери та підсилювачі оптичного випромінювання. Розд. 2 у «Взаємодія фізичних полів з наноструктурованими матеріалами». Монографія / В.І.Григорук, А.В.Загородній, А.В.Іванчук та ін. – К:Каравела, 2018. – 382с., с. 62–128. ISBN 978–966–2229–77–6. 67с
- 22 M.D.Mermelstein, C.Horn, S.Radic,C.Headley. Six wavelength Raman fiber laser for C- and L-band Raman amplification and dynamic gain flattening. *Electron. Lett.* 38, 636-638 (2002) <https://doi.org/10.1049/el:20020433>.
- 23 I.Tarashchuk, G. Felinskyi , M. Reznikov. Dual-frequency fiber Raman laser for terahertz and radio-over-fiber applications. Proc. XVIII Int. young scientists' conference on Applied physics, May, 22-26, 2018, Kyiv, Ukraine, P. 122-123.
- 24 J. Bromage, K. Rottwitt, and M. E. Lines, "A method to predict the Raman gain spectra of germanosilicate fibers with arbitrary index profiles," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 24–26, Jan. 2002.
- 25 E.M. Dianov. Advances in Raman fibers. *J. Lightwave Techn.*, Vol. 20, N 8, pp.1457-1462, 2002.
- 26 І.В.Сердега,, В.І.Григорук, Г.С.Фелінський. Спектроскопічні особливості профілів ВКР підсилення в одномодових волокнах на основі кварцового скла // УФЖ, т. 63, № 8, с. 681-699, 2018.
- 27 Babin, S. A., Zlobina, E. A. and Kablukov, S. I. Multi-mode fiber Raman lasers directly pumped by laser diodes. *J. Sel. Top. Quantum Electron.* 24, 1400310 (2018).
- 28 I.Tarashchuk, G. Felinskyi , M. Reznikov Dual-frequency fiber Raman laser for generating radiation of the terahertz band. VIII International Conference on Optoelectronic Information Technologies "PHOTONICS-ODS 2018" Ukraine, Vinnytsia, VNTU October 2-4, 2018, P.211-212.
- 29 I.V. Serdeha, S.V. Honenko, G.S. Felinskyi, M.I. Reznikov, "Pumping wavelength dependence of Raman lasing threshold in highly Ge-doped silica fiber," *Proc. XIV Int. Sci. Conf. "Electronics and Applied Physics"*, October, 23-26, 2018, Kyiv, Ukraine, p. 189.

References

- [1] Hesler J., Prasankumar R. and Tignon J. (2019) Advances in terahertz solid-state physics and devices. *Journal of Applied Physics*, Vol. 126, Iss. 11, pp. 110401. DOI: 10.1063/1.5122975
- [2] Jia S., Yu X., Hu H., Yu J., Guan P., Ros F.D., Galili M., Morioka T. and Oxenløwe L.K. (2016) THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band. *Optics Express*, Vol. 24, Iss. 21, pp. 23777. DOI: 10.1364/oe.24.023777
- [3] Tonouchi M. (2007) Cutting-edge terahertz technology. *Nature Photonics*, Vol. 1, Iss. 2, pp. 97-105. DOI: 10.1038/nphoton.2007.3
- [4] Song H. and Nagatsuma T. (2011) Present and Future of Terahertz Communications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Vol. 1, Iss. 1, pp. 256-263. DOI: 10.1109/tthz.2011.2159552
- [5] Cherry S. (2004) Edholm's law of bandwidth. *IEEE Spectrum*, Vol. 41, Iss. 7, pp. 58-60. DOI: 10.1109/mspec.2004.1309810
- [6] Choi Y., Choi J. and Cioffi J.M. (2013) A Geometric-Statistic Channel Model for THz Indoor Communications. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 34, Iss. 7-8, pp. 456-467. DOI: 10.1007/s10762-013-9975-5
- [7] Kanno A., Kuri T., Hosako I., Kawanishi T., Yoshida Y., Yasumura Y. and Kitayama K. (2012) Optical and millimeter-wave radio seamless MIMO transmission based on a radio over fiber technology. *Optics Express*, Vol. 20, Iss. 28, pp. 29395. DOI: 10.1364/oe.20.029395
- [8] Seeds A.J., Shams H., Fice M.J. and Renaud C.C. (2015) TeraHertz Photonics for Wireless Communications. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, Iss. 3, pp. 579-587. DOI: 10.1109/jlt.2014.2355137
- [9] Fice M.J., Rouvalis E., Dijk F.v., Accard A., Lelarge F., Renaud C.C., Carpintero G. and Seeds A.J. (2012) 146-GHz millimeter-wave radio-over-fiber photonic wireless transmission system. *Optics Express*, Vol. 20, Iss. 2, pp. 1769. DOI: 10.1364/oe.20.001769
- [10] Yu J., Chang G., Jia Z., Chowdhury A., Huang M., Chien H., Hsueh Y., Jian W., Liu C. and Dong Z. (2010) Cost-Effective Optical Millimeter Technologies and Field Demonstrations for Very High Throughput Wireless-Over-Fiber Access Systems. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, Iss. 16, pp. 2376-2397. DOI: 10.1109/jlt.2010.2041748

- [11] Shao T., Shams H., Anandarajah P.M., Fice M.J., Renaud C.C., Dijk F.v., Seeds A.J. and Barry L.P. (2015) Phase Noise Investigation of Multicarrier Sub-THz Wireless Transmission System Based on an Injection-Locked Gain-Switched Laser. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Vol. 5, Iss. 4, pp. 590-597. DOI: 10.1109/tthz.2015.2418996
- [12] Ducournau G., Szriftgiser P., Beck A., Bacquet D., Pavanello F., Peytavit E., Zaknounge M., Akalin T. and Lampin J. (2014) Ultrawide-Bandwidth Single-Channel 0.4-THz Wireless Link Combining Broadband Quasi-Optic Photomixer and Coherent Detection. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Vol. 4, Iss. 3, pp. 328-337. DOI: 10.1109/tthz.2014.2309006
- [13] Ishibashi T., Muramoto Y., Yoshimatsu T. and Ito H. (2014) Unitraveling-Carrier Photodiodes for Terahertz Applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 20, Iss. 6, pp. 79-88. DOI: 10.1109/jstqe.2014.2336537
- [14] Dyson A., Henning I.D. and Adams M.J. (2008) Comparison of Type I and Type II Heterojunction Unitraveling Carrier Photodiodes for Terahertz Generation. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 14, Iss. 2, pp. 277-283. DOI: 10.1109/jstqe.2007.910107
- [15] Yu X., Chen Y., Galili M., Morioka T., Jepsen P.U. and Oxenlowe L.K. (2014) The prospects of ultra-broadband THz wireless communications. *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. DOI: 10.1109/icton.2014.6876675
- [16] Federici J. and Moeller L. (2010) Review of terahertz and subterahertz wireless communications. *Journal of Applied Physics*, Vol. 107, Iss. 11, pp. 111101. DOI: 10.1063/1.3386413
- [17] Shams H., Fice M.J., Balakier K., Renaud C.C., Dijk F.v. and Seeds A.J. (2014) Photonic generation for multichannel THz wireless communication. *Optics Express*, Vol. 22, Iss. 19, pp. 23465. DOI: 10.1364/oe.22.023465
- [18] Shams H. and Seeds A. (2017) Photonics, Fiber and THz Wireless Communication. *Optics and Photonics News*, Vol. 28, Iss. 3, pp. 24. DOI: 10.1364/opn.28.3.000024
- [19] Tarashchuk I. V., Felinskyi G. S., Reznikov M. I., Korchak A. V. (2019) Fiber Bragg grating cavities in two-wave Raman laser for terahertz telecommunication application. in *Proceedings IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2019)*, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. April 16-18, 2019. Kyiv, Ukraine. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783925
- [20] Khlaponin Y. and Zhyrov G. (2016) Analysis and Monitoring of Telecommunication Networks Based on Intelligent Technologies. *CEUR Workshop Proceedings*, Selected Papers of the XVI International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security Vol-1813, pp. 32-39.
- [21] Hryhoruk V. I., Serdeha I. V., Felinskyi H. S. and Korotkov P. A. (2018) *Vzaiemodiia fizychnykh poliv z nanostrukturovanyimi materialamy* [Interaction of physical fields with nanostructured materials], Kyiv, Karavela, 382 p.
- [22] Mermelstein M., Horn C., Radic S. and Headley C. (2002) Six-wavelength Raman fibre laser for C- and L-band Raman amplification and dynamic gain flattening. *Electronics Letters*, Vol. 38, Iss. 13, pp. 636. DOI: 10.1049/el:20020433
- [23] Tarashchuk I., Felinskyi G., Reznikov M. (2018) Dual-frequency fiber Raman laser for terahertz and radio-over-fiber applications. *Proc. XVIII Int. young scientists' conference on Applied physics*, May, 22-26, 2018, Kyiv, Ukraine, pp. 122-123.
- [24] Bromage J., Rottwitt K. and Lines M. (2002) A method to predict the Raman gain spectra of germanosilicate fibers with arbitrary index profiles. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, Iss. 1, pp. 24-26. DOI: 10.1109/68.974149
- [25] Dianov E. (2002) Advances in Raman fibers. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 20, Iss. 8, pp. 1457-1462. DOI: 10.1109/jlt.2002.800263
- [26] Serdeha I.V., Grygoruk V.I. and Felinskyi G.S. (2018) Spectroscopic Features of Raman Gain Profiles in Single-Mode Fibers Based on Silica Glass. *Ukrainian Journal of Physics*, Vol. 63, Iss. 8, pp. 683. DOI: 10.15407/ujpe63.8.683
- [27] Babin S.A., Zlobina E.A. and Kablukov S.I. (2018) Multimode Fiber Raman Lasers Directly Pumped by Laser Diodes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 24, Iss. 3, pp. 1-10. DOI: 10.1109/jstqe.2017.2764072
- [28] Tarashchuk I., Felinskyi G. and Reznikov M. (2018) Dual-frequency fiber Raman laser for generating radiation of the terahertz band. *VIII International Conference on Optoelectronic Information Technologies*, "PHOTONICS-ODS 2018" Ukraine, Vinnytsia, VNTU October 2-4, 2018, pp.211-212.
- [29] Serdeha I.V., Honenko S.V., Felinskyi G.S. and Reznikov M.I. (2018) Pumping wavelength dependence of Raman lasing threshold in highly Ge-doped silica fiber. *Proc. XIV Int. Sci. Conf. "Electronics and Applied Physics"*, October, 23-26, 2018, Kyiv, Ukraine, p. 189.

Повністю волоконний двохчастотний ВКР лазер для телекомунікаційних систем терагерцового діапазону

Дружинин В. А., Корчак А. В., Резников М. И., Фелінський Г. С.

С целью усовершенствования терагерцовых технологий и повышения эффективности источников излучения для телекоммуникационных систем терагерцового диапазона предложен двухволновой (2 λ) волоконный лазер, в котором генерация осуществляется за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния. В результате анализа имеющихся экспериментальных данных в работе установлено, что профиль усиления вынужденного комбинационного рассеяния в одномодовых волокнах позволяет реализовать 2 λ лазер в полностью волоконном исполнении. Основным преимуществом предложенного терагерцового источника является существенное уменьшение фазовых шумов, которого следует ожидать за счет генерации обоих лазеров от общего источника накачки. Определены основные параметры волоконных брэгговских решеток для 2 λ лазерных резонаторов, которые доказывают их соответствие современным требованиям монолитной интеграции устройства в полностью волоконную конструкцию. Путем моделирования для разных типов волокна доказана возможность уменьшения пороговой мощности накачки по меньшей мере в 400 раз, что позволит существенно уменьшить весогабаритные характеристики такого лазера.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние; волоконная брэгговская решетка; волоконный лазер; лазерный резонатор; мощность накачки; пороговая мощность; телекоммуникационные системы; терагерцовый диапазон

All-fiber dual-frequency Raman laser for terahertz telecommunication systems

Druginin V. A., Korchak A. V., Reznikov M. I., Felinskyi G. S.

The two-wave (2λ) fiber laser based on the stimulated Raman scattering is proposed in order to improve terahertz technologies realization and to increase the efficiency of radiation sources for telecommunication systems in the terahertz range. As a result of the analysis of the available

experimental data in our work it was found that the Raman gain profile in single-mode fibers makes it possible to realize a 2λ laser in the fully fiber configuration. The main advantage of the proposed terahertz source is a significant reduction of the phase noises as it should be expected due to the both lasers will be pumped using a common source. The main parameters of the fiber Bragg gratings for 2λ laser cavity are determined and it is shown its possibility to meet the modern requirements for the monolithic integration in fully fiber device design. The possibility of reducing the threshold pump power by at least 400 times has been proved by simulating for different types of fibers, and it will significantly lowered the weight and size characteristics of such a laser.

Key words: stimulated Raman scattering; fiber Bragg grating; fiber laser; laser cavity; pump power; threshold power; telecommunication systems; terahertz range