

УДК. 621.372

СУМАТОР ПОТУЖНОСТЕЙ НА БАЗІ КВАЗІОПТИЧНОГО ВІДКРИТОГО РЕЗОНАТОРА ЯК ВИСОКОСТАБІЛЬНИЙ ГЕНЕРАТОР ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДІАПАЗОНУ

DOI 10.36994 / 2788-5518-2023-01-05-06

Наритник Т.М., к.т.н., проф. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна. t.narytnyk@ukr.net

Кузьмичов І.К. Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна, Харків, Україна. kuzmichev.igr@i.ua

Авдєєнко Г.Л. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна. e-mail:t.narytnyk@ukr.net

Музичишин Б.І. Інститут радіофізики та електроніки ім. А. Я. Усікова НАН України, Харків, Україна. feuntabod@gmail.com

Май О.В. Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна. avmay@ukr.net

Алісов А.О. Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна. t.narytnyk@ukr.net

Анотація: В роботі досліджено ефективність збудження аксіально-несиметричного типу коливань TEM_{10q} в квазіоптичному відкритому резонаторі суматора потужностей (ВРСП) за допомогою хвильової хвилі TE_{20} . За допомогою функціоналу, використовуваного в теорії зеркальних антен для визначення коефіцієнта використання поверхні, оцінено ефективність збудження розглянутого типу коливань у напівсферичному резонаторі за допомогою прямокутного хвильоводу перетином $a \times b$, в якому поширюється хвиля TE_{20} . З проведених розрахунків зроблено висновок, що близько 87% потужності, яка підводиться по хвильоводу до резонатора, йде на збудження коливання TEM_{10q} . Отже, така резонансна система повинна мати хороші селекуючі властивості. Для підтвердження цього проведені додаткові чисельні дослідження. Встановлено, що при узгодженому збудженні коливань в ВРСП, останній має кутову і частотну селекцією спектру. Таким чином, при правильному виборі поперечних розмірів прямокутного хвильоводу з хвилею TE_{20} , розташованого в центрі плоского дзеркала ВРСП, останній матиме одночастотний відгук у широкій смузі частот і можна забезпечити високий коефіцієнт складання потужностей в терагерцовому діапазоні. При розміщенні джерел у кожному з двох прямокутних хвильоводів, що переходять у випромінювачі наведених вище розмірів, ми отримаємо суматор потужності на основі напівсферичного відкритого резонатора. Запропонована і досліджена електродинамічна система з двох прямокутних хвильоводів визначених поперечних розмірів, яка дозволяє регулювати величину зв'язку джерел із резонатором. Для цього на плоскому дзеркалі ВРСП розташована E -поляризована дріт'яна дифракційна решітка, змінюючи період якої регулюється зв'язок резонатора з джерелами. Встановлено, що вибираючи параметри одновимірних дифракційних решіток (E -поляризація) у розкритих елементах зв'язку, можна забезпечити будь-який наперед заданий зв'язок окремих джерел з резонансним об'ємом. Проведено експериментальні дослідження ВРСП на частоті 130 ГГц. Виміряна потужність на його виході перебувала в межах (10...13 дБм), що відповідає ефективності складання потужностей $k=0,76$. Результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок про перспективність використання розробленого ВРСП як високостабільного генератора терагерцового діапазону.

Ключові слова: терагерцовий діапазон, відкритий резонатор суматор потужностей, прямокутний хвильовід, ефективність збудження, високостабільний генератор.

RESEARCH OF A QUASIOPTICAL OPEN RESONATOR FOR POWER SUMMATION IN A HIGHLY STABLE GENERATOR OF THE TERAHERTZ RANGE

Teodor Narytnyk, Ph.D., Prof. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Kyiv, Ukraine. t.narytnyk@ukr.net

Igor Kuzmichev. V.N.Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine. t.narytnyk@ukr.net

Hlib Avdieienko. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Kyiv, Ukraine. t.narytnyk@ukr.net

Bohdan Muzychishin. The A. Ya. Usikov's Institute for Radio Physics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine. kuzmichev.igr@i.ua

Oleksandr May. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Kyiv, Ukraine. avmay@ukr.net

Andrey Alisov. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ukraine, Kyiv, Ukraine. t.narytnyk@ukr.net

Abstract: The efficiency of excitation of the axial-asymmetric vibration TEM_{10q} in a quasioptical open resonator of the power combiner (ORSM) by means of the TE_{20} waveguide wave is investigated. Based on the theory of mirror antennas, the efficiency of excitation of TEM_{10q} oscillations in a hemispherical resonator using a rectangular waveguide with a cross-section in which the TE_{20} wave propagates is estimated. Based on the calculations, it was concluded that about 87% of the power supplied to the resonator via the waveguide is used to excite the oscillation under consideration. Therefore, such a resonant system should have good selective properties. Additional studies were conducted to confirm this. It was established that with coordinated excitation of oscillations in the VRSP, the latter has angular and frequency spectrum selection. With the correct selection of the transverse dimensions of a rectangular waveguide with a TE_{20} wave, located in the center of a VRSP flat mirror, the latter will have a single-frequency response in a wide frequency band and a high power stacking factor in the terahertz range can be provided. When placing the sources in each of the two rectangular waveguides that pass into the emitters of the above dimensions, we will get a power adder based on a hemispherical VRSP. An electrodynamic system of two rectangular waveguides of certain cross-sectional dimensions is proposed and investigated, which allows adjusting the amount of coupling between the sources and the resonator. For this purpose, an E-polarized wire diffraction grating is located on the VRSP flat mirror, changing the period of which regulates the connection of the resonator with the sources. It was found that by choosing the parameters of one-dimensional diffraction gratings (E-polarization) in the openings of the communication elements, it is possible to ensure any predetermined connection of individual sources with a resonant volume. Experimental studies of VRSP at a frequency of 130 GHz were carried out. The measured power at its output was within (10...13 dBm), which corresponds to the efficiency of power assembly $k=0.76$. The results of the conducted research allow us to draw a conclusion about the prospects of using the developed VRSP in highly stable generators of the terahertz range.

Keywords: terahertz range, open resonator power combiner, rectangular waveguide, excitation efficiency, highly stable generator.

Вступ

Однією з тенденцій розвитку сучасної радіоелектроніки є освоєння терагерцового частотного діапазону, що займає проміжне положення між добре вивченими мікрохвильовими і оптичними ділянками спектра електромагнітного випромінювання. Переходом в терагерцовий діапазон вирішується, як питання збільшення швидкості передачі інформації за рахунок використання більш широких спектрів частот, так і питання забезпечення завадозахищеності та електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, а також виключається ймовірність впливу навмисних радіозавад [1,2]. Використання терагерцових хвиль для мобільного зв'язку є однією з ключових технологічних концепцій для впровадження 6G. Теорема Шеннона-Хартлі, яка дає границю для максимально досяжної пропускної здатності каналу (під впливом шуму) $C=B \cdot \log_2(1+S/N)$, де C - пропускна здатність в біт/с, B - смуга пропускання в Гц, а S/N - відношення сигнал/шум, стверджує, що максимально досяжна швидкість передачі даних масштабується пропорційно смузі пропускання B . Це було мотивацією для 5G розширити частотну область до діапазону міліметрового діапазону, оскільки частоти нижче 6 ГГц вже інтенсивно використовуються у мобільному, супутниковому, радіорелейному зв'язку, телерадіомовленні та системах широкосмугового радіодоступу. Для того, щоб ще більше збільшити у порівнянні з 5G швидкість передачі даних для майбутніх стандартів бездротового зв'язку, таких як 6G, ще більш високі частотні діапазони аж до ТГц спектру, де доступні великі суцільні смуги пропускання в декілька ГГц, потенційно можуть бути задіяні. У той час як 5G вперше використовував міліметрові частоти з великою пропускною здатністю до 400 МГц на одну несучу, щоб забезпечити швидкість передачі, необхідну для вимогливих додатків в реальному часі, технологія 6G, що зароджується, націлена на більш високі швидкості передачі даних і менші затримки.

Освоєння терагерцового діапазону становить значні труднощі насамперед через відсутність високостабільних генераторів із достатнім рівнем потужності та низьким рівнем фазового шуму [3,4]. Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є застосування суматорів потужності. Планарні лінії передачі в терагерцовому діапазоні, які дозволяють здійснити складання потужностей, втрачають свої переваги на цих частотах через втрати на випромінювання, втрати в підкладці та омичні втрати. У діапазоні надвисоких частот (НВЧ) найбільш широко знайшли своє

застосування мостові схеми та складання потужностей джерел електромагнітних коливань в єдиному резонансному об'ємі [5], а в терагерцевому діапазоні - в квазіоптичних відкритих резонаторах [6-8].

Метою даної роботи є дослідження ефективності збудження аксіально-несиметричного коливання TEM_{10q} у квазіоптичному відкритому резонаторі суматора потужностей (ВРСП) за допомогою хвильоводної хвилі TE_{20} та практична реалізація ВРСП у високостабільному генераторі терагерцевого діапазону.

Виконання досліджень

Оцінимо ефективність збудження коливання TEM_{10q} у напівсферичному резонаторі за допомогою прямокутного хвильоводу перетином $a \times b$, в якому поширюється хвиля TE_{20} [9,10]. Хвильовід розташований у центрі плоского дзеркала. Геометричні параметри резонатора та розподіл збуджуючого поля $\vec{E}_e(x, y)$ та поля коливання ВРСП $\vec{E}_w(x, y)$ наведено на рис. 1. Тут же показано орієнтацію векторів напруженості електричного поля у вхідному хвильоводі та в резонаторі.

Компоненти поперечного електричного поля TE_{mn} -хвиль у прямокутному хвильоводі перетином $a \times b$ у загальному випадку визначаються виразом [11]:

$$\vec{E}_{mn}(x, y, z) = C_0 \vec{e}_{mn}(x, y) e^{\pm i \zeta_{mn} z}. \quad (1)$$

Тут $C_0 = ik_0 W_0 \mu_0$, $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$, $[m^{-1}]$, $\omega = 2\pi f$ - кругова частота, $[Гц]$, $W_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = 120\pi$, $[Ом]$, $\varepsilon_0 = 10^{-9} / (36\pi)$, $[Ф/м]$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, $[Гн/м]$, $\zeta_{mn} = \sqrt{k_0^2 - \chi_{mn}^2}$ - постійна поширення TE_{mn} -хвилі ($\text{Re } \zeta_{mn} \geq 0, \text{Im } \zeta_{mn} \geq 0$), $\chi_{mn}^2 = (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2$, а поперечна власна функція TE_{mn} -хвилі має вигляд [11]:

$$\vec{e}_{mn}(x, y) = \frac{1}{N_{mn}} \left[-\frac{n\pi}{b} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \vec{x}_0 + \frac{m\pi}{a} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \vec{y}_0 \right], \quad (2)$$

де $N_{mn} = \chi_{mn} \sqrt{(1 + \delta_{m0})(1 + \delta_{n0})} \sqrt{ab}/2$ - константа нормування, що визначається з умови ортогональності функцій $\vec{e}_{mn}(x, y)$

$$\int_0^a \int_0^b (\vec{e}_{mn} \cdot \vec{e}_{qp}) dx dy = \delta_{mq} \delta_{np},$$

δ_{mq} та δ_{np} - символ Кронекера.

Розподіл електричної компоненти поля хвилі TE_{20} у прямокутному хвильоводі у площині $z=0$ отримуємо із (1), (2)

$$\vec{E}_e(x, y) = \vec{E}_{20}(x, y, 0) = C_0 \vec{e}_{20}(x, y). \quad (3)$$

Відбиванням хвиль від розкриття хвильоводу нехтуємо і вважаємо апертури дзеркал нескінченними. Запишемо розподіл електричної компоненти поля робочого коливання у площині $z=0$ [12],

$$\vec{E}_w(x, y) = 2A_{10} \frac{\sqrt{2}x}{w_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right) \vec{y}_0, \quad (4)$$

де A_{10} - амплітудний коефіцієнт, w_0 - радіус плями поля основного коливання резонатора TEM_{00q} на плоскому дзеркалі.

З теорії дзеркальних антен [13,14] відомо, що для отримання високого коефіцієнта використання поверхні (далі не зустрічається) необхідно узгодити поля у фокальній площині рефлектора і в розкритті опромінювача. З фізичної точки зору це аналогічно узгодженню поля резонатора з полем хвилі, що поширюється хвильоводом, розташованим у центрі плоского

дзеркала відкритого резонатора (ВР). Для визначення ефективності збудження η коливання TEM_{10q} у резонаторі за допомогою хвилі TE_{20} прямокутного хвильоводу скористаємося виразами (3), (4) і співвідношенням [13-15]:

$$\eta = \frac{\left| \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \vec{E}_e(x, y) \vec{E}_w^*(x, y) dx dy \right|^2}{\|\vec{E}_e(x, y)\|^2 \|\vec{E}_w(x, y)\|^2} \quad (5)$$

Значок “*” вказує на комплексно-спряжену функцію. Співвідношення (5) показує, яка частка енергії, що підводиться хвильоводом до резонатора, йде на збудження робочого коливання. Величини $\|\vec{E}_e(x, y)\|^2$ і $\|\vec{E}_w(x, y)\|^2$ – це квадрати норм функцій збуджуючого і робочого полів, які визначаються виразами [15]

$$\|\vec{E}_e(x, y)\|^2 = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \vec{E}_e(x, y) \vec{E}_e^*(x, y) dx dy, \quad (6)$$

$$\|\vec{E}_w(x, y)\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_w(x, y) \vec{E}_w^*(x, y) dx dy. \quad (7)$$

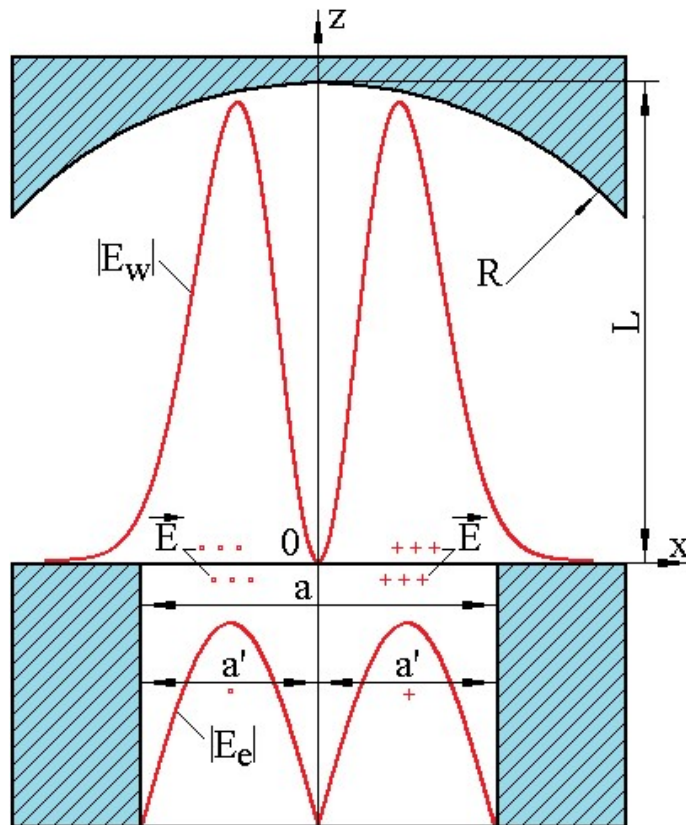


Рис.1. Напівсферичний ВРСР із відрізком прямокутного хвильоводу

Опускаючи проміжні викладки (див. [8]), запишемо вираз, що визначає ефективність збудження коливання TEM_{10q} в ВРСР за допомогою хвильоводної хвилі TE_{20} .

$$\eta = \frac{4\pi^3}{\tilde{a}^3 \tilde{b}} \Phi^2 \left(\frac{\tilde{b}}{2} \right) e^{-2\left(\frac{\pi}{\tilde{a}}\right)^2} \left[2 + e^{\left(\frac{\pi}{\tilde{a}}\right)^2 - \left(\frac{\tilde{a}}{2}\right)^2} (W(g) + W^*(g)) \right]^2, \quad (8)$$

де $\tilde{a} = a/w_0$, $\tilde{b} = b/w_0$, $\Phi(\tilde{b}/2)$ – інтеграл ймовірності, $g = (\pi/\tilde{a}) + j(\tilde{a}/2)$, $W(g)$ – інтеграл ймовірності комплексного аргументу. Залежність $\eta(\tilde{a}, \tilde{b})$ наведено на рис. 2. Як очевидно з малюнка, максимальна величина $\eta = 0,867$ досягається при нормованих розмірах елемента зв'язку $\tilde{a} = 3,338$ і $\tilde{b} = 1,980$.

З проведених розрахунків можна дійти висновку, що близько 87% потужності, яка підводиться по хвильоводу до резонатору, йде на збудження коливання, що нами розглядається. Отже, така резонансна система повинна мати хороші селектуючі властивості. Для підтвердження цього необхідно провести додаткові дослідження.

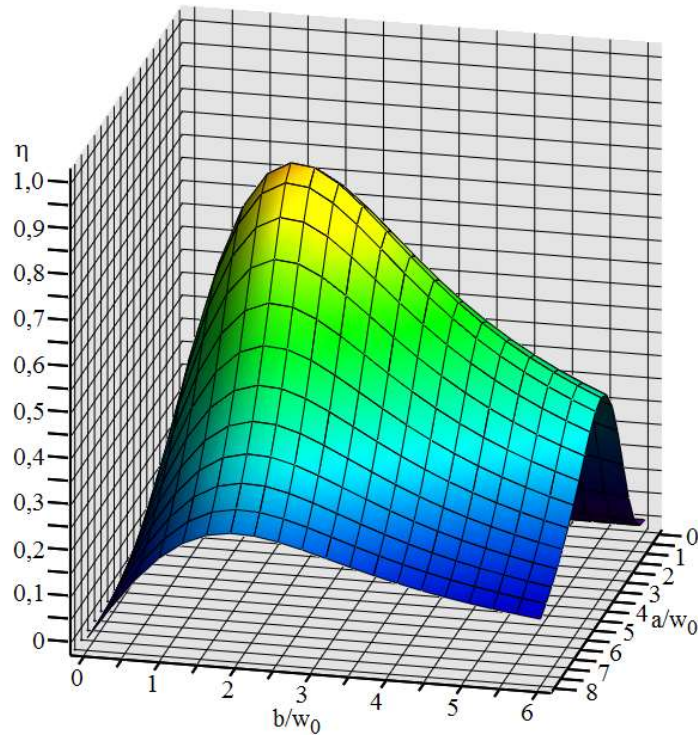


Рис. 2. Ефективність збудження коливання TEM_{10q} в ВРСП за допомогою хвильоводної хвилі TE_{20}

Розглянемо ефективність збудження за допомогою хвильоводної хвилі TE_{20} коливання TEM_{30q} , структура електричного поля якого найбільш близька до коливання, що аналізується. Збудливе поле визначається, як і вище, виразом (3). Розподіл електричної компоненти поля коливання ВРСП TEM_{30q} описується співвідношенням [12]:

$$\vec{E}_w(x, y) = A_{30} \left[8 \left(\frac{\sqrt{2}x}{w_0} \right)^3 - 12 \left(\frac{\sqrt{2}x}{w_0} \right) \right] \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2} \right) \vec{y}_0 \quad (9)$$

Використовуючи вирази (5-7) знайдемо, що ефективність збудження коливання TEM_{30q} у напівсферичному ВРСП за допомогою хвильоводної хвилі TE_{20} , має вигляд:

$$\eta = \frac{\tilde{a}}{12\tilde{b}} \Phi^2 \left(\frac{\tilde{b}}{2} \right) \left| \int_{-1/2}^{1/2} \left[8(\sqrt{2}u\tilde{a})^3 - 12(\sqrt{2}u\tilde{a}) \right] \sin(2\pi u) \exp(-u^2\tilde{a}^2) du \right|^2 \quad (10)$$

Результати розрахунку за формулою (10) подано на рис.3. З малюнка видно, що при $\tilde{a}=3,338$ і $\tilde{b}=1,980$ ефективність збудження коливання TEM_{30q} в резонаторі дорівнює нулю. Вище було показано, що при таких розмірах хвильоводу, що збуджує, ефективність збудження коливання TEM_{10q} в ВРСП за допомогою хвилі TE_{20} має максимальне значення. Таким чином, проведені чисельні дослідження показують, що при правильному виборі поперечних розмірів прямокутного хвильоводу з хвилею TE_{20} , розташованого в центрі плоского дзеркала ВРСП, останній матиме одночастотний відгук у широкій смузі частот. Якщо посередині перпендикулярно широким стінкам у хвильоводі, що збуджує, розташувати металеву площину, то ми отримаємо два прямокутні хвильоводи перетином $a \times b$ (див. рис.1). У кожному з таких хвильоводів буде поширюватися основна хвиля TE_{10} . При цьому максимальна ефективність збудження TEM_{10q} в ВРСП за допомогою такої хвилі складе 0,4335 при розмірах прямокутного розкриття $1,669 \times 1,98$.

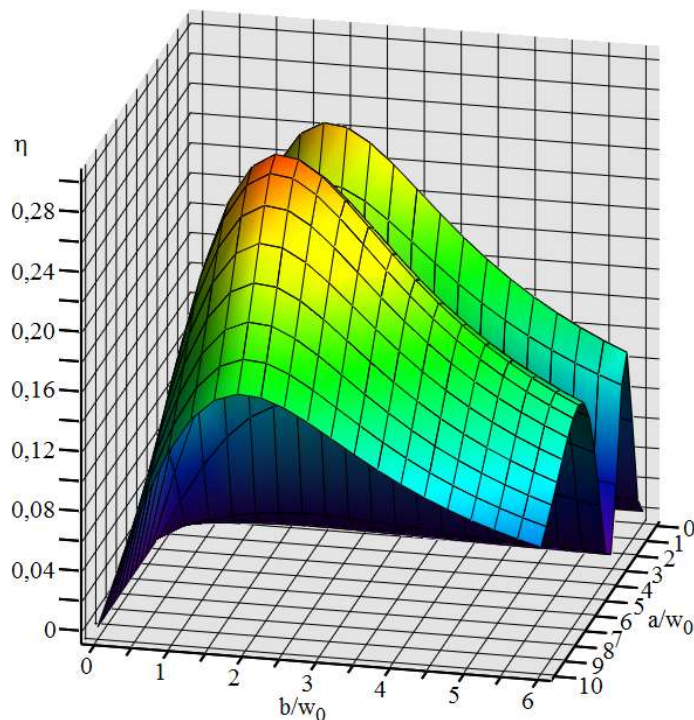


Рис.3. Ефективність збудження коливання TEM_{30q} в ВРСП за допомогою хвильоводної хвилі TE_{20}

Ефективність збудження коливання, що розглядається, за допомогою двох прямокутних хвильоводів зазначених розмірів збігається з величиною, отриманою вище. При розміщенні джерел у кожному з двох прямокутних хвильоводів, що переходять у випромінювачі наведених вище розмірів, ми отримаємо суматор потужності на основі напівсферичного ВРСП. Запропонована система дозволяє регулювати величину зв'язку джерел із резонатором. Для цього на плоскому дзеркалі ВРСП розташовується E - поляризована дротяна дифракційна решітка, змінюючи період якої ми можемо регулювати зв'язок резонатора з джерелами.

Розглядатимемо хвильовід з хвилею TE_{20} , у розкритті якого розташована дротяна E - поляризована дифракційна решітка. Для визначення коефіцієнтів відбиття від ВРСП скористаємося відомим методом підсумовування парціальних коефіцієнтів відбиття від резонансної системи [16,17]. Запишемо вираз, що визначає резонансний коефіцієнт відбиття від ВРСП [18]:

$$\Gamma = |r_1| - \left(|t_1|^2 |r_2| S_e S_p^2 / (1 - |r_1| |r_2| S_p^2) \right), \quad (11)$$

де $|r_1|$ і $|t_1|$ – модулі коефіцієнтів відбивання та передачі дротяних E – поляризованих дифракційних решіток різного періоду у розкритті прямокутного хвильоводу в центрі плоского

дзеркала ВРСП, які пов'язані співвідношенням $|r_1|^2 + |t_1|^2 = 1$ [19]; r_2 – модуль коефіцієнта відбиття від другого дзеркала резонатора, який вважаємо рівним одиниці; S_e і S_p – коефіцієнти передачі по полю за прохід хвилі від одного дзеркала до іншого, які визначаються втратами на збудження $\alpha_e = P_e/P_{рез} = 1 - \eta$, $S_e = \exp(-\alpha_e/2)$ та резонансними втратами $\alpha_p = \alpha_o + \alpha_{ом} = (P_o + P_{ом})/P_{рез}$, $S_p = \exp(-\alpha_p/2)$. Тут P_e – втрати потужності, які складаються, загалом, із втрат на 2 перелив 2 потужності за кромки одного із дзеркал резонатора та втрат потужності на неузгоджене збудження коливання в ВРСП. P_o і $P_{ом}$ – потужності дифракційних та омічних втрат, а $P_{рез}$ – потужність, що надійшла до ВРСП через елемент зв'язки в момент резонансу. При розрахунку ефективності порушення коливання у резонаторі ми поклали, що апертури дзеркал нескінченні. Тому P_e визначатиметься втратами потужності на неузгоджене збудження, а резонансні втрати в ВРСП – потужністю омічних втрат $P_{ом}$.

На рис. 4 наведено залежності коефіцієнта відображення, що визначається виразом (11), від величини резонансних втрат α_p для дріотяних Е-поляризованих дифракційних решіток у розкритті хвилеводу, періоди яких дорівнюють: 0,05 мм (крива 1); 0,10 мм (крива 2); 0,15 мм (крива 3). Всі ґрати намотані дротом діаметром $d = 0,02$ мм. Криві побудовані для довжини хвилі у вільному просторі $\lambda = 2$ мм та значення $S_e = 0,936$ ($\eta = 0,867$), що відповідає максимальній ефективності збудження коливання TEM_{10q} в ВРСП за допомогою хвилі TE_{20} . Модулі коефіцієнтів відображення $|r_1|$ дифракційних ґрат обчислюються за формулою [20],

$$|r_1| = (1 - k_0^2 l_0 l_2) / \sqrt{(1 + k_0^2 l_0^2)(1 + k_0^2 l_2^2)}, \quad (12)$$

де $l_0 = (l/\pi) \ln(l/2\pi d)$, $l_2 = (\pi d^2/l)$, $k_0 = 2\pi/\lambda$.

Як видно з рис.4 загальна поведінка розрахункових залежностей при зменшенні резонансних втрат добре узгоджується з поведінкою виміряного коефіцієнта відбиття від напівсферичного ВР при зменшенні відстані L/R між дзеркалами [21].

У цьому випадку зменшуються розміри "плям" полів на дзеркалах і, як наслідок, стає меншим α_p . При зміні періоду ґрат у розкритті хвилеводу режим узгодження ($\Gamma = 0$) має місце за різних значеннях резонансних втрат: $\alpha_p = 8,72 \times 10^{-5}$ при $l = 0,05$ мм (крива 1); $\alpha_p = 1,39 \times 10^{-3}$ при $l = 0,10$ мм (крива 2); при $\alpha_p = 8,15 \times 10^{-3}$ при $l = 0,15$ мм (крива 3).

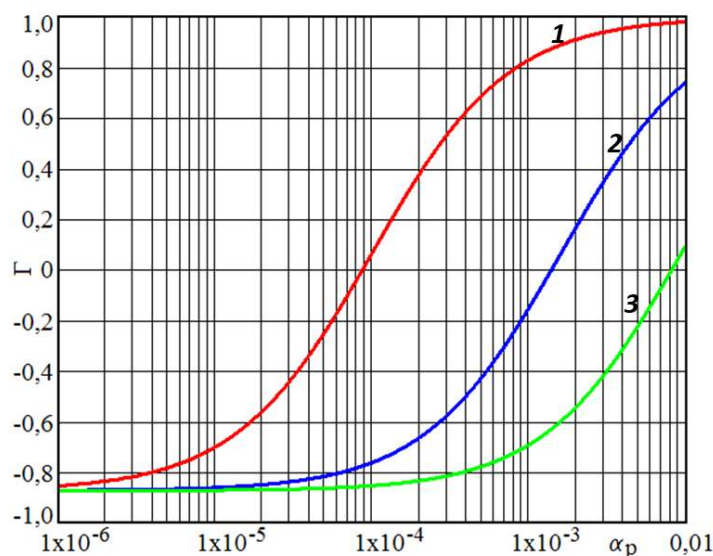


Рис.4. Залежність коефіцієнта відображення від величини резонансних втрат ВРСП для різних періодів решіток: 0,05 мм (крива 1), 0,10 мм (крива 2) , 0,15 мм (крива 3)

Представляє також інтерес розглянути залежність навантаженої добротності резонатора від коефіцієнта передавання решітки. Для цього запишемо вираз, що визначає Q_H [18]:

$$Q_H = \frac{2kL\sqrt{|r_1||r_2|}S_r}{1-|r_1||r_2|S_r^2}. \quad (13)$$

Ці залежності в припущенні, що $|r_2|=1$ наведені на рис. 5 для трьох значень резонансних втрат, відповідних узгодженому збудженню резонатора: $\alpha_r = 8.72 \cdot 10^{-5}$ (крива 1), $\alpha_r = 1.39 \cdot 10^{-5}$ (крива 2) і $\alpha_r = 8.15 \cdot 10^{-3}$ (крива 3). При $|t_1|=0$ добротність зв'язку резонатора з хвильоводом дорівнює нескінченності. Відповідно, Q_H визначатиметься власною добротністю резонатора Q_0 , яка залежить тільки від резонансних втрат у системі. Як видно з рисунка, зі зростанням резонансних втрат і при $|t_1|=0$ значення Q_H/kL зменшиться: 22940 (крива 1), 1439 (крива 2), 245.4 (крива 3). По мірі росту $|t_1|$ відмінність у значеннях навантажених добротностей ВР за різних резонансних втрат проявлятиметься слабкіше. Це пов'язано з тим, що в разі слабого зв'язку ($|t_1| \leq 0.3$), що відповідає застосуванню густих решіток, навантажена добротність ВР, як було сказано вище, визначається добротністю Q_0 , яка, в свою чергу, залежить тільки від величини резонансних втрат. Зі збільшенням коефіцієнта передачі решітки ($|t_1| \geq 0.5$) навантажена добротність резонатора визначатиметься добротністю зв'язку резонатора Q_{con} з хвильоводним трактом, і зміна резонансних втрат практично не позначатиметься на значеннях Q_H .

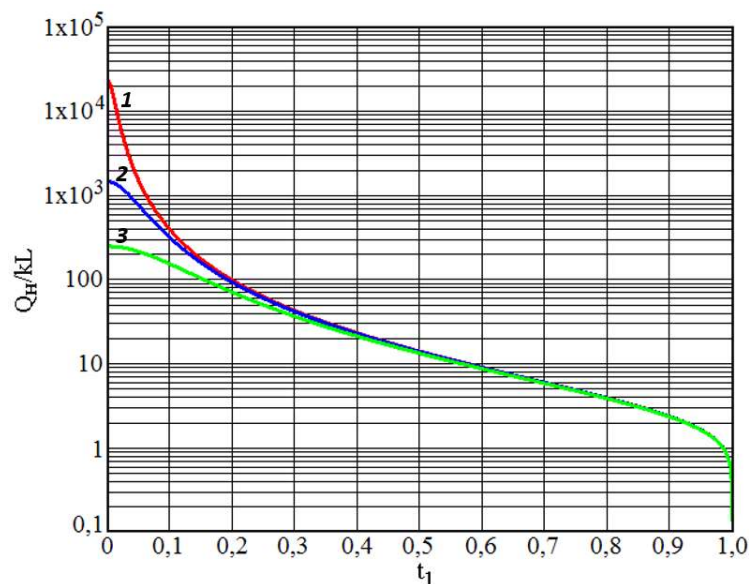


Рис.5. Поведінка навантаженої добротності ВР при зміні коефіцієнта передачі решітки: $\alpha_r = 8.72 \cdot 10^{-5}$ (крива 1), $\alpha_r = 1.39 \cdot 10^{-5}$ (крива 2) і $\alpha_r = 8.15 \cdot 10^{-3}$ (крива 3)

З наведеного малюнка також впливає, що для отримання високих значень навантаженої добротності під час узгодження джерел коливань із резонатором ($\Gamma=0$), необхідно застосовувати густі решітки.

Таким чином, проведені дослідження дозволяють зробити низку важливих практичних висновків.

1. При правильному виборі геометричних розмірів елементів зв'язку окремих джерел з ВРСП можна забезпечити високий коефіцієнт складання потужностей на вкрай високих частотах в і ТГц діапазоні.

2. При узгодженому збудженні коливаль в ВРСП, останній має кутову та частотну селекцію спектра.

3. Вибираючи параметри одновимірних дифракційних решіток (Е-поляризація) у розкривах елементів зв'язку, можна забезпечити будь-який наперед заданий зв'язок окремих джерел з резонансним об'ємом.

Як приклад реалізації високостабільного генератора з використанням квазіоптичних та просторових методів підсумовування потужності розглянемо вихідну частину гетеродинного ланцюга. Вхідну частину гетеродинного ланцюга прийомо-передавача, що складається з високостабільного генератора, що задає частоту 8,1 ГГц і ряду підсилювально-помножувальних ланцюжків, виконаних на монолітних мікросхемах, докладно не розглядаємо. Частота сигналу, яка подається на вхід схеми від попередніх каскадів гетеродинного ланцюга, збільшується до 32,4 ГГц за допомогою двох послідовно включених подвійників частоти, виконаних на мікросхемах CHX 2089 фірми UMS та XX 1000 BD фірми Mimix Broadband (рис. 6).

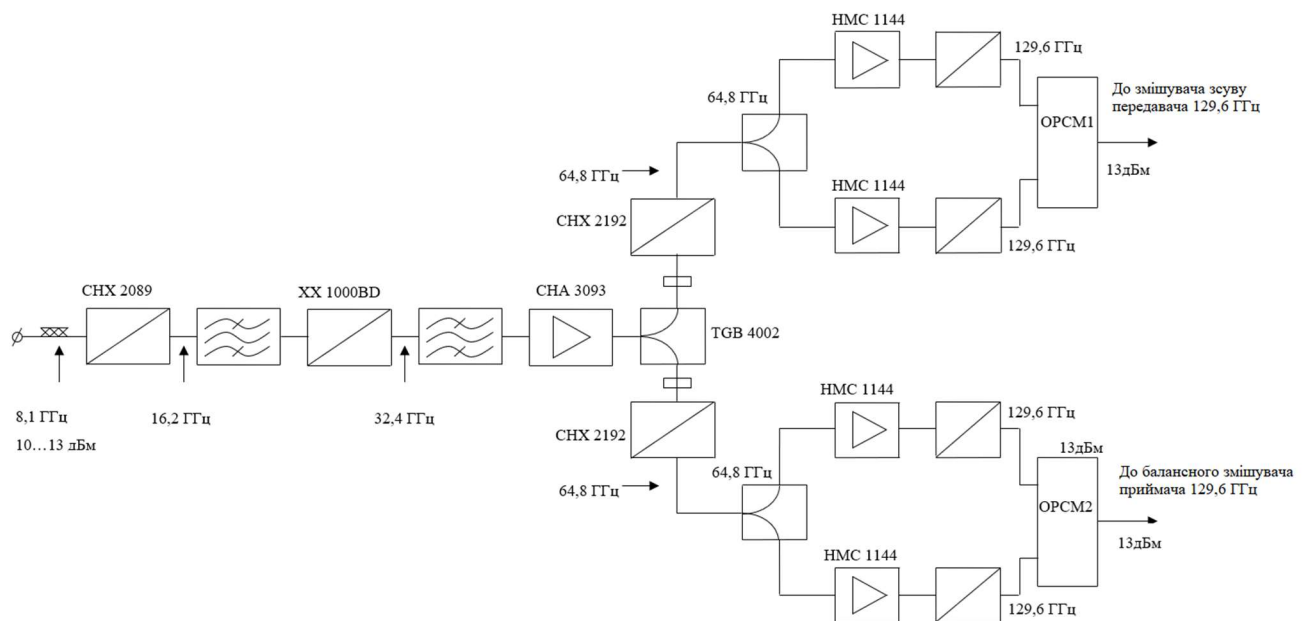


Рис.6. Функціональна схема високостабільного генератора на основі ВР

Ці мікросхеми містять вбудовані підсилювачі, які компенсують втрати сигналу при множенні. Смуго-пропускаючі фільтри на виході помножувальних каскадів запобігають попаданню паразитних гармонік на входи наступних каскадів. Для отримання достатнього рівня вихідних потужностей перед відгалужувачем включений підсилювач потужності, реалізований на мікросхемі CHA 2093 фірми UMS. Посилений сигнал частотою 32,4 ГГц розгалужується на два канали. Вихідні помножувальні каскади виконані на мікросхемах CHX 2192 фірми UMS. Відгалуження здійснюється на мікросхемі TGB 4002 фірми TriQuint. Монолітні мікросхеми помножувачів підсилювача потужності та відгалужувача сигналів включені в мікросмужкові лінії на підкладці з дюріду товщиною 0,127 мм. Сигнали частотою 64,8 ГГц і потужністю 13 дБм надходять на 3 дБ відгалужувачі та діляться за потужністю навпіл. Для отримання достатнього рівня потужності на вході помножувача частоти сигнали надходять на підсилювачі потужності, які виконані на мікросхемах HMC 1144 фірми Analog Devices і посилюються до рівнів 80-100 мВт. Подальше підвищення частоти гетеродину з 64,8 ГГц до 129,6 ГГц здійснюється подвоювачами частоти. Помножувачі частоти побудовані на основі безкорпусних планарних помножувальних діодів Шоткі. Два сигнали частотою 129,6 ГГц і потужністю 10...13 дБм складаються в ВРСП, який має селективні властивості і пригнічує гармоніки помножувача частоти та паразитні частоти на 50 дБ і більше. Виміряні рівні потужності на виході резонаторів перебувають у межах 10...13 дБм.

У процесі роботи для схемотехнічного моделювання (змішувачів, помножувачів, підсилювачів, дільників) використовувався програмний комплекс NI AWR Design Environment; фільтрів та хвильоводних структур – ANSYS HFSS, резонаторів – Altair FEKO.

Запропонована схема складання потужностей має переваги перед іншими схемами на базі ВРСП, оскільки, крім винесення джерел коливань з резонансного обсягу, дозволяє розділити функції узгодження по полю та зв'язку. Вибираючи геометричні розміри кожного з розкривів, ми узгоджуємо електричні компоненти хвиль TE_{10} у хвильоводах із робочим коливанням TEM_{10q} резонатора. Оскільки поперечні розміри кожного з двох випромінювачів у площині дзеркала ВРСП перевищують робочу довжину хвилі, зв'язок активних елементів з резонатором має бути вищим за критичний (коефіцієнт відображення від ВРСП $\Gamma < 0$). Змінюючи період розташовуваної на плоскому дзеркалі резонатора дифракційної решітки, дротяні ламелі якої паралельні вектору напруженості електричного поля збудливої хвилі TE_{10} (випадок Е-поляризації), можна забезпечити будь-який заданий зв'язок джерел з робочим коливанням. Експериментальне дослідження відкритого квазіоптичного резонатора суматора потужностей було проведено на частоті 130 ГГц за допомогою панорамного вимірювача Elmika R4402R (діапазон частот 110...170 ГГц). Умовою узгодження ВРСП на частоті 130 ГГц є мінімальний коефіцієнт стоячої хвилі, що становить величину 1,2. Апертури дзеркал резонатора дорівнюють 40 мм, радіус кривизни сферичного відбивача $R = 39$ мм (рис. 1). Розміри розкривів у площині одного із дзеркал ОР вибиралися з умови порушення коливання TEM_{10q} з максимальною ефективністю. З виконаного вище аналізу вони склали: $a=5,9$ мм, $b=7,0$ мм. У резонаторі збуджується тип коливань TEM_{1019} ($L/R = 0,573$). Період l дротяної Е-поляризованої дифракційної решітки, розташованої на плоскому дзеркалі резонатора, ми вибрали рівним 0,10 мм, що добре узгоджується з проведеними вище розрахунками. Виміряна потужність на виході ВРСП знаходилася в межах (10...13 дБм), що відповідає ефективності підсумовування потужностей $k = 0,76$.

Висновки

1. Велике значення для складання потужностей має отриманий у роботі результат, що свідчить про те, що при узгодженому збудженні аксіально-несиметричних типів коливань резонансна система матиме кутову та частотну селекцію спектру.

2. Вибираючи відповідним чином параметри (період і коефіцієнт заповнення) одновимірної дифракційної решітки (випадок Е-поляризації), що розташовується в розкриві елемента зв'язку, можна забезпечити будь-який заданий зв'язок джерела з резонансним обсягом.

3. Досліджений в роботі суматор потужності на базі квазіоптичного відкритого резонатора на частоту 130 ГГц, дозволив створити зразок високостабільного генератора.

Дані, отримані в результаті дослідження, дозволяють зробити висновок про перспективність використання розробленого ВРСП для побудови високостабільних генераторів субтерагерцевого та терагерцевого діапазонів.

Ця наукова стаття була підтримана Національним фондом досліджень України в рамках виконання грантового проєкту «Мікрохвильові пристрої на основі резонансних структур з метаматеріальними властивостями для захисту життєдіяльності та інформаційної безпеки України» (Реєстраційний номер проєкту: 2021.01/0030).

Література

1. Наритник Т. М., Кравчук С. О. Телекомунікаційні системи терагерцевого діапазону: монографія. Житомир: ФОП «Євенок О.О.», 2015. 394 с.
2. Наритник Т.М., Сайко В.Г. Безпроводні системи зв'язку терагерцевого діапазону. Німеччина: LAP LAMBERT Academic Publishing RU., 2019. 72 с.
3. Popovic Z., Grossman E. N, THz metrology and instrumentation. *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology*, January 2011. vol.1, pp.133-144.
4. Svetlitz A., Slavenko M., Blank T., Brouk I., and et al., "THz Measurements and Calibration Based on a Blackbody Source. *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology*, March 2014. vol.4, pp. 347-359.
5. Карушкин Н.Ф., Касаткин Л.В., Мальцев С.Б. Опыт разработки мощных импульсных источников мощности миллиметрового диапазона волн на ЛПД. *КрыМуКо-2016: труды 16-ой Международной Крымской конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"*, г.Севастополь, 11-15 сент. 2006 р, Севастополь, 2006. Т.1., С.135-137.
6. Mizuno K, Ajikata T., Hieda M., Nakayama M. Quasi-Optical Resonator for Millimetre and Submillimetre Wave Solid-State Sources. *Electronics Letters*, June 1988, vol.24, №.13, pp.791–793.

7. Judaschke R., Hoft M., Schunemann K., Quasi-Optical 150-GHz Power Combining Oscillator. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, May 2005. vol.15, No.5, pp.300–302.
8. Kuz'michev I. K., Matching of the quasi-optical open resonators with the waveguide transmission line. *Izv. Vuzov. Radiofizika*, April 2000. vol. 43, pp. 325-334.
9. Машковцев Б.М., Цибизов К.Н., Емелин Б.Ф. Теория волноводов: монография. Москва: Наука, 1966. 351с.
10. Почерняев В.Н., Цибизов К.Н. Теория сложных волноводов: монография Киев: Науковий Світ, 2003. 224 с.
11. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. Москва: Изд-во Советское радио, 1967. 652 с.
12. Kogelnik, H., 1964. Coupling and conversion coefficients for optical modes. In: Quasi-Optics. *Symposium on Quasi-Optics Proceedings*. Brooklyn, NY: Polytechnic Press. pp. 333–347.
13. Бурштейн Э.Л. О мощности, принимаемой антенной при падении на нее неплоской волны. *Радиотехника и электроника*. Москва, 1958. Т.3. №2. С.186–189.
14. Kay A. Near-Field Gain of Aperture Antennas. *IRE Trans. Antennas Propag.*, November 1960. vol 8. № 6. pp. 586-593.
15. Kuzmichev I.K., Excitation efficiency of quasioptical resonance systems. *Telecommun. Radio Eng.* 2009. vol. 68. №.1. pp. 49-63.
16. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика / Под ред. Б. З. Айзенберга. Москва: Связь, 1971. 488 с.
17. Звелто О. Принципы лазеров / Пер. с англ. под ред. Т. А. Шмаонова. Москва: Мир, 1990. 558с.
18. Кузьмичев И.К. Апертурное возбуждение открытых резонаторов миллиметрового диапазона: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Ростов-на-Дону: РГУ, 1991. 16 с.
19. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Резонансное рассеяние волн. Том 1. Дифракционные решетки. Киев: Наукова думка, 1986. 232 с.
20. Вайнштейн Л.А. К электродинамической теории решеток. Часть 1. *Электроника больших мощностей*. Москва, 1963. Вып. 2. С. 26–56.
21. Андросов В.П., Кузьмичев И. К. Влияние на эффективность возбуждения открытого резонатора его параметров и связи с волноводом. Харьков, 1987. 30 с. (*Препринт / Ин-т радиофизики и электроники АН УССР; № 354*).

References

1. Naritnik T. M., Kravchuk S. O Telekomunikatsiini sistemi teragertsovogo diapazonu: monografiya. Zhitomir: FOP «Evenok O.O.», 2015. 394 s.
2. Naritnik T.M., Saiko V.G. Bezprovidni sistemi zv'yazku teragertsovogo diapazonu. Nimechchina: LAP LAMBERT Academic Publishing RU., 2019. 72 s.
3. Popovic Z., Grossman E. N, THz metrology and instrumentation. *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology*, January 2011. vol.1, pp.133-144.
4. Svetlitz A., Slavenko M., Blank T., Brouk I., and et al., "THz Measurements and Calibration Based on a Blackbody Source. *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology*, March 2014. vol.4, pp. 347-359.
5. Karushkin N.F., Kasatkin L.V., Maltsev S.B. Opit razrabotki moshchnikh impulsnikh istochnikov moshchnosti millimetrovogo diapazona voln na LPD. KriMiKo-2016: trudi 16-oi Mezhdunarodnoi Krimskoi konferentsiya "SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnie tekhnologii", g.Sevastopol, 11-15 sent. 2006 r, Sevastopol, 2006. T.1., S.135-137.
6. Mizuno K, Ajikata T., Hieda M., Nakayama M. Quasi-Optical Resonator for Millimetre and Submillimetre Wave Solid-State Sources. *Electronics Letters*, June 1988, vol.24, №.13, pp.791–793.
7. Judaschke R., Hoft M., Schunemann K., Quasi-Optical 150-GHz Power Combining Oscillator. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, May 2005. vol.15, No.5, pp.300–302.
8. Kuz'michev I. K., Matching of the quasi-optical open resonators with the waveguide transmission line. *Izv. Vuzov. Radiofizika*, April 2000. vol. 43, pp. 325-334.
9. Mashkovtsev B.M., Tsibizov K.N., Yemelin B.F. Teoriya volnovodov: monografiya. Moskva: Nauka, 1966. 351s.
10. Pochernyaev V.N., Tsibizov K.N. Teoriya slozhnikh volnovodov: monografiya Kiev: Naukovii Svit, 2003. 224 s.
11. Feldshtein A.L., Yavich L.R., Smirnov V.P. Spravochnik po elementam volnovodnoi tekhniki. Moskva: Izd-vo Sovetskoe radio, 1967. 652 s.
12. Kogelnik, H., 1964. Coupling and conversion coefficients for optical modes. In: Quasi-Optics. *Symposium on Quasi-Optics Proceedings*. Brooklyn, NY: Polytechnic Press. pp. 333–347.
13. Burshtein E.L. O moshchnosti, prinimaemoi antennoi pri padenii na nee neploskoi volni. *Radiotekhnika i elektronika*. Moskva, 1958. T.3. №2. S.186–189.
14. Kay A. Near-Field Gain of Aperture Antennas. *IRE Trans. Antennas Propag.*, November 1960. vol 8. № 6. pp. 586-593.
15. Kuzmichev I.K., Excitation efficiency of quasioptical resonance systems. *Telecommun. Radio Eng.* 2009. vol. 68. №.1. pp. 49-63.
16. Volman V.I., Pimenov Yu.V. Tekhnicheskaya elektrodinamika / Pod red. B. Z. Aizenberga. Moskva: Svyaz, 1971. 488 s.
17. Zvelto O. Printsipi lazerov / Per. s angl. pod red. T. A. Shmaonova. Moskva: Mir, 1990. 558s.
18. Kuzmichev I.K. Aperturnoe vzbuzhdenie otkritikh rezonatorov millimetrovogo diapazona: Avtoref. dis. kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.03. Rostov-na-Donu: RGU, 1991. 16 s.
19. Shestopalov V. P., Kirilenko A. A., Masalov S. A., Sirenko Yu. K. Rezonansnoe rasseyanie voln. Tom 1. Difraktsionnie reshetki. Kiev: Naukova dumka, 1986. 232 s.

20. Vainshtein L.A. K elektrodinamicheskoi teorii reshetok. Chast 1. Elektronika bolshikh moshchnostei. Moskva, 1963. Vip. 2. S. 26-5.
21. Androsov V.P., Kuzmichev I. K. Vliyanie na effektivnost возбуждениya otkritogo rezonatora yego parametrov i svyazi s volnovodom. Kharkov, 1987. 30 s. (Preprint / In-t radiofiziki i elektroniki AN USSR; № 354).