

УДК 537.86+621.373.14

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.05

КВАЗІОПТИЧНИЙ ТВЕРДОТІЛЬНИЙ ГЕНЕРАТОР З ВІДКРИТОЮ КВАЗІОДНОЧАСТОТНОЮ СФЕРОЕШЕЛЕТНОЮ КОЛИВАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ

I. П. ОЛЬХОВСЬКИЙ¹, А. М. ФУРСОВ²

¹ кафедра комп'ютерних систем та мереж, Харківський коледж Державного університету телекомунікацій, м. Харків, УКРАЇНА

² Харківський патентно-комп'ютерний коледж, м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net

АНОТАЦІЯ Представлено результати дослідження, пов'язаного з розробкою ефективної високочастотної відкритої коливної системи квазіоптичних твердотільних генераторів міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль. Показано, що для стабільної роботи твердотільних генераторів на діодах Ганна і лавино-пролітних діодах, розміщених всередині відкритого резонатора, потрібне істотне розрідження спектру резонансних частот, що виключає переходи частоти генерації. З урахуванням цієї вимоги в якості відкритої коливної системи твердотільних генераторів запропонований сфероешелетний відкритий резонатор, одне з дзеркал якого має відбивну решітку типу "ешелет". У роботі наведені результати "холодних" вимірювань спектра резонансних частот сфероешелетного відкритого резонатора, які свідчать про те, що він дійсно має істотно розріджений спектр як по поперечним, так і, що дуже важливо, по поздовжнім типам коливань. Обговорено і реалізовані на практиці умови, необхідні для збудження в твердотільному генераторі на базі сфероешелетного відкритого резонатора добротних стабільних коливань з високим ККД. Наведено результати експериментального дослідження квазіоптичного генератора на лавино-пролітних діодах 8-мм діапазону довжин хвиль. Представлені аналіз отриманих характеристик і їх якісне пояснення на основі запропонованої моделі процесів, які протікають в досліджуваному генераторі. Показано, що сфероешелетний відкритий резонатор може бути використаний в якості резонансної системи не тільки твердотільних, а також і електровакуумних приладів у всьому діапазоні НВЧ. Намічено шлях в напрямку подальшого розрідження спектра сфероешелетного відкритого резонатора з метою створення реально одночастотної відкритої коливної системи.

Ключові слова: квазіоптичний твердотільний генератор; діод Ганна; лавино-пролітний діод; ешелет; сфероешелетний відкритий резонатор; одночастотна відкрита коливальна система

QUASIOPTICAL SOLID-STATE GENERATOR WITH OPEN QUASI-FREQUENCY SPHEREOSELETAL OSCILLATING SYSTEM

I. ODKHOVSKIY¹, A. FURSOV²

¹ department of computer systems and networks, Kharkiv College of State University of Telecommunications, Kharkiv, UKRAINE

² Kharkiv patent-computer college, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The results of research related to the development of an effective high-Q open oscillatory system of quasi-optical solid-state generators of millimeter and submillimeter wavelength ranges are presented. It is shown that for the stable operation of solid-state generators based on Gunn diodes and avalanche-transit diodes (ATDs) located inside an open resonator (OR), a significant rarefaction of the resonance frequency spectrum is required, which excludes jumps of the generation frequency. Taking this requirement into account, a spheroechelette open resonator (SE OR) is proposed as an open oscillatory system of solid-state generators, one of the mirrors of which is a reflective lattice of the "echelette" type. The paper presents the results of "cold" measurements of the spectrum of resonance frequencies of the SE OR, which indicate that the SE OR indeed has a significantly rarefied spectrum both in transverse and, which is very important, in longitudinal modes of oscillations. The conditions necessary for the excitation of high-quality stable oscillations with high energy efficiency in a solid-state generator based on an SE OR are discussed and implemented. The results of an experimental study of a quasi-optical generator based on an 8-mm ATD wavelength range are presented. The analysis of the obtained characteristics and their qualitative explanation on the basis of the proposed model of the processes occurring in the investigated generator are presented. It is shown that the SE OR can be used as a resonant system in the entire EHF range of not only solid-state, but also electronic-vacuum devices. Finally, a way is outlined in the direction of further rarefaction of the spectrum of the SE OR in order to create a really single-frequency open oscillatory system.

Keywords: quasi-optical solid state generator; Gunn diode; avalanche diode; echelette; spheroechelette open resonator; single frequency open oscillating system

Вступ

Проблемі розрідження спектра коливної системи будь-якого автогенератора резонансного типу приділяється, як відомо [1,2], велика увага, оскільки від її вирішення залежить стійкість роботи приладу.

Особливе значення в зв'язку з цим надається розрідженню спектра коливальних систем в міліметровому (ММ) і субміліметровому (СубММ)

діапазонах хвиль [3] в силу різкого зменшення розмірів об'ємних або хвилевидних резонансних систем і, як наслідок, значного згущення їх спектральних компонент, що приводить в загальному випадку до виникнення неконтрольованих перескоків частоти генерації, які порушують роботу джерела коливань.

Одним з можливих шляхів виходу з положення, яке створилося, є використання в якості коливальних систем генераторів в ММ і СубММ діапазонах хвиль

відкритих резонаторів (ВР) з гладкими дзеркалами правильної геометричної форми (плоскі, сферичні, циліндричні і т.д.), які володіють, як відомо [4,5], високою добротністю Q і істотно розрідженим спектром в порівнянні зі спектром об'ємних резонаторів.

Однак в ряді випадків і цього ступеня розрідження спектра виявляється недостатньо. Слід до того ж додати, що розрідження спектра в зазначених ВР обмежується лише селекцією по поперечних типах коливань. Здійснити розрідження спектра коливальної системи одночасно по поперечним і по поздовжнім індексам, а також наблизитися до межі одночастотного режиму збудження коливань, як виявилось, можна в ВР, дзеркала яких мають кутову дисперсію [6,7].

Дослідження показали, що коливальні системи подібного типу можуть бути реалізовані на базі відбивних дифракційних решіток типу "ешелет" [8,9], що дозволяють максимально розділити спектр ВР в режимі автоколімації [10] і впритул наблизитися до одночастотного режиму роботи коливальної системи. В роботі [11] були отримані перші результати по реалізації генератора на діоді Ганна (ДГ), виконаного на основі ВР з ешелетним дзеркалом. Значно підвищити основні параметри ДГ, включаючи його потужність, а також змусити ефективно генерувати лавино-пролітний діод (ЛПД), що виконати набагато складніше в порівнянні з ДГ, вдалося в істотно модифікованій коливальній системі, запропонованій в роботі [8].

Мета роботи

Створення та дослідження високодобротних відкритих коливальних систем з максимальним розрідженням спектру для твердотільних і електровакуумних генераторів КВЧ діапазону довжин хвиль.

Виклад основного матеріалу

Зупинимося на конструктивних особливостях квазіоптичного генератора на ЛПД (КГЛПД) зі сфероешелетною відкритою коливальною системою.

Схематично конструкція генератора 8-мм діапазону хвиль зображена на рис. 1. Резонансна система КГЛПД сформована на базі модифікованого сфероешелетного відкритого резонатора (СЕ ВР), який утворений сферичним дзеркалом 1 (діаметр $D = 90$ мм, радіус кривизни $R = 180$ мм) і ступінчастою відбивною дифракційною решіткою типу "ешелет" 2, яка має прямокутну апертуру (ширина дисперсійного дзеркала - 80 мм, довжина - 120 мм; кут при вершині зубця - 90° , кут "блиску" - 45° ; розміри ідентичних ступенів $b_1 = b_2 = 4,0$ мм). СЕ ВР збуджується в режимі автоколімації, оскільки виконуються наступні умови: 1) $b_1 = b_2 = \lambda/2$, де: λ - довжина хвилі випромінювання в резонаторі; 2) початкова установка кута гойдання ешелета $\varphi = 45^\circ$, тобто має місце рівність φ куту "блиску" решітки. В процесі роботи автогенератора відстань L між дзеркалами СЕ ВР може змінюватися в широких межах.

У центрі увігнутого дзеркала 1 виконано вивід електромагнітної енергії у вигляді звуженого по

вузькій стінці прямокутного хвилеводу перетином $7,2 \times 3,4$ мм², який закінчується на поверхні відбивача щільною зв'язку перетином $7,2 \times 0,5$ мм².

Сферичне дзеркало 3 вводиться до складу відкритої коливальної системи виключно для дослідження його впливу на спектр і характеристики вихідного робочого дводзеркального квазіоптичного генератора.

Основна особливість конструкції КГЛПД полягає в тому, що з метою узгодження діода з полем СЕ ВР активний модуль - штифт циліндричної форми (діаметр - 3,0 мм, висота - 5,0 мм), на торці якого розміщена кристалічна структура ЛПД, розташований в середній частині центральної ступені ешелету всередині прямокутного паза (поглиблення), утвореного торцями двох рухливих брусків прямокутного перерізу, які можуть переміщатися уздовж нерухомої частини центральної ступені як по направляючій. При цьому активний модуль розташовується між торцями рухомих вкладишів (вісь активного модуля відстоїть від внутрішнього ребра нерухомої частини центральної ступені на відстані $b_1/2$).

Ширина кожного з рухомих брусків збігається з шириною ступені b_1 , а товщина d_2 вибирається з тих міркувань, щоб сумарна товщина нерухомої і рухомої частин центральної ступені ешелет збігалася з товщиною незбуреної ступені дифракційної решітки: $d_1 + d_2 = b_2$, де d_1 - товщина нерухомої частини центральної ступені. Штифт з активною структурою за допомогою спеціального механізму може переміщатися в напрямку нормалі до поверхні "неосвітленої" межі шириною b_1 . В процесі вимірювань здійснювалися як взаємне юстирування дзеркал СЕ ВР, так і варіювання кута гойдання ешелет φ .

Подача напруги на діод виконується за допомогою пружної дротяної напівпетлі діаметром $\sim 2,0$ мм, один кінець якої припаяний до латунного диска діаметром $\sim \lambda/2$, який узгоджує радіальний резонатор, а другий - виведений за межі резонансного об'єму через електрично ізольований канал в тілі ешелету. Апробований і інший варіант, при якому струмоввід реалізується за допомогою тонкого латунного стержня діаметром $\sim 0,1 - 0,2$ мм, один кінець якого припаяний до узгоджуючого диску, а другий - до пружного металевий контакту, виконаному з берилієвої бронзи і має прямокутну форму (довжина $\sim 20,0$ мм, ширина, $\sim 2,0 \dots 3,0$ мм, товщина $\sim 0,2$ мм), при цьому зазначений металевий контакт також виведений з резонансного обсягу через електрично ізольовану канал, який проходить в тілі ешелету.

Завершуючи опис конструктивних особливостей КГЛПД, відзначимо, що в СЕ ВР збуджуються виключно Н-поляризовані коливання з вектором напруженості електричного поля E , орієнтованим перпендикулярно шарам $p^+ - n - t - p^+$ переходу активної структури ЛПД, що дає можливість одночасно порушити в СЕ ВР добротні коливання з коефіцієнтом відбиття від решітки, близьким до одиниці, і реалізувати зв'язок між резонансним полем і діодом, близьким до максимального.

Вище було висловлено твердження, що СЕ ВР являє собою резонансну систему зі ступенем розрідження спектра, близького до максимального.

Покажемо це, спираючись на результати "холодних" електродинамічних вимірювань, методика яких викладена в роботах [12,13].

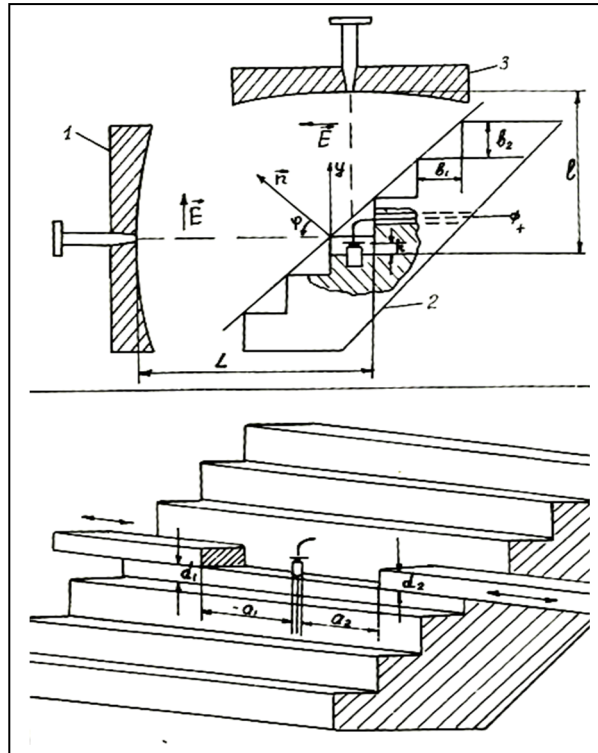


Рис. 1 - Схематичне зображення конструкції 8-мм квазіоптичного генератора на лавино-пролітному діоді

На рис. 2 і 3 наведені результати експериментального дослідження залежності коефіцієнта передачі Т двозеркального СЕ ВР (рис. 1, випадок $a_1 = a_2 = 0$, $\ell \rightarrow \infty$), що збуджується на основній моді TEM_{00q} , від частоти f зі значеннями відстаней $L = 80, 100$ і 120 мм, взятими в якості параметра (величина Т виражена у відносних одиницях; смуга частот електромагнітних хвиль, що подаються на вхід СЕ ВР, $\Delta f = 25 \dots 53$ ГГц).

Розглянуто два різновиди ступінчатих дзеркал: 1) півхвильовий ешелет з розмірами ступенів: $b_1 = b_2 = 4,0$ мм (рис. 2); 2) хвильовий ешелет з розмірами ступенів: $b_1 = b_2 = 8,0$ мм (рис. 3). Для порівняння на рис. 4 зображений спектр еквівалентного за розмірами напівсферичного ВР.

Видно, що коливання в СЕ ВР з обома різновидами решіток збуджуються в надзвичайно вузькій смузі частот Δf , центром якої є частота f , при якій в СЕ ВР встановлюється класичний автоколімаційний режим коливаний, який характеризується мінімальним рівнем втрат [10]. Також добре видно, наскільки істотно спектр СЕ ВР (рис. 2,3) розріджений в порівнянні зі спектром еквівалентного за розмірами напівсферичного ВР (рис.4).

Ідентифікація модового складу СЕ ВР показала, що спектр СЕ ВР розпадається на серію з інтервалом $\Delta f = c/2L$ (c - швидкість світла у вакуумі), кожна з яких включає в себе основний тип коливання TEM_{00q} , і найближчий до нього вищий тип коливання TEM_{10q} , при $L \leq R/2$ (R - радіус кривизни сферичного дзеркала)

незначно поступається основний моді за рівнем дифракційних втрат.

Всі інші спектральні компоненти СЕ ВР виявляються пригніченими в силу значної кутової дисперсії ешелетного дзеркала.

Топологія поля типу коливання TEM_{10q} , який збуджується в СЕ ВР з активним елементом, розміщеним всередині паза, являє собою дві плями (в проекції на поверхню ешелетного дзеркала), орієнтованих уздовж осі y (рис. 5), з мінімумом в центрі ешелетного дзеркала. Зупинимося на основних моментах процедури узгодження активного елемента з полем СЕ ВР, що має першорядне значення в приладах з відкритими коливальними системами. Причин тому кілька.

По-перше, на відміну від об'ємного коливального контуру, у відкритій резонансній системі завжди присутні специфічні втрати, зумовлені висвічуванням частини енергії резонансного поля у вільний простір при розсіянні електромагнітних хвиль як на неоднорідностях, які знаходяться як між дзеркалами, так і на поверхнях дзеркал. Під неоднорідностями на поверхні дзеркала розуміються будь-які конструктивні елементи, які дозволяють розмістити активний елемент на поверхні дзеркала і узгодити його з полем ВР, що приводить в свою чергу до порушення вихідної ідеальної геометричної форми поверхні дзеркал і до появи додаткових дифракційних втрат.

Зрозуміло, для того щоб генератор впевнено збуджувався, необхідно мінімізувати зазначені дифракційні втрати або втрати на розсіювання.

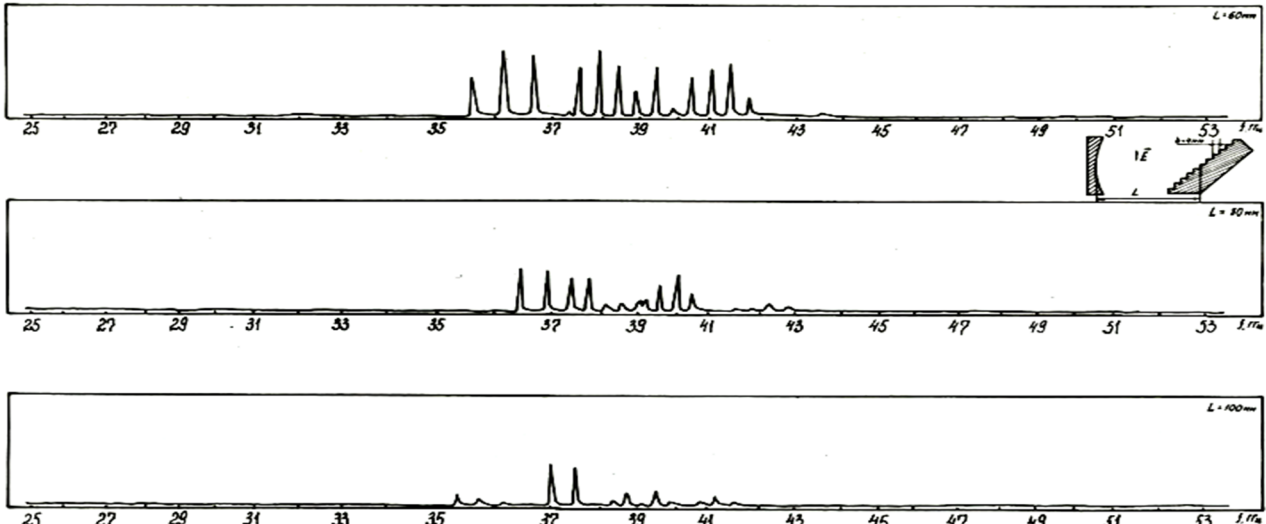


Рис. 2 - Залежність коефіцієнту передачі T незбудженого дводзеркального СЕ ВР від частоти f при фіксованих відстанях між дзеркалами: $L = 60, 80, 100$ мм; випадок $b_1 = b_2 = 4,0$ мм

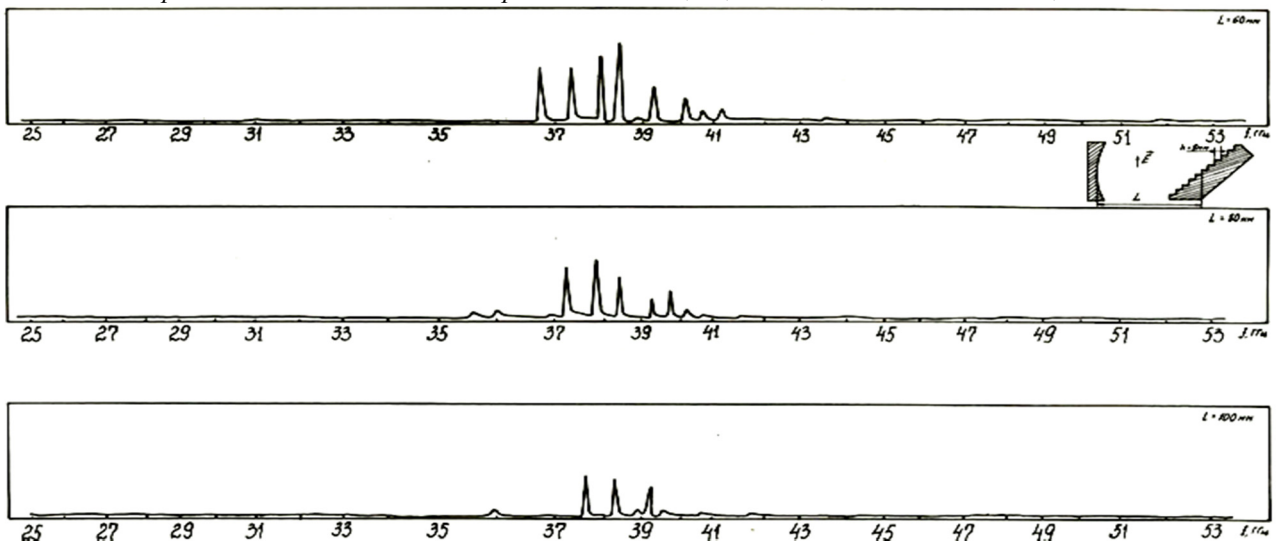


Рис. 3 - Залежність коефіцієнту передачі T незбудженого дводзеркального СЕ ВР від частоти f при фіксованих відстанях між дзеркалами: $L = 60, 80, 100$ мм; випадок $b_1 = b_2 = 8,0$ мм

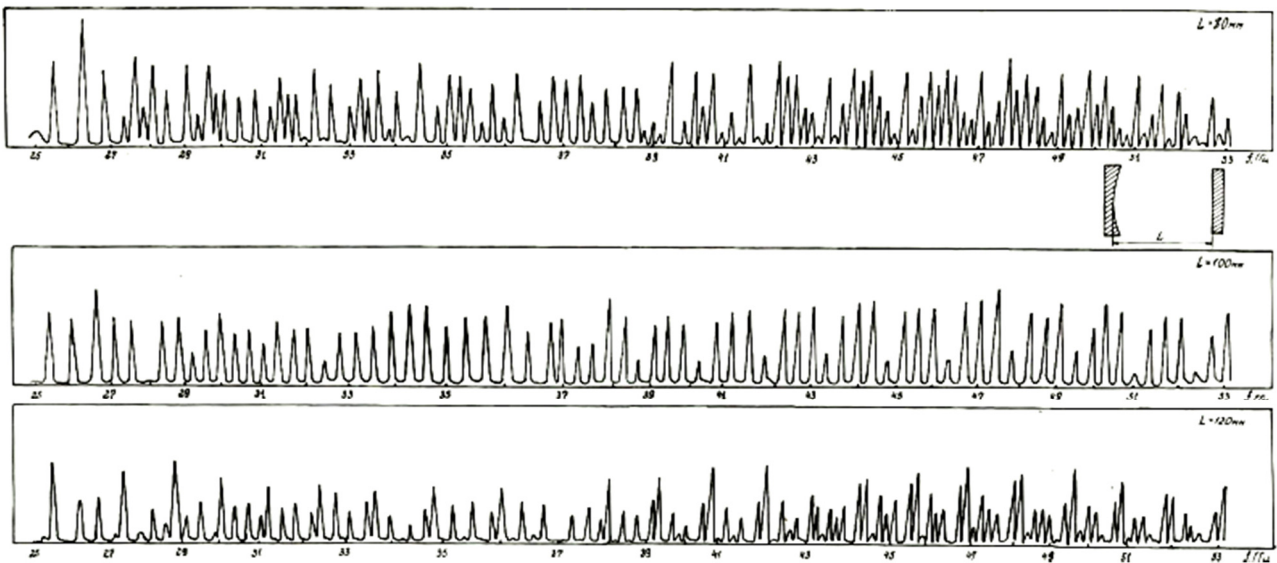


Рис. 4 - Залежність коефіцієнту передачі T еквівалентного напівсферичного ВР від частоти f при фіксованих відстанях між дзеркалами: $L = 80, 100, 120$ мм

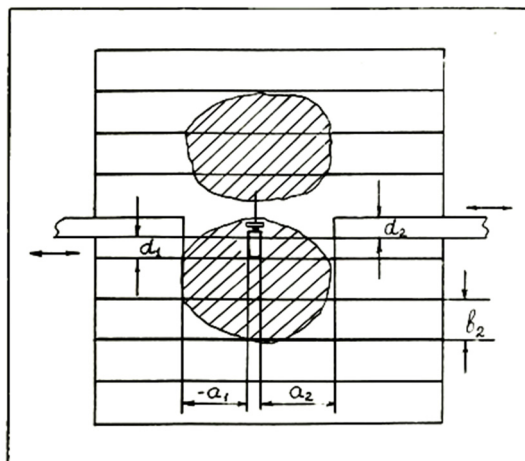


Рис. 5 - Проекція амплітудного розподілу поля моди TEM_{10q} на поверхні ешелетного дзеркала з діодом в прямокутному заглибленні

По-друге, реальні складові імпедансів активної структури R_d і BP в місці розташування активного елемента істотно розрізняються, що значно ускладнює процес узгодження (розрахунки показують, що R_{OP} в максимумі напруженості електричного поля E BP може скласти величину від декількох сотень кОм до одиниць МОм, в той час як R_d ЛПД близький до декількох сотень Ом).

Беручи до уваги ці два фактори, неважко показати, що розміщення активного елемента безпосередньо на незбуреній межі ешелету (в середній її частині, де локалізована максимум напруженості електричного поля E) має привести до невисокого ККД приладу внаслідок значного рівня втрат на розсіювання і великого перепаду значень R_d і R_{OP} (навіть з урахуванням використання радіального чвертьхвильового хвилеводу, який трансформує R_{OP} до затискачів діода).

Детальний аналіз ситуації, що склалася наводить на думку про те, що подолати зазначені недоліки можна, розмістивши активний елемент всередині прямокутного заглиблення, виконаного в тілі центральної ступені ешелету (рис. 1). У цьому випадку вирішуються обидві поставлені вище завдання: мінімізуються втрати на розсіювання за рахунок відбиття хвиль від торців брусків, які формують паз - відрізок жолобкового хвилеводу, і знижується до прийнятної величини коефіцієнт трансформації R_{OP} до R_d за рахунок застосування відрізка відкритого жолобкового хвилеводу як проміжного трансформатора.

На рис. 6 наведені енергетичні та частотні характеристики конкретного КГЛПД 8-мм діапазону хвиль.

Тут представлені графіки залежності $P_n(L)$ і $f(L)$ при фіксованих значеннях струму I , що протікає через діод, кута гойдання ешелета φ , товщини рухомих брусків d_2 , відстаней a_1 і a_2 , що відокремлюють торці вкладишів від утворюючої циліндра - металевий штифта з напівпровідникової структурою на торці, форми і розмірів Г-подібної дрютяної петлі зв'язку і діаметра радіальної

узгоджуючої лінії - диску. Як параметр на даній стадії експерименту вибрана висота активного модуля h .

Обговорення отриманих результатів

Аналіз графіку показує, що генерація КГЛПД носить зонний характер, причому кількість зон, що відповідають збудженню в СЕ BP відповідних типів коливань (у всій смузі частот) не перевищує трьох. Як показали "холодні" [13] і "гарячі" (діелектричний зонд діаметром $\sim 1,0$ мм переміщається всередині резонансної системи генеруючого приладу і по зміщенню частоти генерації визначається відносний розподіл поля у відкритій коливальній системі) вимірювання амплітудного розподілу поля в СЕ BP , збудження основного типу коливання TEM_{00q} має місце в наступному діапазоні механічної перебудови частоти: $\Delta L = 42,3 \dots 43,5$ мм (рис. 6). В межах інтервалів механічного переналаштування частоти двох наступних зон (зліва - направо) (рис. 6) відбувається збудження двох типів коливань, відповідно, TEM_{10q} і TEM_{11q} .

Максимум потужності приладу зареєстрований при збудженні в коливальній системі моди TEM_{10q} (див рис. 5, де заштриховані області представляють собою схематичне зображення проєкцій плям резонансного поля на поверхню ешелету з діодом, встановленим в прямокутному поглибленні), що можна пояснити, виходячи з наступних фізичних міркувань.

Справді, амплітудний розподіл поля типу коливання TEM_{10q} такий, що на ділянці поверхні ешелету, займану відрізком жолобкового хвилеводу (розсіюючої неоднорідності) - доводиться периферійна частина одного з плям полів моди TEM_{10q} , в межах якої напруженість електричного поля E менше в порівнянні з напруженістю електричного поля E в центрі тієї ж плями поля виду коливання TEM_{10q} . Таким чином, чим менше інтенсивність поля в області неоднорідності, тим нижче рівень втрат на розсіювання у вільний простір.

Отже, величина добротності Q , так само як і потужність приладу, при збудженні в коливальній системі моди TEM_{10q} повинні бути свідомо вище тих же параметрів при збудженні в тій же коливальній

системі основного типу колювання TEM_{00q} , пляма поля якого цілком проектується на ділянку поверхні ешелету, займану неоднорідністю у вигляді прямокутного заглиблення.

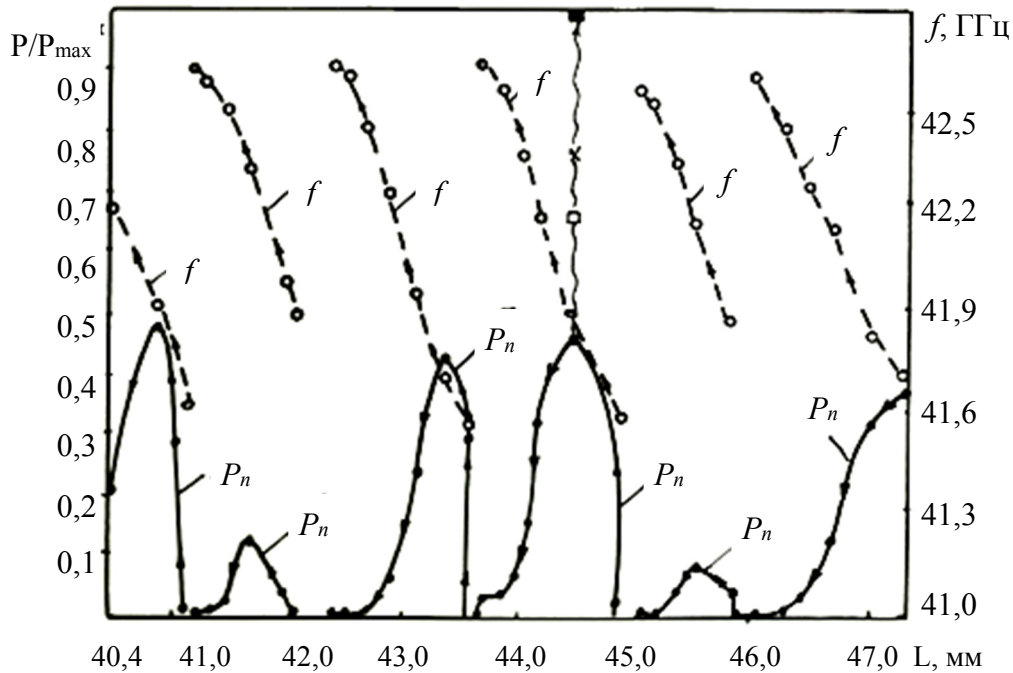


Рис. 6 - Залежність нормованої потужності $P_n = P/P_{max}$ і частоти генерації f від відстані L між дзеркалами при фіксованих $U = 30,9$ В, $I = 120$ мА, $\varphi = 38^\circ$, $a_1 = 3,7$ мм, $a_2 = 4,0$ мм, $d_2 = 2,7$ мм ($\circ - I = 150$ мА; $\square - I = 120$ мА, $\blacksquare - I = 150$ мА); варіант $h = 2,075$ мм

Зазначений висновок знаходиться в повній згоді з результатами експерименту за умови виконання нерівності: $L \geq R$, де R - радіус кривизни сферичного дзеркала.

Разом з тим необхідно мати на увазі, що зниження рівня втрат у коливальній системі, збуджуваної на моді TEM_{10q} , супроводжується зменшенням напруженості електричного поля E в області діода. Однак вказане деяке зниження зв'язку активного елемента з полем СЕ ВР компенсується значно більшою, в порівнянні з основною модою TEM_{00q} , добротністю Q резонансної системи, що, в свою чергу, тягне за собою підвищення електронного ККД приладу.

Резюмуючи сказане, можна стверджувати, що коливальна система твердотільного квазіоптичного генератора характеризується тим, що основним типом колювання в ній стає перша азимутальна мода TEM_{10q} , яка в незбуреному СЕ ВР є вищим видом колювання.

На закінчення зупинимося на реально досягнутих технічних характеристиках досліджуваного КГЛПД. Використовуючи ЛПД типу 3А7І7, вдалося отримати в діапазоні довжин хвиль $\lambda \approx 7,1$ мм потужність генерації приладу $P \approx 82$ мВт при струмі діода $I = 180$ мА.

Введення до складу відкритої коливальній системи КГЛПД додаткового сферичного дзеркала 3 (рис. 1), орієнтованого в напрямку осі y , сприяє збільшенню потужності P приладу в максимумі до 90 мВт (рис. 6).

Неважко зрозуміти причину цього явища. Справді, якщо в КГЛПД з дводзеркальною коливальною системою, що працює в автоколімаційному режимі, відбита від ешелету Н-поляризована хвиля випромінюється у вільний простір через 0 - й порядок дифракції (в напрямку осі y), то в трьохдзеркальній коливальній системі зазначена хвиля перехоплюється сферичним дзеркалом 3 і повертається (в потрібній фазі) в резонансну систему. У той же час введення в відкриту коливальну систему на базі СЕ ВР додаткового дзеркала тягне за собою деяке згущення спектру резонансних частот.

Висновки

Вимірювання показали, що КГЛПД з високодобротною сильно розрідженою відкритою коливальною системою з прямокутним пазом на поверхні ешелетного дзеркала має високу якість спектру ("розсіпання" мітки на екрані аналізатора спектра в шумоподібний сигнал не з'являлися) і стійкість генерації (переходи колювань на конкуруючі

частоти не зазначені). Зміщення частоти $\Delta f/f$ не перевищував $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ за хвилину.

Необхідно відзначити для порівняння, що спроби змусити генерувати ЛПД, точно також встановлений в СЕ ВР, але не в прямокутний паз на поверхні ешелету, а безпосередньо на "неосвітленій" межі, не дали ніякого результату. Це є додатковим підтвердженням того факту, що запропонована в роботі відкрита коливальна система характеризується істотно більш низьким рівнем дифракційних втрат і оптимальним вирішенням питання узгодження ЛПД з резонансним полем відкритої коливальної системи.

Слід вказати на те, що запропонований СЕ ВР може бути використаний в будь-якій частині міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль в якості квазіодночастотної відкритої коливальної системи як твердотільних, так і електровакуумних джерел електромагнітних хвиль.

Слід зазначити, що змінюючи профіль "освітлених" граней ступенів ешелета, тобто виконуючи його опуклим або увігнутим, можна домогтися ще більшого розрідження спектра СЕ ВР як для поперечних, так і, що найважливіше, для поздовжніх індексів. Така відкрита коливальна система тоді може кваліфікуватися вже не як квазіодночастотна, а як реально одночастотна.

Список літератури

1. Галутва Г. В., Рязанцев А. И. *Селекция типов колебаний и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов*. М.: Связь, 1972. 72 с.
2. Bilous O. I., Fisun A. I., Kirilenko A. A., Natarov M. P., Shubnyi A. I., Sirenko S. P. Quasi-optical millimeter wave solid-state oscillators. Part 1: Open resonant system. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78. 3. P. 229-249. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i3.40.
3. Ganapolskii E. M., Eremenko Z. E., Kuznetsova E. S. Experimental Detection of Wave Chaos in Quasi-Optical Microwave Cavity Resonator. *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM)*. 2019. 2. P. 235-244.
4. Nefyodov E. I., Smolskiy S. M. *Open Resonators*. In: *Electromagnetic Fields and Waves*. In Telecommunication Engineering. Springer, Cham, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-90847-2_11.
5. Fox A. G., Li T. Resonant modes in a laser interferometer. *Bell System Technical Journal*. 1961. Vol. 40. 2. P. 453-488. doi: 10.1002/j.1538-7305.1961.tb01625.x.
6. Peng Xiao, Xuecu Tu, Lin Kang, Chengtao Jiang, Shimin Zhai, Zhou Jiang, Danfeng Pan, Jian Chen, Xiaoqing Jia, Peiheng Wu. Reflective grating-coupled structure improves the detection efficiency of THz array detectors. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. 8032. doi: 10.1038/s41598-018-26204-y.
7. Булгаков Б. М., Фисун А. И., Фурсов А. М. Эффективный твердотельный квазиоптический генератор с резонансной системой типа "модифицированный эшелетный открытый резонатор". *Материалы X Всесоюзной научной конференции "Электроника СВЧ"*. Минск, 1983. Т. 2. С. 133-134.
8. Мальшев В. И. *Введение в экспериментальную спектроскопию*. М.: Наука, 1979. 478 с.

9. Vlasov S. N., Katin S. V., Kuposova E. V. et al. Quasioptical Three-Mirror Echelette Traveling-Wave Resonator with Frequency Tuning: Diffraction Theory and Experiment. *Radiophys Quantum El.* 2018. 61. P. 127-134. doi: 10.1007/s11141-018-9876-5.
10. Tatsuo Itoh and R Mittra. An analytical study of the echelette grating with application to open resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1969. 17(6). P. 319-327. doi: 10.1109/TMTT.1969.1126963.
11. Белоус О. И., Булгаков Б. М., Фисун А. И., Фурсов А. М. Открытые резонаторы с эшелетом – новый класс высокочастотных колебательных систем твердотельных и электронновакуумных приборов КВЧ диапазона. *Материалы Всесоюзного научно-технического совещания "Малошумящие генераторы СВЧ. Состояние разработок и перспективы применения в метрологии"*. Иркутск, 1991. С. 93-94.
12. Белоус О. И., Булгаков Б. М., Фисун А. И., Фурсов А. М. Особенности режима автоколлимации в дисперсионном открытом резонаторе с фазокорректирующим зеркалом. *Письма в ЖТФ*. 1992. 18. 4. С. 46-52.
13. Булгаков Б. М., Леонов Ю. И., Фурсов А. М. Исследование поляризационных эффектов в открытых резонаторах миллиметровых длин волн. *Радиотехника. Издат. при ХГУ издат. объедин. "Вища школа"*. 1980. Вып. 53. С. 3-7.

References (transliterated)

1. Galutva G. V., Ryazanczev A. I. *Selekcziya tipov kolebanij i stabilizacziya chastoty` opticheskikh kvantovy`kh generatorov*. M. Svyaz`, 1972. 72 p.
2. Bilous O. I., Fisun A. I., Kirilenko A. A., Natarov M. P., Shubnyi A. I., Sirenko S. P. Quasi-optical millimeter wave solid-state oscillators. Part 1: Open resonant system. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, Vol. 78, 3, pp. 229-249, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i3.40.
3. Ganapolskii E. M., Eremenko Z. E., Kuznetsova E. S. Experimental Detection of Wave Chaos in Quasi-Optical Microwave Cavity Resonator. *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM)*, 2019, 2, pp. 235-244.
4. Nefyodov E. I., Smolskiy S. M. *Open Resonators*. In: *Electromagnetic Fields and Waves*. In Telecommunication Engineering. Springer, Cham, 2019, doi: 10.1007/978-3-319-90847-2_11.
5. Fox A. G., Li T. Resonant modes in a laser interferometer. *Bell System Technical Journal*, 1961, Vol. 40, 2, pp. 453-488, doi: 10.1002/j.1538-7305.1961.tb01625.x.
6. Peng Xiao, Xuecu Tu, Lin Kang, Chengtao Jiang, Shimin Zhai, Zhou Jiang, Danfeng Pan, Jian Chen, Xiaoqing Jia, Peiheng Wu. Reflective grating-coupled structure improves the detection efficiency of THz array detectors. *Scientific Reports*, 2018, Vol. 8, 8032, doi: 10.1038/s41598-018-26204-y.
7. Bulgakov B. M., Fisun A. I., Fursov A. M. E`ffektivny`j tverdotel`ny`j kvaziopricheskij generator s rezonansnoj sistemoj tipa "modificirovanny`j e`shel'ny`j otkry`ty`j rezonator". *Materialy` Kh Vsesoyuznoj nauchnoj konferenczii "E`lektronika SVCh"*, Minsk, 1983, 2, pp. 133-134.
8. Maly`shev V. I. *Vvedenie v e`ksperimental`nyu spektroskopiyu*. M. Nauka, 1979. 478 p.
9. Vlasov S. N., Katin S. V., Kuposova E. V. et al. Quasioptical Three-Mirror Echelette Traveling-Wave Resonator with Frequency Tuning: Diffraction Theory and

- Experiment. *Radiophys Quantum El*, 2018, 61, pp. 127-134, doi: 10.1007/s11141-018-9876-5.
10. Tatsuo Itoh and R Mittra. An analytical study of the echelette grating with application to open resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1969, 17(6), pp. 319-327, doi: 10.1109/TMTT.1969.1126963.
11. Belous O. I., Bulgakov B. M., Fisun A. I., Fursov A. M. Otkry'ty'e rezonatory' s e'shelettom – novy'j klass vy'sokodobrotny'kh kolebatel'ny'kh sistem tverdotel'ny'kh i e'lektronnavakuumny'kh priborov KVCh diapazona. *Materialy' Vsesoyuznogo nauchno-tekhnicheskogo soveshchaniya "Maloshumyashhie generatory' SVCh. Sostoyanie razrabotok i perspektivy' primeneniya v metrologii"*. Irkutsk, 1991, pp. 93-94.
12. Belous O. I., Bulgakov B. M., Fisun A. I., Fursov A. M. Osobennosti rezhima avtokollimaczii v dispersionnom otkry'tom rezonatore s fazokorrektiruyushhim zerkalom. *Pis'ma v ZhTF*, 1992, 18, 4, pp. 46-52.
13. Bulgakov B. M., Leonov Yu. I., Fursov A. M. Issledovanie polarizacziionny'kh e'ffektov v otkry'ty'kh rezonatorakh millimetrovy'kh dlin voln. *Radiotekhnika. Izdat. pri KhGU izdat. ob'ed. "Vishha shkola"*, 1980, 53, pp. 3-7.

Відомості про авторів (About authors)

Ольховський Іван Петрович – викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж, Харківський коледж Державного університету телекомунікацій; м. Харків, Україна; e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net.

Ivan Olkhovskiy – lecturer, Kharkiv College of State University of Telecommunications; Kharkiv, Ukraine; e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net.

Фурсов Анатолій Митрофанович – кандидат фізико-математичних наук, викладач, Харківський патентно-комп'ютерний коледж; м. Харків, Україна; e-mail: amfursov@gmail.com.

Anatoliy Fursov - PhD, lecturer, Kharkiv patent-computer college; Kharkiv, Ukraine; e-mail: amfursov@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ольховський І. П., Фурсов А. М. Квазіоптичний твердотільний генератор з відкритою квазіодночастотною сферешелетною коливальною системою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 30-37. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.05.

Please cite this article as:

Olkhovskiy I., Fursov A. Quasioptical solid-state generator with open quasi-frequency sphereoseletal oscillating system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 30-37, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.05.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ольховский И. П., Фурсов А. М. Квазиоптический твердотельный генератор с открытой квазиодночастотной сферешелетной колебательной системой. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 30-37. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.05.

АННОТАЦИЯ Представлены результаты исследования, связанного с разработкой эффективной высокодобротной открытой колебательной системы квазиоптических твердотельных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Показано, что для стабильной работы твердотельных генераторов на диодах Ганна и лавинно-пролетных диодах, размещенных внутри открытого резонатора, требуется существенное разрежение спектра резонансных частот, исключающее перескоки частоты генерации. С учетом этого требования в качестве открытой колебательной системы твердотельных генераторов предложен сферешелетный открытый резонатор, одно из зеркал которого представляет собой отражательную решетку типа "эшелетт". В работе приведены результаты "холодных" измерений спектра резонансных частот сферешелетного открытого резонатора, которые свидетельствуют о том, что сферешелетный открытый резонатор действительно обладает существенно разреженным спектром как по поперечным, так и, что очень важно, по продольным типам колебаний. Обсуждены и реализованы на практике условия, необходимые для возбуждения в твердотельном генераторе на базе сферешелетного открытого резонатора добротных стабильных колебаний с высоким КПД. Приведены результаты экспериментального исследования квазиоптического генератора на лавинно-пролетных диодах 8-мм диапазона длин волн. Представлены анализ полученных характеристик и их качественное объяснение на основе предложенной модели процессов, протекающих в исследуемом генераторе. Показано, что сферешелетный открытый резонатор может быть использован в качестве резонансной системы не только твердотельных, но и электровакуумных приборов во всем диапазоне КВЧ. Намечен путь в направлении дальнейшего разрежения спектра сферешелетного открытого резонатора с целью создания реально одночастотной открытой колебательной системы.

Ключевые слова: квазиоптический твердотельный генератор; диод Ганна; лавинно-пролетный диод; эшелетт; сферешелетный открытый резонатор; одночастотная открытая колебательная система.

Надійшла (received) 26.04.2021