

УДК 621.373, 621.391

Кременецька Я.А., к.т.н. (Держ. університет інформаційно-комунікаційних технологій)

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ДЖЕРЕЛ МІЛІМЕТРОВОГО І СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНІВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

Кременецька Я.А. Сучасні тенденції розвитку джерел міліметрового і субміліметрового діапазонів для перспективних систем зв'язку. У статті розглядається проблема створення джерел випромінювання міліметрового і субміліметрового діапазонів. Показано, що найефективніше в діапазоні 100-800 ГГц можуть працювати генератори на тунельно-лавинно-пролітних діодах. Також ефективні перетворювачі частоти на основі варакторного помножувача частоти або багатокаскадного ланцюжка помножувачів.

Ключові слова: ПЕРСПЕКТИВНІ ДІАПАЗОНИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ, ЛАВИННО-ПРОЛІТНИЙ ДІОД, ТУНЕЛЬНИЙ ДІОД, ПОМНОЖУВАЧ ЧАСТОТ, ГЕНЕРАТОР СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Кременецкая Я.А. Современные тенденции развития источников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов для перспективных систем связи. В статье рассматривается проблема создания источников излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Показано, что наиболее эффективно в диапазоне 100-800 ГГц могут работать генераторы на туннельно-лавинно-пролетных диодах. Также эффективны преобразователи частоты на основе варакторного умножителя частоты или многокаскадной цепочки умножителей.

Ключевые слова: ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДИАПАЗОНЫ РАДИОСВЯЗИ, ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫЙ ДИОД, ТУННЕЛЬНЫЙ ДИОД, УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТ, ГЕНЕРАТОР СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Kremenets'ka Ia.A. Modern progress of sources generators millimetrer and submillimeter ranges for perspective communication networks. The problem of the sources of radiation wavelength millimetr and submillimetr ranges on considered. Shows that most effectively in the range of 100-800 Ghz can run generators on tunnel-impatt diodes. Also effective frequency converter based on varactor frequency multipliers or multistage chain of multipliers.

Keywords: PERSPECTIVE RADIO RANGE, IMPATT DIODE, TUNNEL DIODE, FREQUENCIES MULTIPLIER, SUBMILLIMETER WAVES GENERATOR

Подальший розвиток методів підвищення завадостійкої, дальності радіозв'язку і швидкості передачі інформації, як припускають фахівці, буде ґрунтований на використанні сигналів складної форми, таких як UWB CDMA (надширокосмугових сигналів з кодовою несівною) [1]. Такі системи найбільш близькі до теоретичної границі, що виходить з теореми Шеннона:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

де C – швидкість передачі двійкової інформації; S – середня потужність передавача; N – потужність шуму в смузі частот W .

Шумоподібні сигнали не впливають на роботу вузькосмугових сигналів і не піддаються федингу. Навпаки, через багатопроменеве поширення шумоподібних сигналів виникають канали додаткової хвилевої енергії. Підвищення пікової потужності сигналів використовують для більш дальнього зв'язку.

Сучасний розвиток мікро- і наноелектроніки дозволяє використовувати мініатюрні обчислювальні системи для алгоритмів сигналів складної форми, а також і для їх генерування, малі розміри антенних решіток. Нові методи аналізу завадостійкості, математичні часові моделі сигналів, нанотехнології визначають формування нових теоретичних положень в області радіоелектроніки і просторового моделювання поширення (зон покриття) надширокосмугових систем зв'язку. У загальному вигляді, основні вимоги до перспективних систем радіозв'язку можна перерахувати: *забезпечення* прихованого зв'язку на фізичному рівні; *уцілення* діапазонів частот, що використовуються, в десятки разів; *висока* завадозахищеність; *підвищена* дальність зв'язку; *висока* швидкість передачі інформації; *вузька* спрямованість антен; *мініатюризація* елементної комплектації.

Ці вимоги призводять до підвищення робочих частот до міліметрового і субміліметрового діапазонів, ускладненню методів кодування і модуляції радіосигналів, що також призводять до необхідності створення джерел коливачів в перспективних діапазонах: *високостабільних* генераторів, що перебудовуються по частоті та по потужності; *генераторів* шуму; *генераторів* імпульсних сигналів з високою піковою потужністю.

В діапазоні частот $0.1 \div 1.0$ ТГц самими малошумливими джерелами випромінювання є генератори на основі тунельних діодів, а найпотужнішими в міліметровому діапазоні - на основі лавинно-пролітних діодів. Джерелами випромінювання до 100-200 ТГц на сьогодні являються компактні твердотільні генератори з низьковольтним живленням. Проте при більш високих частотах вони практично не можуть реалізуватися через фундаментальні фізичні причини, і із зростанням частоти усе більш помітну негативну роль починає грати обмеженість часу прольоту носіїв струму через область їх взаємодії з високочастотним полем в напівпровідникових пристроях. І також на цих же частотах в даних напівпровідникових структурах здійснюється швидке зростання резистивних втрат. В результаті рівень цих втрат починає істотно перевищувати рівень усього характерного імпедансу, що визначає не лише їх робочі параметри, але і можливість роботи в якості генераторів.

На оптичних принципах генерації в твердотільних лазерах спроби створення твердотільних пристроїв субміліметрового діапазону були безуспішними. Оскільки енергія фотонів на таких порівняно низьких для оптичного діапазону частотах ще настільки мала (близько декількох меВ), що виявляється порівнянною з енергією теплових фононів кристалічної решітки, що неминуче призводить до зриву генерації в таких структурах. Негативний вплив цього ефекту можна ослабити шляхом криогенного охолодження цих структур. Твердотільні каскадні лазери працюють вище 1 ТГц і потужністю до 100 мВт. Одним з варіантів забезпечення генерації в діапазоні 200 - 1000 ТГц являється твердотільні задавальні генератори з низьковольтним живленням, з подальшим множенням частоти (за допомогою помножувачів відносно низьких частот) до необхідного рівня.

Твердотільні генератори міліметрового діапазону, робочу частоту яких можна намагатися підняти за допомогою помножувачів частоти до більш високого рівня, побудовані на наступній напівпровідниковій базі [2]. Це генератори на діодах Ганна (ГДГ), генератори на лавинно-пролітних діодах (ГЛПД), генератори на тунельно-пролітних діодах (ГТПД) і генератори на тунельно-лавинно-пролітних діодах (ГТЛПД). ГДГ працюють на об'ємних ефектах, а не на ефектах в напівпровідникових переходах, як усі інші твердотільні генератори, і в них відсутній лавинний пробій, вони відрізняються істотно меншим рівнем шумів. А це, звичайно, дуже цінна якість ГДГ як джерел гетеродинного випромінювання, і їх потужність складає не менше 10 мВт при ККД $2 \div 3$ %.

Фізичні механізми роботи ГЛПД лежать в наступному. Для формування в структурі ЛПД в НВЧ області негативної диференціальної провідності використовуються лавинні процеси ударної іонізації і подальшого просторового перенесення носіїв заряду. Час дрейфу електронів, генерованих завдяки ударній іонізації, через область об'ємного заряду до відносно низькоомної n - області виявляється істотно більше часу дрейфу дірок. Електрони, генеровані при цьому за рахунок ударної іонізації навколо p - області, дрейфують потім через n - область, причому час їх перенесення визначається параметрами і геометрією структури діода. Генерація виникає завдяки присутнім в напівпровіднику високочастотним складовим тепловому шуму, а підтримується за рахунок існування в такій напівпровідниковій структурі негативної диференціальної провідності [3]. Область негативної провідності перебуває в межах від частоти лавинного резонансу $f_a = \frac{\omega_a}{2\pi}$ до $2f_a$ [4]:

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2v_s j_0 \frac{\partial \alpha}{\partial E}}{\epsilon_0 \epsilon_s}},$$

де v_s – швидкість насичення електронів; j_0 – постійна складова густини струму;

α – коефіцієнт іонізації ($\alpha = A \exp\left(-\frac{E_0}{E}\right)^m$, для кремнію $m = 1$, $A = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$, $E_0 = 1 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}}$);

E – напруженість поля в області лавинного пробію, що змінюється від максимального

значення до значення в дрейфовій області; ϵ_0 – діелектрична стала; ϵ_s – відносна діелектрична проникність напівпровідника.

Рівень вихідної потужності ГЛПД на частотах близько 100 ГГц складає близько 1 Вт і падає до значень $30 \div 50$ мВт на частотах поблизу 200 ГГц. При цьому ККД в однопролітному варіанті, виміряний в інтервалі частот від 40 до 140 ГГц, складає близько 8 %. необхідно відмітити, що оскільки в основі усіх ГЛПД лежить лавинний пробій, вони являються, з одного боку, широкосмуговими, але з іншої – пристроями з високим шумом.

ГТПД працюють на основі тунельного ефекту, який є наслідком дуже малої товщини p - n - перехідної структури діода близько декількох нанометрів, що як мінімум на два порядки менше, ніж в усіх інших напівпровідникових діодах і з дуже високою мірою легування до 10^{20} см^{-3} . Саме ця обставина робить можливим тунелювання носіїв заряду крізь дуже тонкий потенційний бар'єр. Час дрейфу електронів (час прольоту їх через бар'єр) визначає на високих частотах фазове зрушення між прикладеною до діода напругою і струмом, що протікає через нього. Цей механізм формує в такій структурі негативну провідність за рахунок пролітних ефектів, що дає можливість генерації в субміліметровому діапазоні. При цьому такі діоди працюють в режимі лавинного множення носіїв заряду при зворотному зміщенні електронно-діркового переходу. Резонансну частоту тунельного діоду оцінюють за

формулою [4]:
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_s C} - \frac{1}{(RC)^2}}$$
, де L_s, C, R – відповідно: індуктивність, ємність,

негативний опір тунельного діоду. Тому частотні характеристики тунельного діоду визначаються в основному бар'єрною ємністю та різними витіками.

У ГТЛПД для генерації носіїв використовуються як тунельний ефект, так і ударна іонізація. Ймовірно, ГТПД і ГТЛПД найефективніше працюватимуть на частотах $100 \div 800$ ГГц [5]. Це може скласти приблизно 5 % ККД на частотах близько 500 ГГц. Навіть у субміліметровому діапазоні вони зможуть мати хороший ККД [6]. Поки проводяться перші пробні експерименти, проте на ГТЛПД на частоті 150 ГГц вже отримана вихідна потужність 3 мВт [7], а ККД ГТПД на частоті 338 ГГц, причому ККД їх склав 0.12 %.

Для створення на основі ГЛПД, ГТПД, ГТЛПД джерел випромінювання для систем радіозв'язку, що перекривають увесь субміліметровий діапазон, потрібно ще і генератори гармонік або помножувачі частоти для перенесення робочих частот у більше високочастотний інтервал. Останнім часом все більший інтерес проявляється до досліджень можливостей використання стільникових і планарних варакторних структур з бар'єром Шоттки [8]. Ефективність роботи варакторного помножувача частоти визначається головним чином місткістю варактора і крутизною його вольт-фарадної характеристики. Ці параметри варактора слабо залежать від його температури.

Аналіз приведених в літературі даних про конструкції помножувачів свідчить про те, що найвища ефективність множення частоти досягається при хвилеводному виконанні їх електродинамічних систем [2]. Це обумовлено тим, що саме хвилеводна елементна база, яку реалізують для високочастотної області даного діапазону, забезпечує найбільш ефективну взаємодію варактора з полем хвилеводу. Останнім часом все більший інтерес проявляється до досліджень можливостей використання у низькочастотній області субміліметрового діапазону. Порівняльний теоретичний аналіз характеристик багатокаскадного ланцюжка помножувачів з низьким номером вихідної гармоніки кожного з них (подвоювачів і в крайньому випадку потроювачів частоти) і однокаскадного помножувача з високим номером вихідної гармоніки (до 5 – 6) однозначно свідчить на користь багатокаскадного ланцюжка [9]. Згідно з результатами аналізу [2], отримати на виході твердотільного генератора на основі однокаскадного помножувача потужність не менше 100 мкВт на частотах вище 500 ГГц вже абсолютно неможливо. І тому необхідно використати багатокаскадний ланцюжок подвоювачів та потроювачів частоти для перетворення низькочастотної області від 100 до 300-500 ГГц на більш високий діапазон і можна розрахувати достатні рівні потужності. Аналіз такого рішення цієї проблеми свідчить про те, що таким чином, мабуть, вдасться

перекрити увесь субміліметровий діапазон, включаючи його саму високочастотну частину, з вихідною потужністю до 100 мкВт.

На рис. 1 представлені сучасні досягнення потужності напівпровідникових генераторів на частотах понад 100 ГГц ($\times 2$ – подвоювач частоти, $\times 3$ – потроювач частоти і т.д.) [2].

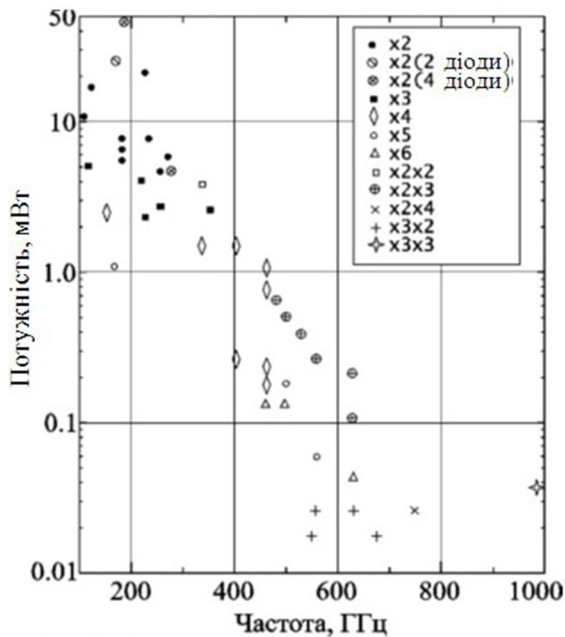


Рис.1. Потужності напівпровідникових генераторів на частотах понад 100 ГГц

Дослідження можливостей генерування (перетворення) частоти, що розгорнулися зараз, на основі ефекту сильних полів в напівпровідникових діодних структурах, в надпровідниках та з вакуумними проміжками свідчить про успішні результати в цій області. Розігрів електронів в сильних електричних полях до енергій 0,2 еВ досягається за 10^{-12} с, і тоді проявляються ефекти тунелювання та ударної іонізації. У звичайних умовах зростання густини струму внаслідок тунельного ефекту має місце при більших значеннях напруженості поля, чим зростання щільності струму внаслідок ударної іонізації. Проте можна створити такі умови (вузькі *p-n*-переходи у вироджених напівпровідниках), коли ударна іонізація ускладнена, а збільшення щільності струму, що протікає через електронно-дірковий перехід, обумовлене тунельним механізмом. Із стрімким розвитком наноелектроніки та пов'язаних з нею

нових фізичних процесів, що протікають в низькорозмірних матеріалах, необхідно розширювати і поглиблювати теоретичне, і експериментальне вивчення ударної іонізації, та тунельного ефекту для отримання робочих частот до 1 ТГц.

Література

1. Копейкин В.В. Сверхширокополосная система связи с кодовой несущей / В.В. Копейкин // Радиотехника. – 2009, –N 6. – С.21-27.
2. Еру И.И. Твердотельные источники гетеродинного излучения субмиллиметрового диапазона / И.И. Еру // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т.15, № 2. – С. 224-233.
3. Kuno H. J. Solid-state millimeter-wave power sources and combiners / H. J. Kuno // Microwave J. – 1981. – Vol. 24, – No 6. – P. 21-34.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. / С. Зи : пер. з англ. В. А Гергеля, В. В. Ракитина. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
5. Кременецкая Я. А. Резонансно-туннельные диоды при больших напряжениях смещения / Я. А. Кременецкая, В. Е. Чайка, Г. Е. Чайка // Зв'язок. – 2004. – № 1. – С. 60-62.
6. Elta M. E. 150 GHz GaAs MI- TATT source/ M. E. Elta, H. R. Fetterman et al. // IEEE Electron. Device Lett. – 1980. – Vol. EDL -1, No. 6. – P. 115-116.
7. Nishizava J. Submillimeter wave oscillation from GaAs TUNNETT diode / J. Nishizava, K. Motoja et al // Proc. 9-th European Microwave Conf. – Brighton, (England). – 1979.
8. Archer J. W. Low-parasitic, planar Schottky diode for millimeter-wave integrated circuits / J. W. Archer, R. A. Batchelor et al // IEEE Trans. – 1990. – Vol. MTT-38, – No. 1. – P. 15-22.
9. Raisanen A. Capability of Schottky-diode multipliers as local oscillators at 1 THz / A. Raisanen, M. Sironen. // Microwaves Opt. Technol. Lett. – 1991. – Vol. 4, –No. 1. – P. 29-33.