

**ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПУ *N-push* ДЛЯ ПОБУДОВИ
МАЛОШУМЛЯЧИХ ТРАНЗИСТОРНИХ НВЧ ГЕНЕРАТОРІВ***Коцержинський Б.О.*

У діапазоні НВЧ створення малошумлячих генераторів із достатньою вихідною потужністю у інтегральному або гібридно-інтегральному виконанні наштовхується на труднощі реалізації на кристалі схемних елементів для отримання коливальної системи (КС) генератора з високою добротністю та малошумлячих транзисторів, бо із зростанням частоти добротність КС зменшується, а шуми транзисторів збільшуються. Побудова генераторів на основі помноження частоти має суттєві недоліки: збільшення шумів пропорційно коефіцієнту помноження та зменшення вихідної потужності. Принцип *N-push* генераторів [1] полягає у використанні N ідентичних або синхронізованих генераторів коливачів із багатим набором гармонік, які працюють на один спільний елемент, у якому одні гармоніки додаються у фазі, а інші у протилежній фазі. Спільна робота генераторів приводить до зменшення шумів у N разів [2], а отримання M гармоніки збільшує шуми у M разів. Розробка генераторів на меншу у M разів частоту дозволяє отримати простішу топологію генераторів, КС з більшою добротністю та реалізувати транзистори з меншим рівнем шумів та більшою потужністю. Зменшений також вплив навантаження на роботу ядра генератора, бо вихід генератора є віртуальним нулем для основної гармоніки.

Розробникам *N-push* генераторів доводиться вирішувати такі задачі: як отримати N - генераторних секцій із когерентними коливаннями та різними фазами, як збільшити коефіцієнт перетворення для M -ої гармоніки, тобто як отримати коливання із достатнім вмістом цієї гармоніки і який вибрати елемент для додавання коливачів N генераторних секцій, як збільшити вихідну потужність та на яких транзисторах все це реалізувати.

Найбільшого поширення набули подвоювачі частоти. Дві взаємно синхронізовані генераторні секції Колпітца на біполярних транзисторах з ємнісним зв'язком емітерних виводів працюють на спільне навантаження (без додаткового суматору) і забезпечують монолітному генераторові такі параметри: частота сигналу 38 ГГц, рівень фазового шуму -89 дБн/Гц при відстроюванні частоти на 100 кГц [3].

Генератори за аналогічною схемою на польових транзисторах із зв'язаними стоками, але з використанням замість спільного навантаження кола, оптимізованого на максимум потужності на вихідній частоті (рис.1), мають такі параметри: на частоті 94(135) ГГц вихідна потужність сигналу 1(0) дБмВт, рівень фазового шуму -84 дБн/Гц при відстроюванні частоти на 1 МГц, придушення основної гармоніки 35(25) дБ, можливе перестроювання частоти 3(4) ГГц зі зміною вихідної потужності на 4 дБмВт [4] (у

дужках параметри для 135 ГГц). Як довели попередні дослідження авторів [4], генератори із зв'язком транзисторних секцій через виточки мають більш складну топологію і розміри кристалу та меншу вихідну потужність.

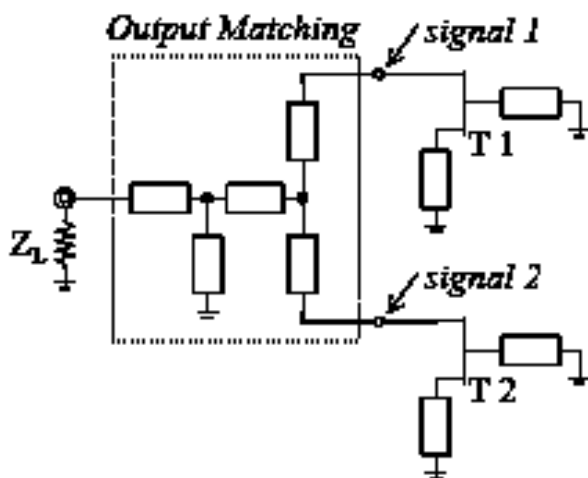


Рис.1

Значна група генераторів фіксованої та змінної частот використовує диференціальні та балансні перехрестно-зв'язані транзисторні пари із різною реалізацією взаємного зв'язку. Генератори у працях [5,6] побудовані за простою схемою (рис.2) на польових транзисторах. Спільна коливальна система створена паразитними ємностями

транзисторів та багатопаровими індуктивностями. Вихідний вузол розташований у центрі індуктивності (віртуальне заземлення для основної гармоніки та відкрите коло для другої). У ньому сигнали основної гармоніки компенсують один одного завдяки 180° різниці фаз, сигнали другої гармоніки подвоюються.

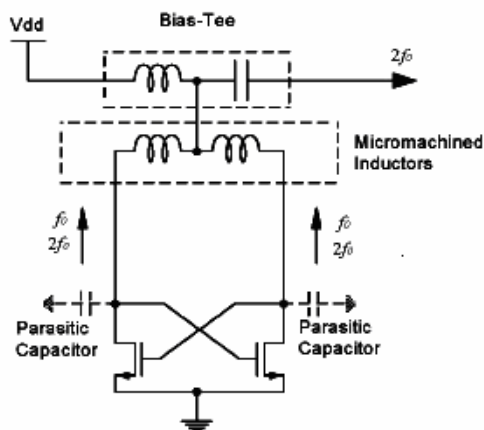


Рис. 2

Монолітний генератор [6] на частоті 30,9 ГГц забезпечує 4 дБмВт вихідної потужності при споживанні 117,5 мВт, його фазовий шум становить -102,3 дБн/Гц при відстроюванні частоти на 1 МГц, рівень основної гармоніки -30 дБ.

У генераторі [7] для створення монолітного кристалу використовуються планарні лінії, ємності і резистори та спіральні індуктивності у баланській транзисторній парі на біполярних

транзисторах (рис.3). Доведено, що найкращі результати можна отримати зі зв'язком генераторних секцій через емітери у порівнянні зі зв'язками через колектори або бази. Використаний ємнісний зв'язок із додаванням відрізка лінії для забезпечення 180° фазового зсуву. Постійний струм емітера організує струмове дзеркало, живлення бази з дільника напруги. У колекторних колах використані планарні резонатори. Генератор може перестроюватися у діапазоні 63...72 ГГц при вихідній потужності 1,8...1,6 дБмВт, забезпечуючи фазовий шум на рівні -103 дБн/Гц при відстроюванні частоти на 1 МГц.

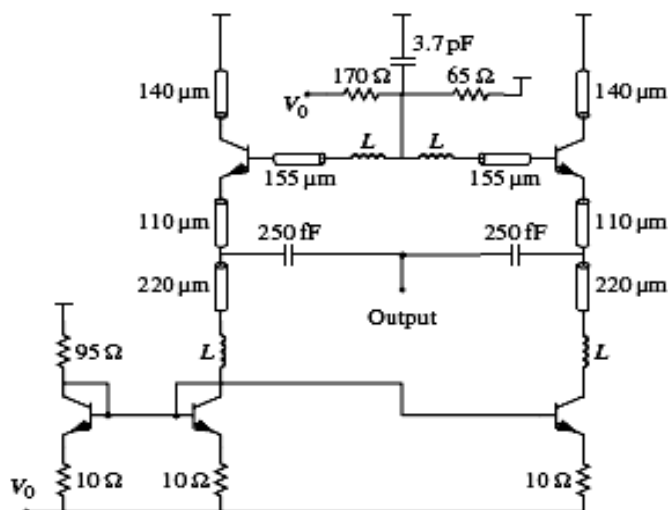


Рис. 3

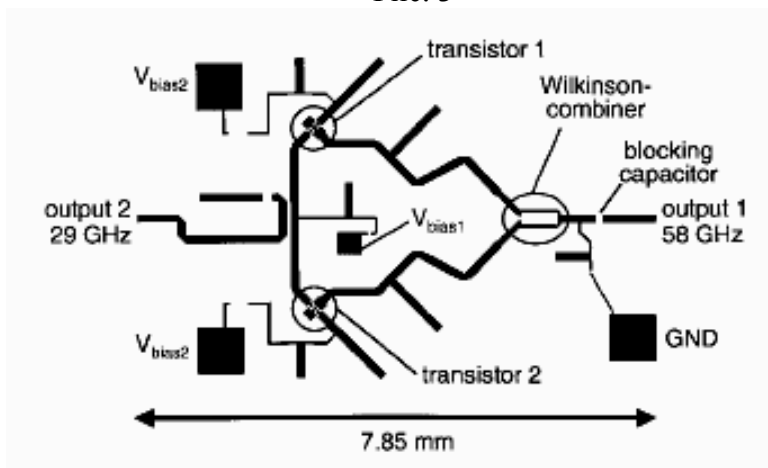


Рис. 4

Генераторні секції подвоювачів частоти можуть бути зв'язані для взаємної синхронізації за допомогою компланарних ліній. Вихідні сигнали секцій із 180° різницею фаз подаються на суматор. Опис таких генераторів наведений у [8].

Гібридний генератор (рис.4) використовує біполярні транзистори, колектори яких зв'язані мікросмушковою лінією (МСЛ). Відрізки МСЛ приєднані до виводів баз. Вихідні сигнали секцій додаються у суматорі Вілкінсона, оптимізованого для роботи на вихідній частоті 58 ГГц.

При вихідній потужності 1 дБмВт фазовий шум на рівні -108 дБн/Гц при відстроюванні частоти на

1 МГц. Генератор із зв'язком між емітерами транзисторів має схожі параметри. Розрахунок генераторів був виконаний із використанням нелінійних моделей і стандартних методів комп'ютерного проектування.

Перспективна конфігурація генераторів, у яких генераторні секції підключаються до спільного резонатора. У гібридному генераторі [9] задіяний спільний щілинний кільцевий резонатор, довжина якого дорівнює довжині хвилі основної гармоніки (рис.5).

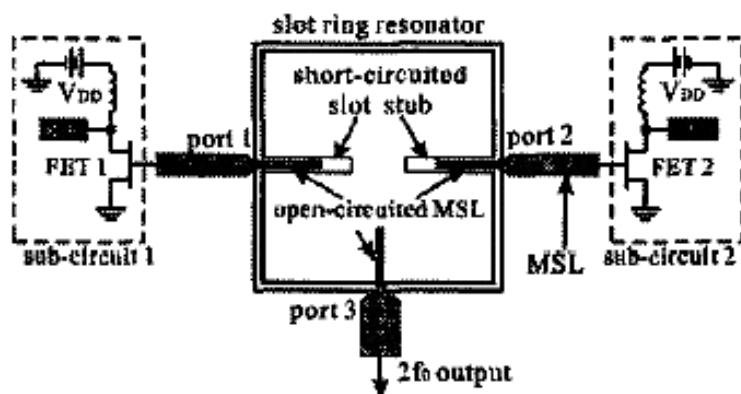


Рис. 5

Генераторні секції на польових транзисторах приєднуються до резонатора у точках із максимальною на-

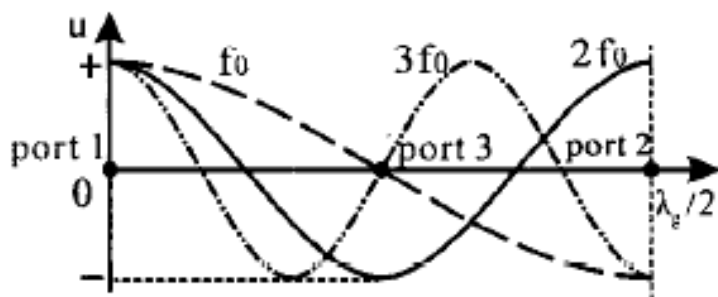


Рис.6 Розподіл напруги вздовж резонатора

пругою і протилежними фазами ("port 1" і "port 2" на рис.5, 6). У точці "port 3" (рис.5, 6) сигнали основної і непарних гармонік суттєво зменшені, а бажана друга гармоніка збільшена. Генераторні секції працюють синхронно на однаковій частоті 8 ГГц, з

однаковими амплітудами коливань та протилежними фазами, що є ідеальним для реалізації *push-push* генератора. Вони зв'язані із резонатором через відкриті відрізки МСЛ.

Польові транзистори працюють у нелінійному режимі для отримання більшої потужності на другій гармоніці.

Для стабілізації резонансного режиму використані замкнені відрізки МСЛ. Генератор забезпечує на частоті 16 ГГц 10 дБмВт вихідної потужності, рівень фазового шуму -103,8 дБн/Гц (відстроювання частоти—100 кГц), -121,3 дБн/Гц відстроювання частоти — 1 МГц). Досягнуті такі рівні зайвих гармонік: основної -37,5 дБ, третьої -40 дБ, четвертої -42,2 дБ. Вони обумовлені симетрією топології генератора.

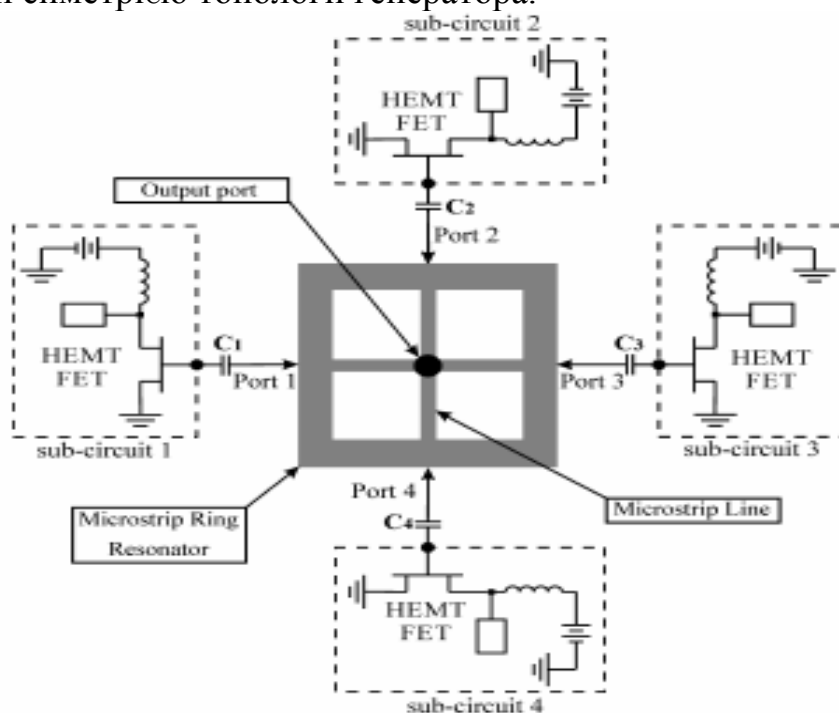


Рис.7.

За розглянутим принципом був створений гібридний генератор із виходом на четверту гармоніку (рис.7) [10]. Генераторні секції працюють на частоті 9 ГГц. Ненавантажена добротність МСЛ резонатора, довжина якого дорівнює довжині хвилі 1-ї гармоніки, — 46. У точках 1,2,3,4 тільки коли-

вання 4-ї гармоніки мають однакові фази, вони об'єднуються у центрі резонатора за допомогою відрізків МСЛ. Отримані такі параметри: частота вихідного сигналу 35,8 ГГц, потужність 1,67 дБмВт, фазовий шум - 82,3 дБн/Гц (відстроювання частоти на 100 кГц) та -104 дБн/Гц (відстроювання частоти на 1 МГц), рівні гармонік: 1-ї -18 дБ, 2-ї -17,9 дБ, 3-ї -17,8 дБ, 5-ї -35,5 дБ.

Генератори з діелектричним резонатором за схемою, подібною зображеній на рис.8, мало пристосовані для монолітної реалізації у міліметровому діапазоні.

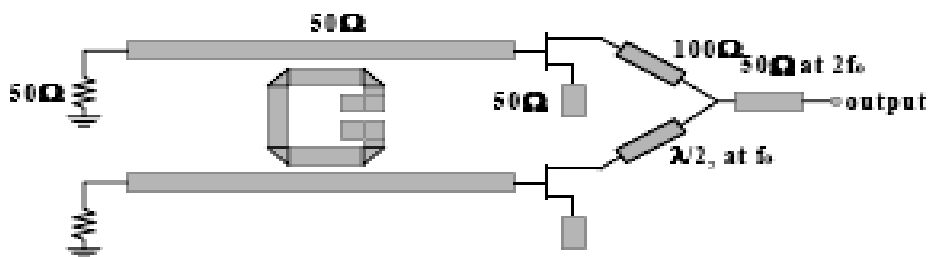


Рис.8.

П-подібні МСЛ резонатори (*hair-pin*) знаходять застосування у монолітних генераторах з фіксованою та керованою напругою частотою [11,12]. Простий монолітний *push-push* генератор [11] використовує такий резонатор, зв'язаний із генераторними секціями МСЛ із хвильовим опором 50 Ом. У суматорі хвильовий опір МСЛ 100 Ом для основної гармоніки та 50 Ом для другої. На частоті 18 ГГц вихідна потужність сигналу -1,67 дБмВт, фазовий шум становить -90 дБн/Гц (відстроювання частоти на 100 кГц).

Вихідна потужність M -ї гармоніки *push-push* генератора залежить від форми коливань генераторних секцій та наявності достатньої M -ї гармоніки. У свою чергу форма коливань впливає на рівень фазового шуму генератора.

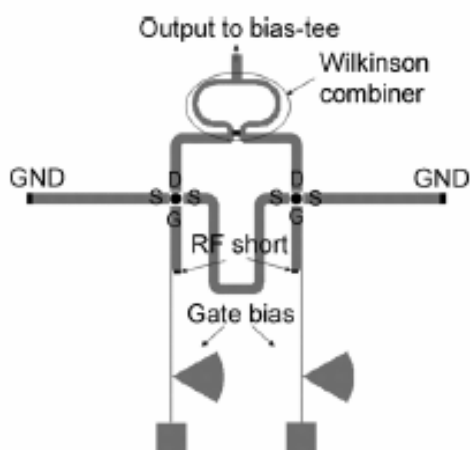


Рис. 9

Доведено, що зменшення рівня шуму у N разів у генераторі із N секціями можливе тільки при його ретельній розробці [13]. Для зменшення впливу $1/f$ шумів транзисторів на шуми генератора - подвоювача форма коливань генераторних секцій повинна бути симетричною з однаковими фазами гармонік. У генераторах із потроєнням частоти коливання генераторних секцій не повинні мати парних гармонік. Два подвоювачі частоти були створені із симетричною і асиметричною формами коливань на стоках транзисторів (рис.9) за допомогою відповідного вибору довжини відрізка МСЛ зворотного зв'язку. Ре-

зультати випробувань: $f = 5,62 (5,77)$ ГГц; $P_{out} = 2,9 (1,9)$ дБмВт; рівні гармонік: основної -20(-19) дБ, третьої -24(-18) дБ.

Фазовий шум у генераторі з симетричною формою коливань на 15 дБ менше шуму генератора з асиметричною формою коливань (відстроювання частоти 100 кГц). Для генераторів із потроєнням частоти різниця становить 15-17 дБ (за теоретичними розрахунками 26 дБ).

Побудова *N-push* генераторів дає можливість значно покращати параметри транзисторних генераторів, освоїти весь міліметровий діапазон [14]. Багато керованих напругою генераторів створено саме за розглянутим принципом.

Література

1. Yen S., Chu T. An N-harmonic Oscillator Using An N-push Coupled Oscillator Array with Voltage-clamping Circuits//IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest.-2003.-P.1175-1179.
2. Chang H., Cao X., Mista U., York R. Phase Noise in Coupled Oscillators: Theory and Experiment // IEEE Trans. MTT.-1997.-V.45.- №5.-P. 604-614.
3. Schott M., Ruhnert H., Lenk F., Hilsenbeck J., Wurfl J. 38 GHz Push-Push GaAs-HBT MMIC Oscillator // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest .-2002.-P.839-842.
4. Kudzus S., Haydl W., Tessmann A., Bronner W., Schlectweg M. Push-Push Oscillators for 94 and 140 GHz Applications Using Standard Pseudomorphic GaAs HEMTs // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest .-2001.-P.1571-1574.
5. Wang T., Liu R., Chang H., Lu L. A 22-GHz Push-Push Oscillator Using Micromachined Inductors // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.-2005.-V.15.-№ 12. -P.859-861.
6. Wang T., Liu R. A 30-GHz Low-Phase-Noise 0.35- μ m CMOS Push-Push Oscillator Using Micromachined Inductors // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. 2006. P.569-572.
7. Wanner R., Schafer H., Lachner R. A Fully Integrated 70 GHz Low Phase Noise Push-Push Oscillator // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest .-2005.-P.1523-1526.
8. Sinnesdichler F. Hybrid Millimeter-Wave Push-Push Oscillators Using Silicon-Germanium HBTs // IEEE Trans. MTT.-2003.-V.51.- №2.-P. 422-430.
9. Xiao H., Tanaka T., Aikawa M. A Low Phase Noise Ku-Band Push-Push Oscillator Using Slot Ring Resonator // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.-2004.-P.1333-1336.
10. Xiao H., Tanaka T., Aikawa M. A Ka-Band Quadruple-Push Oscillator // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest .-2003.-P.889-892.
11. Hyun A., Kim H., Park J., Kim J., Lee J. K-Band Hair-pin Resonator Oscillators // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest.-1999.-P.1-4.
12. Hwang C., Lee J., Kim J. Simple K-band MMIC VCO Utilizing a Miniaturized Hair-pin Resonator and a Three-Terminal p-HEMT Varactor With Low Phase Noise and High Output Power Properties // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. - 2003. - № 6. - P.229-231.
13. Choi J., Mortazawi A. Design of Push-Push and Triple-Push Oscillators for Reducing 1/f Noise Upconversion // IEEE Trans. MTT.-2005.-V.53.- №11.-P.3407-3413.
14. Baeyens Y. Highly Efficient Harmonically Tuned InP D-HBT Push-Push Oscillators Operating up to 287 GHz // IEEE MTT-S Int.Microw.Symp.Digest.-2007. - P.341-344.

Коцержинський О.Б. Використання принципу N-push для створення малошумлячих транзисторних НВЧ генераторів. Розглянуті особливості та переваги використання принципу N-push для побудови транзисторних генераторів у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль.

Ключові слова: мікрохвильовий генератор, фазовий шум

Коцержинский Б.А. Использование принципа N-push для создания малошумящих транзисторных СВЧ генераторов. Рассмотрены особенности и преимущества использования принципа N-push для построения транзисторных генераторов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн

Ключевые слова: микроволновый генератор, фазовый шум

Kotserjinsky B.O. Using N-push principle for the microwave transistor oscillators design. The features and advantages of the N-push microwave transistor oscillators design are discussed

Key words: microwave generator, phase noise