

чином пара скануючих растрів дасть при спряженні їх між собою візуальну картину з просторовими спотвореннями меншими, ніж при спряженні кожного з растрів з еталоном.

З викладеного вище матеріалу можна зробити такі висновки. Муаровий метод контролю геометричних спотворень растрів ЕПТ дозволяє оперативно проводити процедури з їх корекції, оскільки ступінь корекції спостерігається візуально одночасно по всьому робочому полю растра. Цей метод може бути з успіхом використаний при розробці прецизійних відхилювальних систем та як засіб контролю якості при їх серійному випуску. Реалізація методу не вимагає складного технічного обладнання та копіткої процедури проведення контрольних вимірювань.

Щодо перспективи подальших наукових розвідок можна вказати на можливість використання муарового методу не тільки для кількісного контролю геометричних перекирчень, а й прецизійного вимірювання реального значення спотворень в окремих зонах досліджуваного растра.

1. Педан А.Д., Любинецька Б.І. Дослідження електронної сумісності в скануючому оптичному мікроскопі на базі ЕПТ // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2001. – № 428. – С. 83 – 86. 2. Hrytskiv Z., Pedan A. Scanning optical microscopy in telemedicine. Telekomunicacije, Beograd (Yugoslavia). Dec. 2001. – No. 4. – Pp 28 – 30. 3. ГОСТ 11982-81. Системы отклоняющие телевизионных приемников черно-белого телевидения. – М.: Госком СССР по стандартам. 4. Гринберг С.И., Резник М.И., Романюк Ю.В. Применение муаровых комбинационных полос для настройки ТВ растров на оптимальную фокусировку // Техника кино и телевидения, 1980. – № 7. – С. 34-35. 5. Дитчберн Р. Физическая оптика. – М.: Наука, 1965. – 631 с. 6. Мироненко А.В. Фотоэлектрические измерительные системы. – М.: Энергия, 1967. – 359 с.

УДК 621.317

Олексій Яненко, Сергій Перегудов*

Науково-дослідний центр квантової медицини

"Відгук" МОЗ України, м. Київ,

*МП "МРТ-техсервіс", м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЧАСТОТИ ВХІДНОГО СИГНАЛУ НА ПАРАМЕТРИ КОМУТАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА РАДІОМЕТРА

© Яненко Олексій, Перегудов Сергій, 2003

Досліджено вплив температури та частоти вхідного сигналу на параметри комутаційного перетворювача радіометра з використанням електрофізичних параметрів $p-i-n$ -діода.

The influence of temperature and frequency of input microwave signal is discussed in this article. Analysis accomplished on the basis of electro physical parameters of $p-i-n$ diode.

Вступ. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Активний розвиток радіотехніки та радіоелектроніки, засобів зв'язку та телекомунікації практично неможливий без створення високоточних засобів вимірювання параметрів кіл та сигналів, зокрема пристроїв та систем міліметрового (мм-) діапазону. Саме у

цьому діапазоні вимірювання реєстрація та аналіз слабких (менше 10^{-12} Вт) сигналів є актуальною задачею таких галузей науки, як фізика живого, біологія та медицина, радіо-астрономія та радіолокація. Вирішення вказаних проблем можливе за допомогою високо-чутливих модуляційних радіометрів [1]. Модуляційний радіометр мм-діапазону [2] дозволяє збільшити чутливість та динамічний діапазон випромінювань, що вимірюються.

Важливим моментом метрологічного забезпечення вимірювання низькоінтенсивних випромінювань за допомогою радіометричної системи є оцінка її точності. Одне з основних джерел похибок – це нестабільність параметрів елементів вхідних кіл вимірювальних пристроїв в умовах експлуатації [3, 4]. Наведені авторами розрахунки похибок вимірювань враховують максимально можливі зміни параметрів вузлів вимірювальних систем при впливі дестабілізуючих факторів. Наслідком цього є перевищення величини похибки вимірювання, яка припускається.

Насправді частіше не потрібно проводити вимірювання у всьому діапазоні робочих частот радіометра і тим більше при будь-якій допустимій температурі. Як правило, реальні діапазони частоти та температури, у яких проводяться вимірювання, значно менші. Щоб розрахувати похибки вимірювань, потрібно знати температурні та частотні залежності параметрів вузлів системи. Для вказаних радіометрів такими вузлами є елементи вхідного тракту, насамперед атенюатор перетворювача, який керується електричним струмом.

Мета дослідження

Мета дослідження – вплив температури і частоти вхідного сигналу на параметри комутаційного перетворювача радіометра мм-діапазону [2] і, як наслідок, на точність вимірювання за допомогою радіометра, а також розробка методу розрахунку з урахуванням типових характеристик регульованого атенюатора як базового елемента перетворювача.

Розрахунок коефіцієнта передачі перетворювача та залежність його від температури та частоти

У модуляційному радіометрі для регулювання потужності крім змінних механічних атенюаторів застосовується атенюатор на *p-i-n*-діоді, який керується електричним струмом – модуль, який являє собою розподілений *n-i-p-i-n*-діод з товстою базою (*i*-шар ≈ 300 мкм), що встановлений у відрізьку *H*-хвилеводу 5мм-діапазону довжин хвиль.

Відомо, що такі атенюатори є широкосмуговими пристроями, які мають малі втрати пропускання $A_{\text{ДР}}$ (до 1,5 дБ), але значні втрати затухання A_3 до 40 дБ (залежно від струму управління). В [5] зазначено слабку залежність втрат пропускання і затухання від температури $\Delta A_{\text{ДР}} \sim 0,05 - 0,06$ дБ та $\Delta A_3 \sim 1,6$ дБ в діапазоні температур від 0 до 60°C). Однак, даний аналіз проведений для корпусних діодів з базою до 100 мкм, які працюють в сантиметровому та дециметровому діапазоні довжин хвиль.

Точність вимірювання модуляційного радіометра визначається коефіцієнтом передачі потужності K окремих його вузлів. Зокрема для регульованого атенюатора

$$\delta K = K_{\text{max}} - K_{\text{min}}, \quad (1)$$

де *min* і *max* відповідають мінімальному та максимальному значенню коефіцієнта передачі атенюатора.

Водночас на параметри регульованого атенюатора з використанням *p-i-n*-ключів може використовуватися у вигляді комутаційно-модуляційного перетворювача радіометричних

вимірювачів, впливатимуть такі зовнішні фактори, як температура та частота вхідного сигналу. Досліджувати та оцінювати міру впливу цих факторів на коефіцієнт передачі $p-i-n$ -ключа особливо доцільно в мм-діапазоні, де розміри кристала діода співмірні з довжиною хвиль, а параметри діода – ємність та провідність є розділеними елементами.

Оцінимо параметр K залежно від температури і частоти для атенюатора мм-діапазону М347, який може використовуватись в діапазоні частот 25 - 78 ГГц. Для оцінки достатньо скористатися паспортними даними розподіленого $n-i-p-i-n$ -діода і деякими електрофізичними параметрами кремнію, з якого виготовлений діод.

Діод (аналог 2А-513А1) має такі габарити: $w = 350$ мкм – товщина бази (загальна товщина діода з двома базами і виводами 800 мкм); $S = a_1 l$ – площа контактів (перетин бази); $a_1 = 3,6$ мм – ширина структури, $l = 1,5$ мм – довжина структури. Діод розташований в Н-хвилеводі, що узгоджений з прямокутним хвилеводом $3,6 \times 1,8$ мм.

Згідно з [5] коефіцієнт затухання електромагнітної хвилі в хвилеводі α можна розрахувати за формулою:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\left[\varepsilon - \left(\frac{\lambda}{2,6a} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 w} \right)^2} - \left[\varepsilon - \left(\frac{\lambda}{2,6a} \right)^2 \right] \right)}, \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі; f – частота ($\omega = 2\pi f$); $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$; σ – провідність бази діода, яка залежить від струму керування I та температури T ; $a = 3,6$ мм – розмір широкої стінки хвилеводу; 2,6 – коефіцієнт, що враховує Н-форму хвилеводу; $\varepsilon = 12$ – діелектрична проникність кремнію (вважаємо, що хвилевід повністю заповнений кремнієм з провідністю σ).

Залежність σ від температури отримаємо за формулою, яка наведена для $p-i-n$ -структури у режимі малого змінного сигналу [6]:

$$\sigma = \frac{I \cdot l}{S f(w, \tau)}. \quad (3)$$

Функція $f(w, \tau)$ визначається за формулами:

$$f(w, \tau) = \frac{2kT}{q} \cdot \frac{2b}{b+1} \cdot \frac{sh^2 \frac{w}{L}}{1 + b \cdot ch \frac{w}{L}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\delta_o}} \cdot \text{arctg} \cdot \frac{\sqrt{\delta_o}}{1 + \frac{b + ch \frac{w}{L}}{1 + b \cdot ch \frac{w}{L}}}, \quad (4)$$

де

$$\delta_o = \frac{b + ch \frac{w}{L}}{1 + b \cdot ch \frac{w}{L}} \cdot 2ch \frac{w}{L} - \left(\frac{b + ch \frac{w}{L}}{1 - b \cdot ch \frac{w}{L}} \right)^2 - 1. \quad (5)$$

У формулах (4) і (5) наведені параметри: k – постійна Больцмана; T – абсолютна температура (в K); q – заряд електрона; $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ – відношення рухомості електронів до

рухомості дірок; $L = \sqrt{D\tau}$ – біполярна дифузійна довжина; $D = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p}$ – біполярний коефіцієнт дифузії; D_n , D_p – коефіцієнти дифузії електронів і дірок, що вираховуються за формулами:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n, \quad (6)$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p. \quad (7)$$

Функція $f(w, \tau)$ залежить від температури як явно (множник $\frac{kT}{q}$), так і неявно через біполярну дифузійну довжину L .

Відомо, що рухливість, в свою чергу, залежить від температури [5]:

$$\mu_n = \mu_{no} \left(\frac{T}{T_o} \right)^{-2,5}, \quad (8)$$

$$\mu_p = \mu_{po} \left(\frac{T}{T_o} \right)^{-2,7}. \quad (9)$$

При температурі $T_o = 290$ К, $\mu_n = \mu_{no} = 0,135 \frac{M^2}{B \cdot c}$, а $\mu_p = \mu_{po} = 0,135 \frac{M^2}{B \cdot c}$.

Час життя носіїв заряду τ також залежить від температури [5]:

$$\tau = \tau_o e^{-\frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right)}, \quad (10)$$

де $\Delta E = 0,05$ дБ [5], а час життя τ_o при кімнатній температурі можна розрахувати за значенням накопиченого заряду $Q_{нк}$ (за струму I_o), що входить в систему параметрів p - i - n -діодів [7] і вказаний у паспорті:

$$Q_{нк} = I_o \tau_o. \quad (11)$$

У даному випадку час $\tau_o = 5$ мкс при температурі 298 К.

Отже, залежність σ від температури достатньо складна, але легко піддається розрахунку на комп'ютері при використанні будь-якого з математичних пакетів. Оскільки в формулу (3) входять змінні, що визначаються системою параметрів з (4), або електрофізичними характеристиками матеріалу (в даному випадку кремнію), то можна, не застосовуючи спеціальні вимірювання, визначити провідність структури p - i - n -діода (σ) і також розрахувати за формулою (2) коефіцієнт затухання хвилі у хвилеводі α , з урахуванням діодної вставки.

Знаючи α , можна розрахувати коефіцієнт передачі атенюатора K

$$K = e^{-2\alpha l}, \quad (12)$$

де l – довжина діода вздовж осі хвилеводу.

Втрати, що вносяться атенюатором, визначаються формулою

$$A = 20 \lg K. \quad (13)$$

Числові результати розрахунків

Оскільки σ залежить від температури, то і α відповідно залежить від температури.

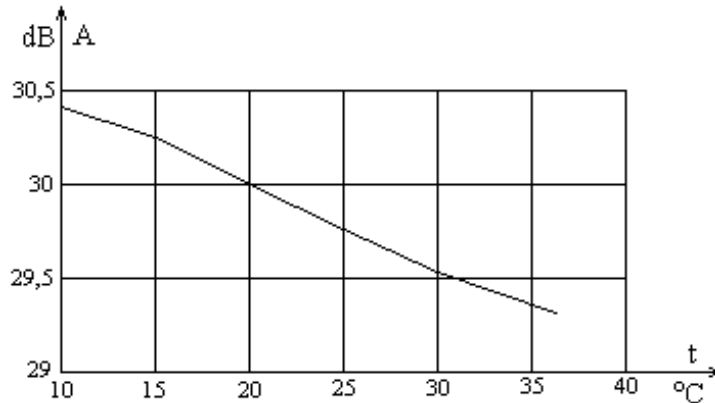


Рис. 1. Розподіл втрат атенюатора від температури

Задаючи значення струму, можна розрахувати коефіцієнт передачі атенюатора залежно від температури A_t . Для здової структури ($n-i-p-i-n$) при розрахунку σ за формулою (3) необхідно брати половину значення робочого струму ($I = 0,5 I_{\text{роб}}$).

Із отриманої залежності $K(T)$ можна визначити K_{max} та K_{min} і, використовуючи формулу (1), – δ . Аналогічно можна розрахувати залежність K від частоти.

З використанням формул (1) – (13) були проведені розрахунки втрат атенюатора М347 на розподілених $p-i-n$ -діодах залежно від температури $A(t)$ та вхідної частоти $A(f)$, результати яких наведені на рис. 1 та 2.

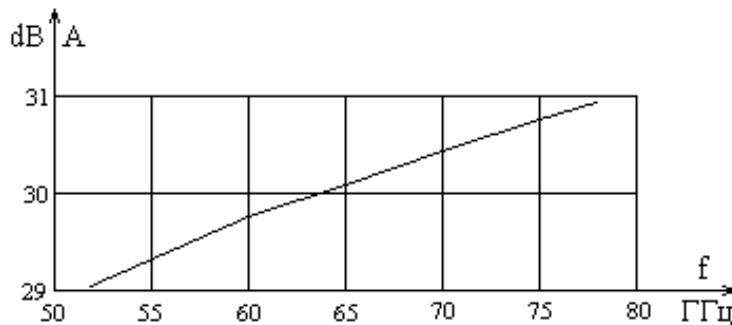


Рис. 2. Розподіл втрат атенюатора від частоти

При зміні температури від 10 до 35° $\Delta A \approx 1,15$ дБ ($\delta K \approx 0,4$ %), а при зміні частоти від 52 до 78 ГГц $\Delta A \approx 1,9$ дБ ($\delta K \approx 0,7$ %).

Висновки

1. Розглянутий метод дозволяє розрахувати вплив температури і частоти вхідного сигналу на втрати $p-i-n$ -атенюатора вхідного тракту модуляційного радіометра (або іншого приймально-вимірального пристрою), який містить у вхідному колі електрично керований атенюатор на розподіленому діоді.

2. Метод ураховує особливості конструкції атенюатора перетворювача та його типові характеристики.

3. Отримані у результаті розрахунків частотні та температурні залежності дають змогу більш точно оцінити похибки вимірювань в реальних умовах експлуатації.

1. Скрипник Ю. О., Манойлов В. П., Яненко О. П. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону. – Житомир: Вид. ЖІТІ, 2001. – 374 с. 2. Скрипник Ю.О., Перегудов С.М., Яненко О.П. Модуляційний радіометр. Патент України на винахід № 27625, G01R29/26, Бюл. № 4, 2000 р. 3. Зайцев А.Н., Иващенко П.А., Мыльников А.В. Измерение на сверхвысоких частотах и метрологическое обеспечение. – М.: Изд. стандартов, 1989. – 238 с. 4. Яненко О.П. Метрологія медичної та біологічної апаратури. – Житомир: Вид. ЖІТІ, 1998. – 158 с. 5. Дзехцер Г.Б., Орлов О.С. PIN-диоды в широкополосных устройствах. – М.: Сов. радио, 1970. – 200 с. 6. Хижа Г.С., Березовская Ж.К., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. Исследование характеристик и параметров переключаемых рpn-диодов при прямом смещении // Электронная техника: Серия “Электроника СВЧ”. – 1982. – Вып. 7. – С. 35 – 39. 7. Гусятинер М.С., Горбачев А.И. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.