

6. Турчин, П.П. Импульсные автоматизированные измерения скоростей упругих волн в кристаллах [Текст] / П.П.Турчинов, А.А. Парфенов, Н.А. Токарев, А.Е. Нестеров, А.Ю. Тарасова, К.С. Александров. Ползуновский вестник, Барнаул, № 3/1, 2011, С.143-147.
7. www.stanford.edu/class/ee133/datasheets/SA612A.pdf.
8. www.cims.bsu.by/files/B-421.pdf.

Abstract

On the basis of the echo-pulse method an automated experimental device was designed for measuring the velocity of the propagation and attenuation of the elastic waves of small amplitude in single crystals in wide temperature ranges. The method of reducing the level of excitation of ultrasonic vibrations of voltage up to 1V with simultaneous increase of sensitivity of the receiving channel by reducing the residual circuit vibration was designed. The high-frequency filling of the pulses is provided by a frequency synthesizer, which generates the electric oscillations in the range 4,5-80 MHz. The main resonance frequency for a given transducer constitutes 9.75 MHz. The measurement of the attenuation of ultrasound in crystals is carried out by the logarithmic intensifier-detector, assembled on the microcircuit AD 8310, which retains the necessary characteristics in the range of operating frequencies 0-440 MHz. The precision measurement of the change of the propagation velocities of ultrasonic waves in crystals is realized by a phase shift of the filling high-frequency oscillations between the probe and reflected pulses.

The examples of the ultrasound propagation experiment of such semiconductor materials as CdSb, Bi₂Te₃, GaSe are given

Keywords: *echo-pulse method, automated measurements, elasticity, single crystals, phase shift*

В даній роботі запропоновано спосіб, який дозволяє на етапі вхідного та вихідного контролю за рівнем низькочастотного шуму, додатково проводити оцінку шумових характеристик біполярних транзисторів в області середніх частот

Ключові слова: *біполярний транзистор, контроль, власні шуми*

В данной работе предложен способ, позволяющий на этапе входного и выходного контроля по уровню низкочастотного шума, дополнительно проводить оценку шумовых характеристик биполярных транзисторов в области средних частот

Ключевые слова: *биполярный транзистор, контроль, собственные шумы*

УДК 621.315.592

ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА В ОБЛАСТІ СЕРЕДНІХ ЧАСТОТ

Д.В. Михалевський
Старший викладач, кандидат технічних наук
Кафедра телекомунікаційних систем і телебачення
Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021
Контактний тел.: 096-303-06-02
E-mail: adotq@ukr.net

1. Вступ

При проектуванні та виготовленні нових виробів електронної техніки (ВЕТ), а також пристроїв на їх базі потрібно враховувати різні фактори: шумові параметри, електричні характеристики, вплив паразитних зв'язків, температурні характеристики і т. ін. Визначення шумових характеристик може надати певну інформацію про стан того чи іншого електронного виробу. Наприклад, ВЕТ, що використовуються у високо-

якісній приймально-передавальній апаратурі повинні мати якомога нижчий коефіцієнт власних шумів.

2. Аналіз останніх досліджень

В роботах [1,2] проводились дослідження інформативного параметра виробів електронної техніки (ВЕТ) для операцій вхідного та вихідного контролю за рівнем низькочастотного шуму, для біполярних структур.

Особливістю такого контролю є те, що інформативний параметр досліджується в обмеженій частотній області, а саме де спостерігається суттєвий прояв флікер шуму. Такі дослідження дають змогу оцінювати рівень власних шумів тільки для низькочастотної області, але як показує практика із-за недосконалості технологічних процесів існує імовірність отримання готових промислових ВЕТ із підвищеним рівнем шуму в області частот, де флікер шуми не проявляються.

3. Постановка завдання

Для підвищення ефективності вхідного та вихідного контролю за рівнем низькочастотного шуму, постає завдання додатково проводити оцінку інформативного параметра в області середніх частот, для оцінки ВЕТ із низькими шумовими характеристиками, для використання, наприклад, у високоякісних приймально-передавальних засобах передачі інформації. Це дає можливість об'єднати операції контролю напівпровідникової структури, та визначення рівня власних шумів виробів у широкому діапазоні частот.

4. Основна частина

Контроль ВЕТ за рівнем власних шумів передбачає виконання двох операцій таких як, оцінка інформативного параметра та порівняння його із наперед заданим еталоном [3].

В даному випадку це еквівалентна шумова напруга, характер прояву якої у всій частотній області можна розділити на три частини, як показано на рис. 1.

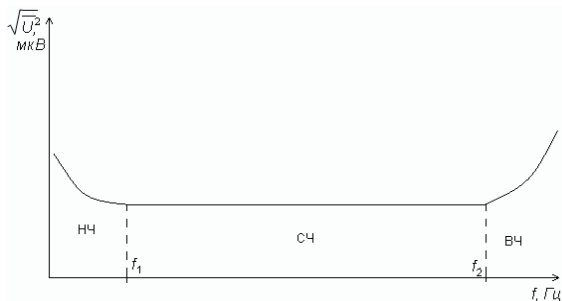


Рис. 1. Вибір шумового діапазону

Як видно із наведеного рисунку шуми на середніх частотах можна умовно виділити в діапазон (f_1, f_2). Для операцій контролю можна припустити, що для цього діапазону всі джерела шумів є незалежними, і некорельованими. Таким чином, можна виділити частотнезалежні джерела шумів, які обумовлені дробовими та тепловими шумами [4]. Розглянемо їх.

Тепловий шум – шум який виникає у будь-якому провіднику із-за наявності хаотичного руху носіїв заряду, та залежить від величини опору. Його виражають за формулою Найквіста, наступним чином

$$\overline{e^2} = 4kTr\Delta f,$$

де k – постійна Больцмана; T – температура резистора; R – опір; Δf – ширина смуги досліджуваних частот.

Інше джерело – дробовий шум. Він є постійною величиною та обумовлений флуктуаціями певного числа носіїв заряду за певний момент часу. Його можна записати так:

$$\overline{i^2} = 2qI\Delta f,$$

де q – заряд електрона; I – постійний струм через р-п перехід.

Різновидом такого виду шуму є шум струмового розподілу, який виникає від випадкового розподілу носіїв заряду при наявності двох і більше р-п-переходів у структурі ВЕТ. У випадку біполярних транзисторів це означає, що носії заряду емітерної області можуть рекомбінувати у базовій або колекторній, із певною імовірністю. Таким чином, дробовий шум поділяється на два незалежні джерела шуму емітерної області та колекторної:

$$\overline{i_e^2} = \lambda 2qI\Delta f,$$

$$\overline{i_k^2} = (1-\lambda)2qI\Delta f,$$

де λ – імовірність рекомбінації носіїв в базовій області

Враховуючи [1], еквівалентну шумову модель біполярного транзистора, для області середніх частот, можна записати так, як показано на рис. 2.

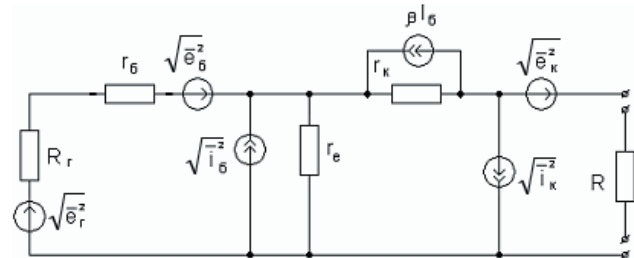


Рис. 2. Шумова модель біполярного транзистора для області середніх частот

Наведена модель містить в собі джерела $\overline{e_b^2}, \overline{e_k^2}$, які є тепловими шумами бази і колектора відповідно, що мають однакову природу, та джерела шумового струму $\overline{i_e^2}, \overline{i_k^2}$ – дробовий шум бази і колектора для транзистора із коефіцієнтом передачі по струму β .

З урахуванням [1,2] вирази для еквівалентної шумової напруги і струму на виході можна записати так:

$$\overline{e^2} = \overline{e_b^2} + \overline{i_e^2} r_1^2 + \frac{\overline{i_k^2} (r_1 + r_5 (\beta + 1))^2}{\beta^2} + \frac{\overline{e_k^2} (r_1 + r_5 (\beta + 1) + \beta r_1)^2}{\beta^2 r_k^2},$$

$$\overline{i^2} = \overline{i_e^2} + \frac{\overline{i_k^2}}{\beta^2}.$$

При оцінці інформативного параметра, для ВЕТ задають відповідний режим роботи, а також при визначенні виробів із низьким рівнем власного шуму, додатково, на вході вимірювача будуть мати місце складові теплового шуму елементів схеми зв'язки і вплив зворотніх зв'язків. Це призводить до виникнення похибки при оцінці інформативного параметра. Тому для

підвищення вірогідності контролю, для транзисторів ввімкнених за схемою спільний емітер, використовуючи підстановку математичних описів шумових джерел, середньоквадратичне значення шумової напруги на виході досліджуваної схеми можна записати так:

$$\overline{U_m^2} = 4kT\Delta f \left(\frac{R3R4^2}{A^2} + C^2 r_6 + \frac{R5R4^2R3^2}{(R5+B)^2(R3+R4)^2} + \frac{R4^3(R5+R3)^2}{(R3R5+R4(R3+R5))^2} \right) + \frac{4kTr_k\Delta f(r_6+r_e(\beta+1)+\beta r_6)^2}{\beta^2 r_k^2} + 2q\Delta f \left(C^2 I_6 r_6^2 + C^2 \frac{I_k(r_6+r_e(\beta+1))^2}{\beta^2} + I_1 A^2 + \frac{I_k A^2}{\beta^2} \right),$$

де $A = \frac{\left(R3 + \frac{R4R5}{R4+R5} \right) (R5+R4)}{R5}$, $B = \frac{R4R3}{R4+R3}$,

$$C = \frac{(R3(R4+R5)+R5(R3+R4))R4(R3+R4+R5)}{R5R3(R3+R4)(R4+R5)}$$

Як видно із наведених формул, рівень власних шумів біполярного транзистора e^2 та рівень шуму із врахуванням режиму роботи ВЕТ U_m^2 , є рівномірним і не залежить від частоти. Тому дослідимо, як змінюватиметься рівень шуму від дестабілізуючих факторів, таких як зміна струму на колекторі і базі, та зміна внутрішніх параметрів транзистора (наприклад опір бази в середньому становить 100 Ом, для малощумлячих може становити біля 10 Ом). Результати досліджень наведено на рис. 3.

Оскільки наведена на рис. 2 еквівалентна шумова модель справедлива для діапазону частот (f_1, f_2), то

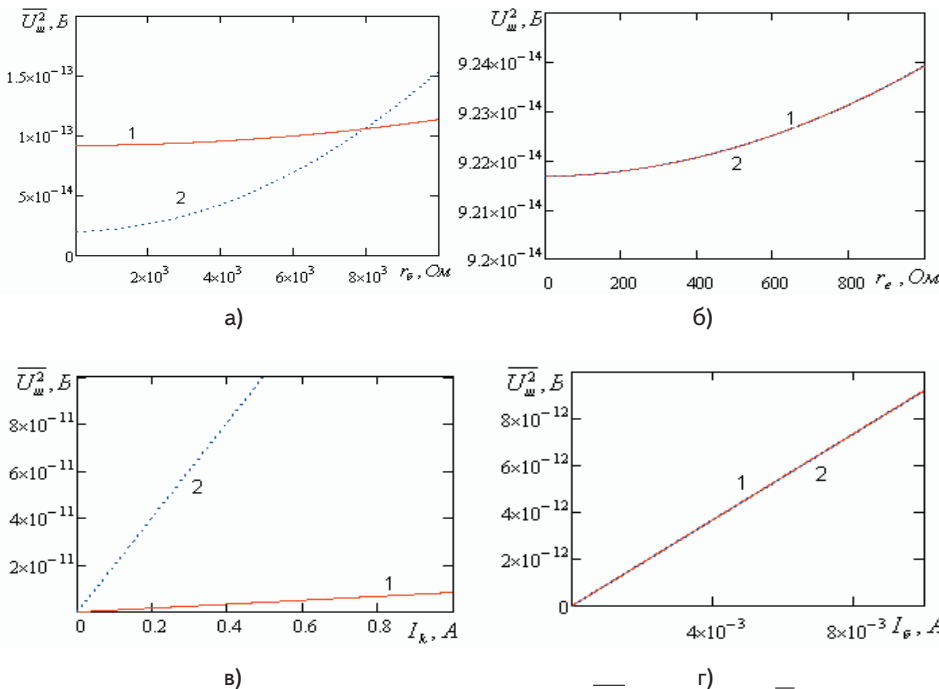


Рис. 3. Залежність еквівалентної шумової напруги (для $\overline{U_m^2}$ крива 1, для e^2 крива 2) від: а) зміни опору бази; б) зміни опору емітера; в) зміни струму колектора; г) зміни струму бази

визначимо ці границі. Як видно із рис. 1, на границі f_2 і вище починають проявлятися процеси, які пов'язані із шумовими джерелами колекторного переходу транзистора, та мають нелінійну характеристику, в результаті чого коефіцієнт підсилення транзистора зменшується. Тому верхній діапазон обмежимо частотою на якій спостерігається підвищення коефіцієнта шуму у два рази. Використовуючи формулу Нільсена [5], та виконуючи перетворення, верхню граничну частоту f_2 можна записати так:

$$f_2 = f_0 \sqrt{\frac{2K_m - 1 - r_6/R_r - r_e/2R_r - D}{D(1+\beta)}}$$

де f_0 - гранична частота роботи транзистора, K_m - коефіцієнт шуму транзистора;

$$D = \frac{(r_e + r_6 + R_r)^2}{2r_e R_r \beta}$$

Для знаходження нижньої частотної границі f_1 , припустимо, що існує точка на рис. 1, де сума частотозалежних шумових джерел $e_{f,\Sigma}^2$ є рівною сумі частотонезалежних джерел $e_{t,\Sigma}^2$. Тоді сумарний шум в даній точці становитиме:

$$\overline{e_\Sigma^2} = \overline{e_{t,\Sigma}^2} + \overline{e_{f,\Sigma}^2} = 2\overline{e_{f,\Sigma}^2} = 2\overline{e_{t,\Sigma}^2}$$

Таким чином частота на якій виникне рівність шумових напруг $e_{t,\Sigma}^2 = e_{f,\Sigma}^2$ можна вважати нижньою межею частотного діапазону даних досліджень. Для біполярних транзисторів, після проведення відповідних перетворень можна прийти до наступного виразу:

$$f_1 = \frac{K_f I_k^2 ((r_6 + r_e(\beta+1) + \beta r_6)^2 / r_k + (r_6 + r_k)^2 (\beta+1)^2 + r_6)}{4kTr_6\beta^2 + 2qI_k^2(r_6\beta(\beta+1) + (r_6 + r_e(\beta+1))^2)}$$

де K_f - коефіцієнт, який залежить від стану поверхні і характеризується сильним розкидом значень для різних пристроїв.

Проведемо дослідження отриманих виразів для f_2 та f_1 на зміну дестабілізуючих факторів таких як опір бази r_1 та коефіцієнт передачі по струму транзистора β . Дані параметри вибрані із міркувань, що найменший коефіцієнт шуму транзистора досягається при мінімальних значеннях опору бази та максимального коефіцієнта передачі по струму. На практиці виконання цих умов неможливе, тому при виготовленні біполярних транзисторів завжди вибирається компроміс. Результати досліджень наведено на рис. 4.

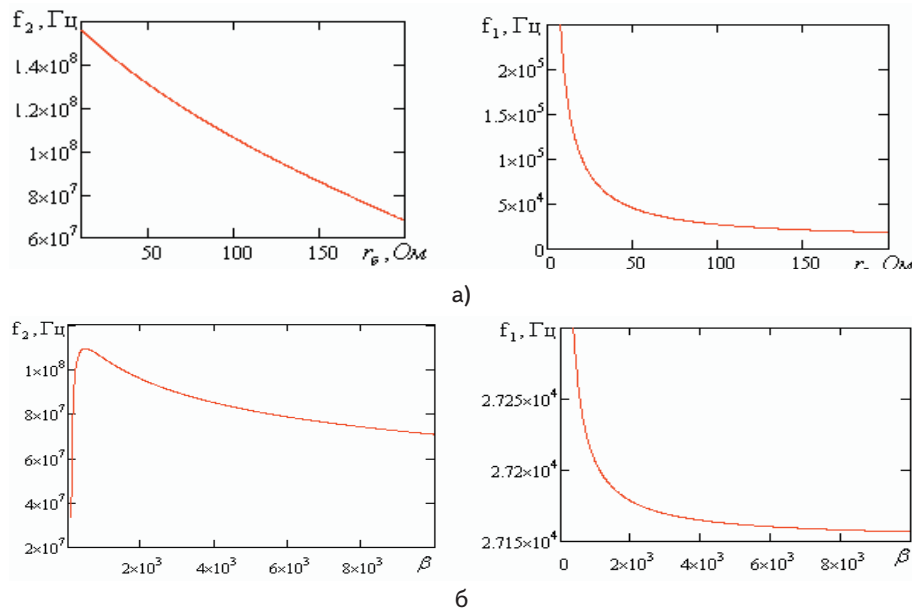


Рис. 4. Залежність зміни граничних частот f_2 та f_1 від: а) опору бази; б) коефіцієнта передачі по струму

Як видно із наведених графіків, можна сказати що, для біполярних транзисторів різних типів, досліджуванний діапазон буде відрізнятися. Найбільше це стосується

нижньої частоти f_1 , в межах яких вона є справедливою. Крім цього було досліджено вплив внутрішніх характеристик транзистора на їх зміну.

ся верхньої границі частотного діапазону f_2 . Для нижньої границі частот суттєві зміни спостерігаються тільки для низькошумлячих транзисторів.

5. Висновки

Отже в даній роботі проведено аналіз шумових характеристик біполярних транзисторів для області середніх частот, а також проведено дослідження впливу дестабілізуючих факторів, що дає змогу визначити оптимальні умови режимів роботи, для оцінки інформативного параметра, при технологічних процесах вхідного та вихідного контролю за рівнем власних шумів.

Для еквівалентної шумової моделі було визначено граничні

Література

1. Михалевський, Д.В. Оцінка якості інтегральних транзисторів за допомогою низькочастотних шумів [Текст] / Д.В.Михалевський, В.М. Кичак, В.В. Стронський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – №2. – С. 177-181.
2. Михалевський, Д.В. Математична шумова модель інтегральних операційних підсилювачів для прогнозування надійності за рівнем низькочастотного шуму [Текст] / В.М. Кичак, Д.В. Михалевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №3. – С. 102-108.
3. Денда, В. Шум как источник информации [Текст] / В. Денда. – Пер. ДДЗ с нем. – М.: Мир, 1993. – 192с.
4. Михалевський, Д.В. Метод безпосереднього прогнозування надійності виробів електронної техніки за рівнем НЧ шуму [Текст] / Д.В. Михалевський, В.М. Кичак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. – С. 196-203.
5. Жалуд, В. Шумы в полупроводниковых устройствах. Под ред. А. К. Нарышкина. Совместное советско-чешское издание [Текст] / В. Жалуд, В. Н. Кулешов. – М.: Советское радио, 1977. – 416 с.

Abstract

The article analyzes the noise characteristics of bipolar transistors for the medium-frequency range and suggests a method, which allows the additional evaluation of the characteristics of the bipolar transistors in the medium-frequency range at the stages of input and output control according to the level of the low-frequency noise.

All noise range was divided into three subranges with the division points f_1 and f_2 . The equivalent noise model, which takes into account the thermal and fractional noises, as well as the change of the transistor modes during a checkout, was suggested for the range (f_1, f_2) .

The research has shown that the studied range would vary for the bipolar transistors of different types. It concerns, particularly, the upper limit of the frequency range f_2 . For the lower limit of the frequency, the significant changes are observed only in the low-noise transistors

Keywords: bipolar transistor, control, self-noise