

Кичак В. М., Михалевський Д. В., Стронський В. В.
Вінницький національний технічний університет

ОЦІНКА ЯКОСТІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ТРАНЗИСТОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ШУМІВ

Забезпечення високої якості і надійності виробів електронної техніки (ВЕТ) потребує широкого запровадження фізико-технічних методів неруйнуючого контролю. Для їх розробки необхідно встановити залежність основних показників надійності від фізичних властивостей і параметрів приладів, від хімічних процесів, які в них протікають і від фізичної природи механізмів відмов.

Одним із перспективних напрямлень в розробці ефективних і економічно вигідних методів оцінки якості і надійності ВЕТ є дослідження можливості прогнозування їх відмов за низькочастотними шумовими характеристиками [1].

Для оцінки можливості відбракування необхідно провести теоретичну оцінку допустимого рівня шуму для потенційно ненадійного виробу, визначити оптимальний режим дослідження і діапазон частот, на яких відбракування найбільш ефективно. Як об'єкт досліджень, вибрано найбільш складний елемент інтегральних мікросхем – інтегральний п-р-п транзистор з вбудованим п+ шаром і проведено дослідження його шумових характеристик та визначені оптимальні умови, при яких доцільно проводити вимірювання для подальшого відбракування ненадійних виробів.

Головна особливість інтегрального транзистора полягає в його чотирьохшаровій структурі, при врахуванні підкладки [2]. Разом із емітерним і колекторними переходами існує паразитний перехід між колекторним п-шаром і підкладкою р-типу. Розглянемо вплив паразитного переходу на шумові властивості транзистора. Спрощена структура інтегрального транзистора показана на рис. 1.

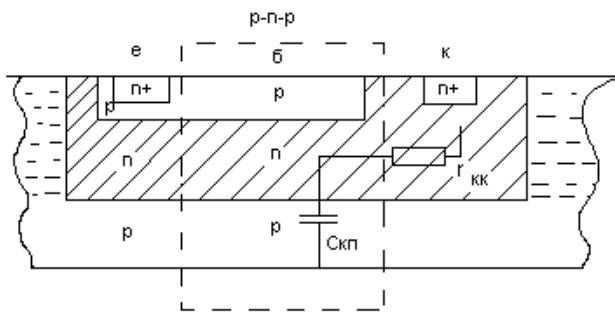


Рис. 1. Структура інтегрального транзистора

Транзистор виконаний по методу розподільної дифузії, де як ізолятор застосовується р-п перехід. Пасивна область бази представлена паразитним р-п-п транзистором. Даний транзистор створює зв'язок бази п-р-п транзистора із підкладкою погіршуючи тим самим його характеристики. Цей зв'язок може створювати власні шуми, які будуть впливати на загальну шумову картину. При цьому можливо два випадки (Рис. 2).

Перший випадок, якщо п-р-п транзистор працює в нормальному активному режимі, і паразитний транзистор знаходиться в режимі відсічки.

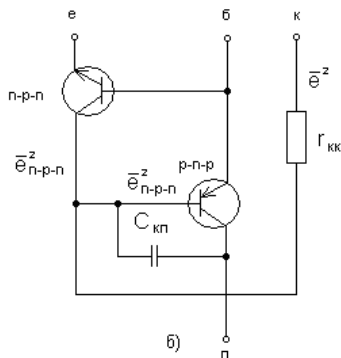
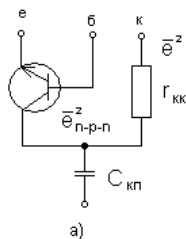


Рис. 2. Модель інтегрального транзистора

Тоді структура на рис. 1 можна замінити на модель рис. 2, а, а загальна шумова картина на виході e^2 буде визначатися власними шумами транзистора e_{n-p-n}^2 і тепловим шумом опору $r_{кк}$.

В другому випадку п-р-п транзистор працює в інверсному режимі або режимі подвійної інжекції, при цьому паразитний транзистор знаходиться в інверсному режимі (рис. 2, б). Тут на шумову картину має місце додатковий вплив шумів переходу база-емітер р-п-п транзистора e_{p-n-p}^2 . Шум на виході

$$e^2 = e_{n-p-n}^2 + e_{p-n-p}^2 + e_{r_{кк}}^2.$$

Існує ще один випадок – діелектрична ізоляція, де паразитний транзистор відсутній. Цей випадок є найпростішим і він розглядається першим. Шумова модель інтегрального транзистора для діелектричної ізоляції зображена на рис. 3.

Як видно схема являє собою шумову модель звичайного біполярного транзистора, яка доповнюється додатковими джерелами флікер і контактних шумів.

Джерела e_o^2 , e_k^2 являють собою теплові шуми бази і колектора відповідно і мають однакову природу.

$$e_o^2 = 4kTr_o\Delta f.$$

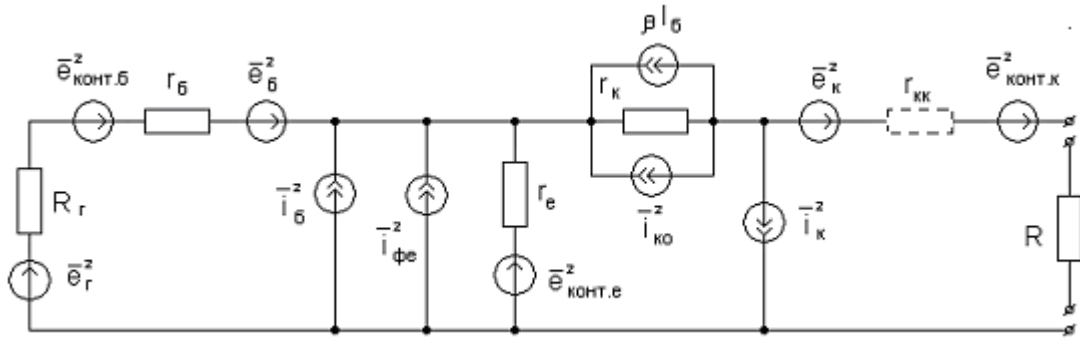


Рис. 3. Шумова модель інтегрального транзистора з діелектричною ізоляцією

Генератори $\overline{e_{конт.б}^2}$, $\overline{e_{конт.е}^2}$, $\overline{e_{конт.к}^2}$ є джерелами контактних шумів, які виникають при проходженні через дефектні області внутрішніх провідників і контактів бази, емітера та колектора та записуються відповідно:

$$\overline{e_{конт.б}^2} = K_{\delta} \frac{I_{\delta}^n}{f^a} \Delta f, \quad \overline{e_{конт.е}^2} = K_e \frac{I_e^n}{f^a} \Delta f, \quad \overline{e_{конт.к}^2} = K_k \frac{I_k^n}{f^a} \Delta f$$

де K_{δ} , K_e , K_k – коефіцієнти, які залежать від роду дефектів і матеріалу;
 n – коефіцієнт, величина якого не перевищує 2 і залежить від об'ємної і поверхневої складових струму.

Джерела шумового струму $\overline{i_{\delta}^2}$, $\overline{i_k^2}$ відображають флуктуації струмів бази і емітера:

$$\overline{i_{\delta}^2} = 4qI_e(1-\beta)\Delta f, \\ \overline{i_k^2} = 4qI_e\beta\Delta f.$$

Найбільшу зацікавленість для цього дослідження являє джерело шуму, яке виникає в області емітерного переходу, так званий 1/f-шум (флікер шум):

$$\overline{i_{\phi e}^2} = K \frac{I_{\delta}^n}{f} \Delta f$$

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

З урахуванням [3] вирази для еквівалентної шумової напруги і струму на виході можна записати так

$$\overline{e^2} = \overline{e_{\delta}^2} + \overline{i_{\delta}^2} r_{\delta}^2 + \overline{i_{\phi e}^2} r_{\delta}^2 + \frac{\overline{i_k^2} (r_{\delta} + r_e(\beta+1))^2}{\beta^2}, \quad (1)$$

$$\overline{i^2} = \overline{i_{\delta}^2} + \overline{i_{\phi e}^2} + \frac{\overline{i_k^2}}{\beta^2}. \quad (2)$$

Вирази (1) і (2) не враховують флікер шумів колектора. Цей шум на всіх частотах залишається однаковим і не залежить від колекторної напруги. Тому при аналізі інтегральних транзисторів з метою визначення критеріїв надійності ними можна нехтувати.

Враховуючи вплив контактних шумів, вираз для шумової напруги на виході має вигляд:

$$U_{ш} = (\overline{e^2} + \overline{i^2} \cdot R_z^2 + \overline{e_{Rz}^2} + \overline{e_{конт}^2}) K_u^2 \quad (3)$$

де K_u – коефіцієнт підсилення по напрузі, який визначається відношенням напруги на навантаженні до е.р.с джерела сигналу.

Підставивши вище наведені формули в (3) отримаємо

$$U_{ш} = (\overline{e_{\delta}^2} + \overline{i_{\delta}^2} r_{\delta}^2 + K \frac{I_{\delta}^n}{f} \Delta f \cdot r_{\delta}^2 + \frac{\overline{i_k^2} (r_{\delta} + r_e(\beta+1))^2}{\beta^2} + (\overline{i_{\delta}^2} + K \frac{I_{\delta}^n}{f} \Delta f + \frac{\overline{i_k^2}}{\beta^2}) R_z^2 + \overline{e_{Rz}^2} + (K_{\delta} I_{\delta}^2 + K_e I_e^2 + K_k I_k^2) \frac{\Delta f}{f}) K_u^2.$$

Із приведеного вище виразу видно що, вплив шумів емітера і контактів проявляється на низьких частотах, і зі збільшенням частоти поступово зменшується.

Розглянемо шумову модель інтегрального транзистора в активному режимі з ізоляцією р-п переходом, яка наведена на рис. 2, а. Для цього в схему на рис. 3 вводиться додатковий опір $r_{кк}$.

Як видно із рисунка паразитний опір $r_{кк}$ складається із опором навантаження R_n і може вносити власний тепловий шум. Враховуючи цей паразитний опір і за аналогією до попереднього випадку одержуємо вираз

$$\overline{e^2} = \frac{\overline{i_{нкз}^2} \cdot (R_n + r_{кк})^2}{K_{шкк}^2}, \quad (4)$$

де $K_{шкк}^2 = \frac{\beta(R_n + r_{кк})}{R_{вх}}$ - коефіцієнт передачі по напрузі при коротко замкнутому вході;

$\overline{i_{нкз}^2}$ - струм навантаження при короткому замиканні на вході;

$R_{вх} = r_o + r_e(\beta + 1)$ - вхідний опір в схемі зі спільним емітером.

Із виразу (4) випливає, що математично опір навантаження скорочується і не впливає на загальні шуми транзистора, а вираз для шумової напруги має такий же вигляд як для діелектричної ізоляції і не залежить від величини $r_{кк}$, який тільки впливає на швидкодію транзистора. Його шумовий вплив можна записати

$$U_{ш.г} = U_{ш} + 4kTr_{кк}\Delta f. \quad (5)$$

Для інверсного режиму роботи значний вплив вносить паразитний транзистор. Шумова модель для цього режиму інтегрального транзистора зображена на рис. 4.

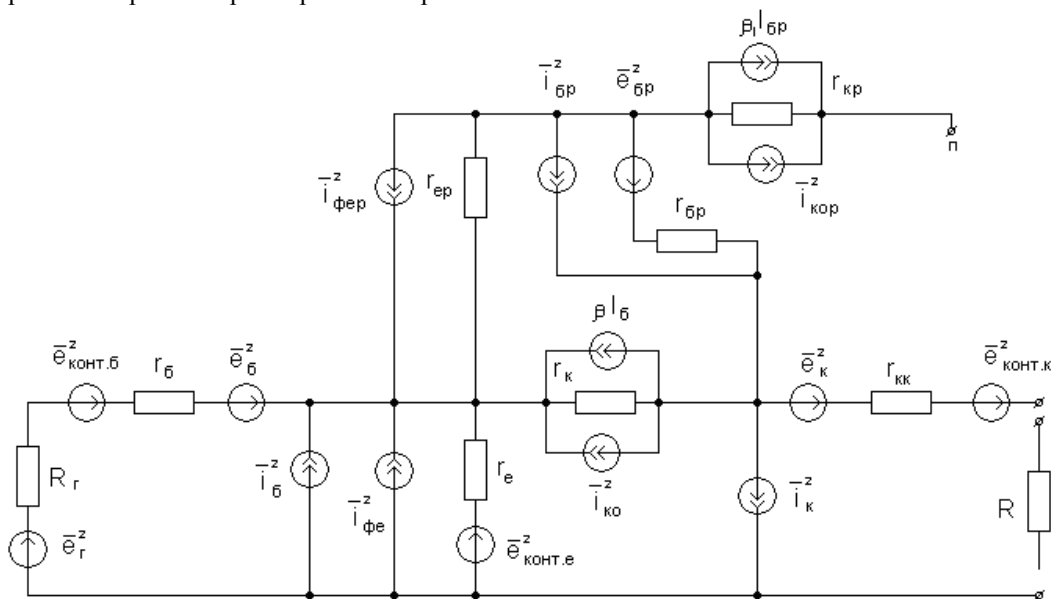


Рис. 4. Шумова модель інверсного режиму

Шуми паразитного транзистора, які виділяються на його колекторі гасяться підкладкою і тому на шумову картину інтегрального транзистора не впливають. За рахунок впливу переходу база-емітер р-п-р транзистора, в шумову модель додається ще одне джерело фліккер шуму $\overline{i_{фер}^2}$, у якому виділиться складова шуму в навантаженні

$$\overline{i_p^2} = \frac{\beta^2 \overline{i_{фер}^2} (R_c + r_o)^2}{(R_c + R_{вх})^2}.$$

Із врахуванням цього шуми на виході складуть

$$\overline{e^2} = \overline{e_o^2} + \overline{i_o^2} r_o^2 + \overline{i_{фе}^2} r_o^2 + \overline{i_{фер}^2} r_o^2 + \frac{\overline{i_{к}^2} (r_o + r_e(\beta + 1))^2}{\beta^2}, \quad (7)$$

$$\overline{i^2} = \overline{i_o^2} + \overline{i_{фе}^2} + \overline{i_{фер}^2} + \frac{\overline{i_{к}^2}}{\beta^2}. \quad (8)$$

Підставивши в вираз (3) вирази (7) і (8), а також врахувавши (5) отримаємо вираз для шумової напруги

$$U_{ш} = \left[\overline{e_o^2} + \overline{i_o^2} r_o^2 + (K I_o^n + K_p I_{op}^n) \frac{r_o \Delta f}{f} + \frac{\overline{i_k^2} (r_o + r_e (\beta + 1))^2}{\beta^2} + (\overline{i_o^2} + (K I_o^n + K_p I_{op}^n) \frac{\Delta f}{f} + \frac{\overline{i_k^2}}{\beta^2}) R_c^2 + \right. \\ \left. + \overline{e_{R_c}^2} + (K_o I_o^2 + K_e I_e^2 + K_k I_k^2) \frac{\Delta f}{f} \right] K_u + 4kTr_{kk} \Delta f + 4kTr_{op} \Delta f.$$

Останній доданок є тепловим шумом бази паразитного транзистора, який безпосередньо складається із шумом на колекторі n-p-n транзистора.

Вирази шумової напруги на виході показують що в усіх трьох випадках рівень шумів на низьких частотах залежить від рівня шуму флуктуацій емітера, а також контактних шумів. Всі інші складові шумів від частоти не залежать. Як показує вираз на рівень шумової напруги може впливати рівень базового, емітерного і колекторного струмів. На основі цих припущень проведемо дослідження реального пристрою.

Для дослідження шумових характеристик було обрано інтегральний транзистор 1НТ291Г. Найбільш ефективними параметрами для оцінки якості виробів електронної техніки є шумова напруга і шумовий струм [4]. Тому доцільніше дослідити рівень шумової напруги в діапазоні низьких частот. Результати досліджень приведені на рис. 5.

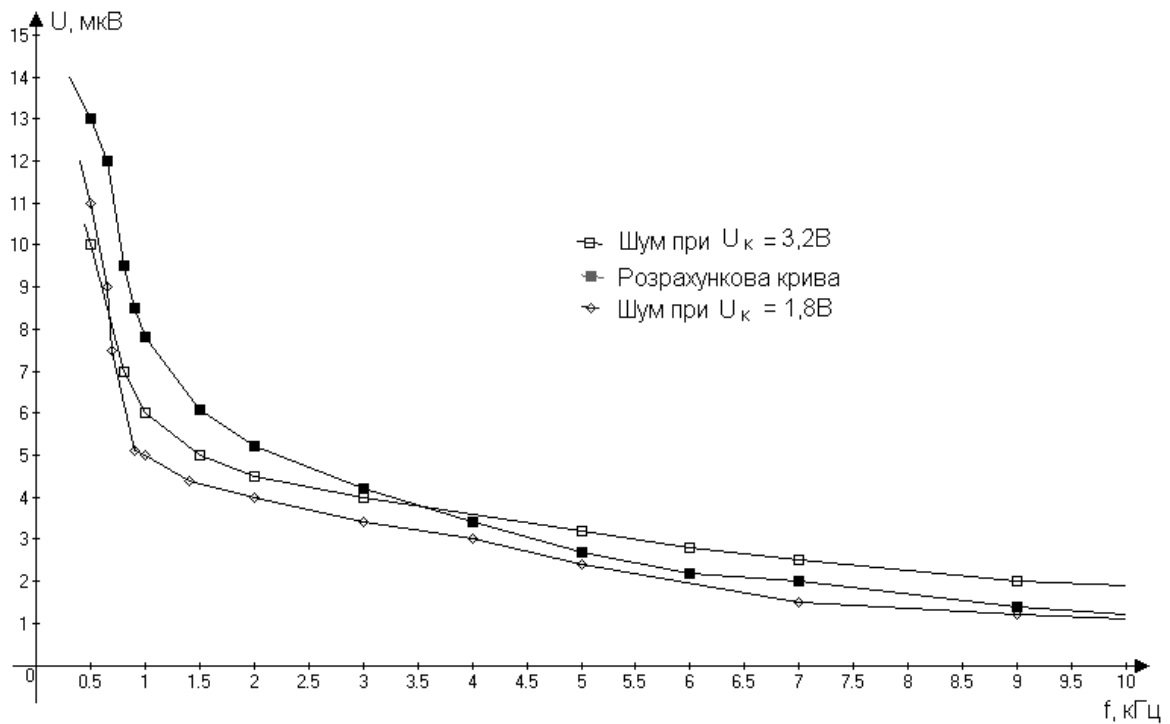


Рис. 5. Шумові характеристики

Як видно із рис. 6, на низьких частотах має місце значний шум, який збільшується при збільшенні напруги живлення. Для дослідження залежності рівня шумів від дестабілізуючих факторів, таких як зміна напруги на колекторі і емітері, задано декількома частотами: 150Гц, 2кГц і 10 кГц. Результати вимірювань показані на рис. 6 і 7.

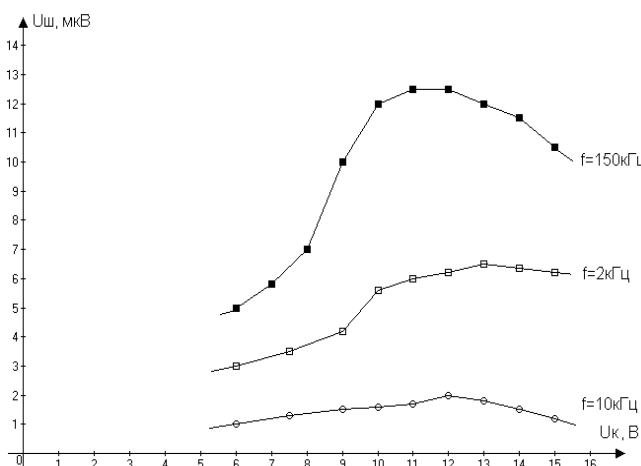


Рис. 6. Вплив напруги колектора на шуми

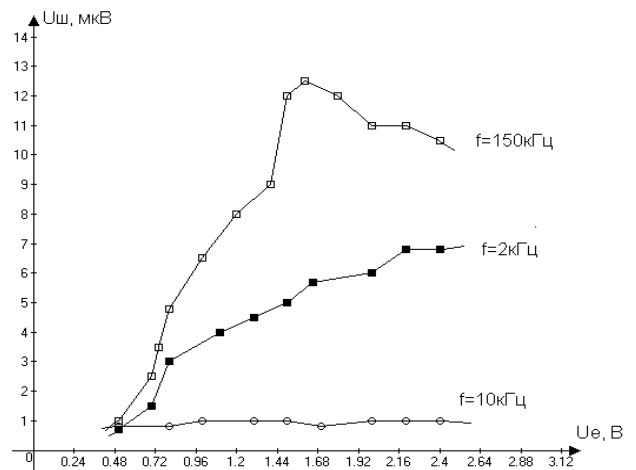


Рис. 7. Вплив напруги емітера на шуми

На цих же самих частотах досліджена залежність шумової напруги від зміни струму бази (рис. 8)

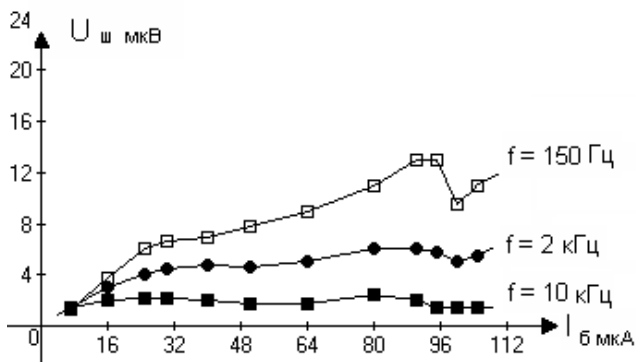


Рис. 8. Вплив рівня струму бази на шуми

На низьких частотах проявляється значний шум, який із збільшенням частоти поступово зменшується. Цей шум виявляє дефекти структури транзистора і цим визначає їх надійність. На цей шум впливає режим роботи транзистора, як це показано на графіках. При певних значеннях напруги і струму значення шумів стає максимальним. Це говорить про те що, при визначенні надійності потрібно задаватися оптимальними режимами роботи транзистора, на яких шуми найбільше себе проявляють. Дане дослідження показало, що найбільший рівень шумової напруги проявляється на частоті 150 Гц, який більший по величині більш ніж на порядок за шум на частоті 10 кГц.

Для проведення оцінки якості інтегральних транзисторів за допомогою низькочастотних шумів, на основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- 1) Аналіз виразу для шумової моделі транзистора показує, що найбільший рівень шумів має місце в інверсному режимі інтегрального транзистора. Для активного режиму паразитний опір r_{kk} вносить тільки тепловий шум, рівень якого у широкому діапазоні частот залишається сталим.
- 2) Якість транзисторів залежить від рівня шумової напруги. Якщо рівень вимірної шумової напруги для транзистора на два і більше порядків більший рівня отриманого за розрахунками, то це вказує на потенційну ненадійність виробу.

Література

1. Пряников В. С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1978. – 112 с.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: ЛБЗ, 2004. – 488 с.
3. Придорогин В. М. Шумовые свойства транзисторов на низких частотах. – М.: Энергия, 1976. – 160 с.
4. Г. Отт. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. – М.: Мир. 1979. – 320 с.