

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису

ПЕТРИЧУК МИХАЙЛО ВАСИЛЬОВИЧ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДИ НАДЛИШКОВОГО ШУМУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ

01.04.10 - фізика напівпровідників і діелектриків

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1993

AB 28.123

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників АН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Лук'янчикова Наталія Борисівна

Офіційні опоненти:

1. Доктор фізико-математичних наук, професор
Сальков Євгенія Андрійович

2. Кандидат фізико-математичних наук, доцент
Ткаченко Микола Миколайович

Провідна організація - Політехнічний інститут, Міністерство освіти України, м.Київ

Захист відбудеться "15" 10 1993 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради К 016.25.01 при Інституті фізики напівпровідників АН України (252650, м.Київ-28, Проспект Науки, 45).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Інституту фізики напівпровідників АН України, м.Київ.

Автореферат розісланий "___" _____ 1993 р.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00802390 (M)

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради

Беляев 0 €

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми. Робота присвячена дослідженню механізмів формування надлишкового шуму в напівпровідниках, причому далі мова йтиме не тільки про так званний I/f -шум, але й про надлишковий білий шум в біполярних транзисторних структурах. Такі дослідження мають велике значення як для фізики, так і для техніки напівпровідників.

Інтерес до I/f -шуму зумовлений такими обставинами. Надлишковий шум - це, в першу чергу, I/f -шум. Незважаючи на те, що він вивчається вже кілька десятиріч, природа його до кінця не встановлена. Тому одержання нових відомостей про I/f -шум і закономірностей його поведінки має особливий науковий інтерес.

Що стосується надлишкового білого шуму в транзисторах, то це явище спостерігається досить рідко і мало вивчене. Ясно, що вивчення його природи дозволить розширити існуючі уявлення про особливості флуктуаційних процесів, які протікають в транзисторних структурах.

Дослідження надлишкового шуму будь-якого типу надзвичайно важливе і з практичної точки зору. Справа в тому, що надлишковий шум - це шум, від якого в принципі можна позбавитися. Розуміння механізмів його формування дозволить знаходити ефективні шляхи зниження такого шуму і, отже, підвищення чутливості напівпровідникових приладів.

Метою роботи було встановлення фізичних механізмів формування надлишкового шуму в напівпровідникових транзисторах і резисторах шляхом розробки нових методів дослідження такого шуму, проведення комплексу необхідних для реалізації цих методів вимірювань і аналізу одержаних результатів.

Наукова новизна роботи.

1. Доведено, що в транзисторах з високим і середнім рівнем шуму переважає I/f -шум, зумовлений флуктуаціями ширини емітерного переходу внаслідок флуктуацій заповненості електронами центрів у збідненому шарі цього переходу.

2. Показано, що джерело I/f -шуму, переважаючого в транзисторах з низьким його рівнем, не тільки якісно, але й кількісно може бути описане моделлю, яка зв'язує це шум з процесами розсіяння

носіїв струму при їх дифузії через емітерну область.

3. Виявлено ефект кореляції між коефіцієнтом Хоуге α_n , що характеризує відносний рівень I/f -шуму, і часом життя носіїв струму τ в напівпровідниках, який проявляється в тому, що величина їх відношення α_n/τ зберігається практично незмінною в умовах, коли під впливом різних факторів самі ці величини істотно змінюються.

4. Показано, що виявлений в досліджених транзисторах надлишковий білий шум пояснюється модуляцією колекторного струму флуктуаціями ширини бази, причиною яких є флуктуації об'ємного заряду на рекомбінаційних центрах в емітерному переході.

Практична цінність роботи.

1. Розроблено нові методи, які дозволяють експериментально ідентифікувати шум, зумовлений флуктуаціями ширини емітерного переходу, а також доказувати відсутність зв'язку шуму, що спостерігається, з такими флуктуаціями. Методи можна використати для аналізу шуму з будь-якою формою спектру.

2. Розроблено експериментальні методи виявлення надлишкового білого шуму в біполярних транзисторах і виявлення його джерел.

3. Знайдено макроскопічні параметри, пов'язані з інтенсивностями основних джерел I/f -шуму в транзисторах, які є необхідними при розробці транзисторів з низьким рівнем шуму.

Вірогідність одержаних результатів підтверджується додержанням необхідних вимог до метрологічного забезпечення експерименту та математичної обробки результатів вимірювань, погодженістю між розробленими модельними уявленнями та отриманими експериментальними результатами, в тому числі даними інших авторів.

На захист виносяться такі положення:

1. Низькочастотний надлишковий шум, що спостерігався в досліджених зразках, за своїм рівнем і характерними особливостями є типовим для широкого класу сучасних біполярних транзисторів.

2. Існують два різні фізичні механізми формування I/f -шуму, що спостерігається в біполярних транзисторах.

Перший з цих механізмів полягає в тому, що флуктуації ширини емітерного переходу, зумовлені флуктуаціями заряду на центрах у збідненому емітерному шарі, модулюють базовий струм (його рекомбінаційну компоненту), а також товщину бази і, як наслідок, колек-

торний струм.

Другий механізм не зв'язаний з флуктуаціями заповненності центрів в емітерному переході. Є підстави допустити, що він призводить до флуктуація, які супроводжують процес розсіяння носіїв струму при їх дифузії через емітерну область з наступною рекомбінацією на емітерному контакті. Зумовлений цим механізмом I/f -шум проявляється в транзисторах з низьким рівнем шуму.

3. За допомогою розвинутого в роботі методу можна встановлювати експериментально, з яким із вказаних механізмів пов'язаний шум, що спостерігається в кожному конкретному випадку.

4. Між I/f -шумом і наявністю генераційно-рекомбінаційних процесів у напівпровіднику існує взаємозв'язок, який проявляється у вигляді кореляції між коефіцієнтом Хоуге α_n , що характеризує рівень I/f -шуму, і часом життя носіїв струму τ , і полягає в тому, що величина відношення α_n/τ залишається практично постійною в широкому діапазоні зміни обох величин.

5. Білий шум колекторного струму, виявлений в досліджених транзисторах, є надлишковим і пояснюється модуляцією колекторного струму флуктуаціями ширини бази, причина яких - флуктуації об'ємного заряду на рекомбінаційних центрах в емітерному переході.

6. Використовуючи результати проведеного в роботі аналізу температурних характеристик білого шуму в транзисторах, можна визначити, яке з можливих його джерел реалізується в кожному конкретному випадку.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались на X Міжнародній конференції по шуму в фізичних системах (Будапешт, 1989р.), на V і VI Вєсоюзних наукових конференціях "Флуктуаційні явища в фізичних системах" (Паланга, 1988 и 1991 рр.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 6 робіт.

Структура та об'єм дисертації. Робота складається із вступу та чотирьох розділів. Вона викладена на сторінках, включаючи малюнків і список літератури з найменувань.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обгрунтована актуальність теми дисертації, сформу-

льована мета роботи, вказані її новизна і практична цінність, а також приведено список наукових положень, що виносяться на захист.

В першому розділі представлено основні положення математичного опису шуму. Подано огляд теоретичних і експериментальних результатів досліджень переважно I/f -шуму в напівпровідникових однорідних резисторах і біполярних транзисторах. Приведені його властивості, а також існуючі моделі й гіпотези щодо його походження. Розглянуто шум напівпровідникових структур з потенційними бар'єрами, зокрема, біполярних транзисторів. Описані генераційно-рекомбінаційні процеси у збідненій області p - n -переходу.

Другий розділ дисертації присвячений з'ясуванню природи надлишкового I/f -шуму в біполярних транзисторах.

Досліджені зразки являли собою тестові елементи мікросхем. Кожен елемент вміщував у собі два p^+np -транзистори, один з яких мав відносно тонку ($0.4 + 0.6$ мкм) і слабше леговану ($N_A = (0.5 + 1.0) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) базу (зразки I типу), а другий - більш товсту ($0.6 + 0.9$ мкм) сильно леговану ($N_A = (0.5 + 1.0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) базу (зразки II типу). Вимірювання проводили на різних партіях структур, виготовлених або в різний час, або в різних технологічних режимах.

Шумові спектри $S_i(f)$ досліджували на частотах $f = 20$ Гц + 20 кГц при зміні в широких межах колекторного і базового струмів.

Вимірювання проводили при ввімкненні транзистора по схемі із спільним емітером. При цьому вимірювали спектри шуму колекторного струму у двох режимах роботи. В першому з них імпеданс на вході транзистора був істотно більшим, ніж його внутрішня входний імпеданс (режим холостого ходу), а в другому - значно меншим (режим короткого замикання). Помірні величини S_i для першого і другого режимів позначались відповідно як $S_i^{H_1}$ і $S_i^{H_2}$. В результаті проведеного аналізу еквівалентної шумової схеми транзистора одержано умови, в яких за допомогою помірних спектрів $S_i^{H_1}(f)$ і $S_i^{H_2}(f)$ можна знайти спектр генератора шуму базового струму $S_{\pi}(f)$ і спектр генератора шуму колекторного струму $S_{\kappa}(f)$. Показано, що при наявності таких умов поведінка величин $S_i^{H_1}$ і $S_i^{H_2}$ повинна мати ряд характерних особливостей, виявлення яких експериментальним шляхом має свідчити про виконання потрібних умов.

З'ясувалося, що для досліджуваного I/f -шуму такі умови мали місце, і це дозволило знайти характерні для нього величини S_{π} і S_{κ} . Ось що показав аналіз їх особливостей.

1. При одному і тому ж значенні базового струму i_0 величини

S_n в різних зразках можуть істотно (на 1-2 порядки) відрізнятись один від одного. При цьому в транзисторах із середнім і високим рівнем шуму для даного зразка мало місце $S_n \sim I_0^2$. Винятком були тільки транзистори з найнижчим рівнем шуму, в яких $S_n \sim I_0$.

2. Значення S_n , які спостерігалися в експерименті, співпадають з аналогічними значеннями, що приводяться іншими авторами як для шуму з $S_n \sim I_0^2$, так і для шуму з $S_n \sim I_0$. Це значить, що джерела I/f -шуму, які проявлялися в досліджених зразках, типові для біполярних транзисторів.

3. Знайдені для різних зразків значення S_k , як і значення S_n , характеризуються досить великим діапазоном величин при одному і тому ж колекторному струмові I_k . При цьому для зразків з $S_n \sim I_0^2$ аналогічна залежність має місце і для шумового генератора колекторного струму, а саме $S_k \sim I_0^2$.

4. Разом з тим істотною особливістю транзисторів з низьким рівнем шуму, в яких $S_n \sim I_0$, було те, що I/f - компонента в спектрі $S_k(f)$ була відсутня до самої низької частоти вимірювання. Це означало, що генератор I/f -шуму колекторного струму в таких транзисторах не проявлявся.

Аналіз одержаних результатів показав, що в досліджених транзисторах проявляються два різні фізичні механізми формування I/f -шуму.

При співставленні даних по діапазону величин S_n і S_k , що спостерігалися в різних транзисторах, було помічено, що величини S_k виявляються більшими саме в тих зразках, в яких спостерігаються більші значення S_n , і навпаки. Цей факт дозволив припустити, що наявність обох шумових генераторів (S_n і S_k) зумовлена однією спільною фізичною причиною, якою можуть бути, наприклад, флуктуації заселеності центрів у збідненому шарі емітерного переходу.

Дійсно, через те що такі центри обмінюються носіями струму із $c-1$ (або) v -зонами і такий обмін носить статистичний характер, подібні флуктуації завжди мають місце. Їх наслідком є флуктуації ширини W_e збідненого шару емітера, які модулюють рекомбінаційну компоненту базового струму (що означає існування генератора S_n), а також ширину нейтральної базової області w_0 , оскільки збіднення шар емітера практично повністю знаходиться в матеріалі бази. Флуктуації величини w_0 , в свою чергу, модулюють колекторний струм, що означає існування генератора S_k . Зрозуміло, що чим вищий рівень флуктуацій W_e , тим більше значення як S_n , так і S_k .

Проведений в роботі теоретичний аналіз такої моделі показав, що у випадку її реалізації на практиці вимірювані значення величин S_i^H і S_i^L повинні відповідати такому співвідношенню:

$$S_i^H(f)/S_i^L(f) = 1.3(\omega_0/W_e)^2 \quad (1)$$

Розглянута модель має передумовою рівномірний розподіл джерел шуму по площі емітерного переходу, тобто є моделлю об'ємного шуму.

Оскільки значення ω_0 відомі, а W_e можна оцінити, знаючи параметри структури і режим її роботи, співвідношення (1) легко піддається експериментальній перевірці. Виявилось, що у випадку I/f -шуму, що спостерігається в транзисторах із середнім і високим рівнем такого шуму, для яких мало місце $S_n \sim t_0^2$ і $S_k \sim t_k^2$, експериментальні значення величини S_i^H/S_i^L добре задовольняють співвідношенню (1) у всьому дослідженому інтервалі струмів як для транзисторів I типу, так і для транзисторів II типу, величини $(\omega_0/W_e)^2$ для яких розрізнялись на півтора порядки. При цьому, як і очікувалось на підставі (1), для різних зразків даного типу, які мають різні значення S_n і S_k , величини S_i^H/S_i^L були однаковими і дорівнювали величині $1.3(\omega_0/W_e)^2$. Викладене вище дозволило зробити висновок, що розглянутий I/f -шум зумовлений обговорюваним механізмом, тобто флуктуаціями числа електронів на центрах у збідненому шарі емітерного переходу.

Тут варто звернути увагу на такі обставини.

Описані результати є прямим експериментальним доказом існування об'ємного I/f -шуму, зумовленого флуктуаціями числа електронів. Це має велике значення у зв'язку з існуванням так званих N-моделі і μ -моделі I/f -шуму; остання приписує такий шум флуктуаціям рухливості носіїв струму.

В процесі описаних досліджень розроблено новий метод експериментальної ідентифікації шуму, зумовленого розглянутим вище фізичним механізмом, причому цей метод застосовний до шуму з будь-яким видом спектру. Для I/f -шуму це особливо важливо, тому що дозволяє використовувати метод, не вдаючись до пошуків причин I/f форми спектру, які до цього часу до кінця не зрозумілі.

Зрештою, можна стверджувати, що якщо експериментальні результати задовольняють нерівності

$$S_i^H(f)/S_i^L(f) > 1.3(\omega_0/W_e)^2, \quad (2)$$

то фізичний механізм формування генератора шуму базового струму S_n

відрізняється від описаного вище. Таким чином, знайдено метод, який дозволяє встановлювати відсутність зв'язку шуму базового струму з флюктуаціями об'ємного заряду в емітерному переході.

Виявилось, що у випадку I/f -шуму в транзисторах з низьким його рівнем, для яких мало місце $S_{\pi} \sim t_{\sigma}$, експериментальні значення відношення $S_i^H(f)/S_i^L(f)$ задовольняли нерівності (2). Це означало, що I/f -шум в таких транзисторах мав іншу, відмінну від тієї, що проявляється в транзисторах із середнім і високим рівнем I/f -шуму, природу. Оскільки для цього шуму $S_{\pi} \sim t_{\sigma}$, то, подаючи S_{π} у вигляді:

$$S_{\pi} = B \frac{t_{\sigma}}{f}, \quad (3)$$

можна характеризувати інтенсивність такого шуму коефіцієнтом B , який виявився рівним величині порядку 10^{-17}А .

У роботі вдалося знайти аргумент на користь того, що цей шум може знайти своє пояснення в рамках моделі Кляйнпеннінга [1]. Ця модель передбачає, що I/f -шум супроводжує процес розсіяння неосновних носіїв (в даному випадку дірок), які інжектовані в емітер і дифундують до емітерного контакту. Згідно з цією моделлю маємо:

$$S_{\pi} = \frac{\alpha_n e t_{\sigma}}{\tau f} M, \quad (4)$$

де α_n - коефіцієнт Хууге, e - заряд електрона, M - коефіцієнт порядку одиниці, τ - час життя неосновних носіїв в емітерній області, який визначається часом їх дифузії через цю область.

Із (3) і (4) випливає, що якщо розглянутий I/f -шум описується моделлю Кляйнпеннінга, то для нього повинно мати місце:

$$B = \frac{\alpha_n}{\tau} e M. \quad (5)$$

Таким чином, для з'ясування питання про застосовність цієї моделі необхідно знайти значення α_n і τ або їх відношення α_n/τ для даного випадку. Зауважимо, що величину τ можна легко оцінити за допомогою формули $\tau = W_0^2/D_0$, де W_0 - товщина нейтральної області емітера, а D_0 - коефіцієнт амбіполярної дифузії для цієї області. Що стосується величини α_n , то, як було показано вище, її значення можуть змінюватися в дуже широкому діапазоні, і нема підстав віддавати перевагу в даному випадку якому-небудь з них.

Вихід з цієї ситуації вдалося знайти на основі результатів, одержаних при вивченні згаданого ефекту кореляції між величинами α_n і τ і описаних в третьому розділі.

Отже, основними результатами другого розділу є такі.

1. Встановлено існування двох джерел I/f -шуму, типових для біполярних транзисторів, і детально досліджено їх властивості.

2. Доказано, що в транзисторах з високим і середнім рівнем шуму переважає I/f -шум, зумовлений флуктуаціями ширини емітерного переходу внаслідок флуктуацій заповненості електронами центрів у збідненому шарі цього переходу.

3. Доказано, що I/f -шум, який спостерігається в транзисторах з низьким рівнем шуму, не зв'язаний з описаними вище флуктуаціями.

4. Розроблено нові методи, які дозволяють експериментально ідентифікувати шум, зумовлений флуктуаціями ширини емітерного переходу, а також встановлювати відсутність зв'язку шуму, що спостерігається в транзисторах, з такими флуктуаціями. Ці методи придатні для шуму з будь-якою формою спектру.

Третій розділ присвячений експериментальному дослідженню характеру змін коефіцієнта Хоуге α_n в залежності від часу життя носіїв струму в напівпровіднику. Постановка цих досліджень була продиктована тим, що стали відомими факти, які свідчать про можливість існування певного взаємозв'язку між цими величинами.

Об'єктом дослідження були напівпровідникові резистори. Такий вибір зумовлений насамперед тим, що, на відміну від транзисторів і діодів, в яких із експериментальних значень S_i можна визначити тільки відношення α_n/τ (див.(4)), в резисторі величина α_n може бути виміряна безпосередньо. Дійсно, відомо, що в монополярному резисторі I/f -шум описується такою формулою (формула Хоуге):

$$\frac{S_i}{i^2} = \frac{\alpha_n}{Nf}, \quad (6)$$

де S_i - спектральна щільність струмового шуму, i - струм, який протікає через резистор, N - повне число носіїв струму в ньому. Тому, вимірявши S_i і i і визначивши N , можна легко знайти α_n .

Крім того, в резисторах можна реалізувати умови, за яких час життя носіїв струму буде визначатися різними фізичними процесами, в тому числі і подібними тим, які існують в транзисторі. Мається на увазі рекомбінація в тонкій напівпровідниковій пластині (в якій $d < L_{\text{диф}}$, де d - товщина пластини, $L_{\text{диф}}$ - довжина амбіполярної дифузії) з великою швидкістю поверхневої рекомбінації, коли час життя електронно-дірочних пар визначається часом їх дифузії до поверхні. Оскільки такі умови відносно легко забезпечити в германії, в якому $L_{\text{диф}}$ може при 300 К досягати величини в кілька міліметрів, експерименти проводили на Ge - пластинках.

Потрібно також відзначити, що напівпровідникові резисторні як об'єкт для проведення вказаних досліджень мають і ще одну важливу перевагу. Справа в тому, що, вимірюючи спектри струмового шуму не тільки в області I/f - компоненти, але й на більш високих частотах, де переважає ГР шум, можна знаходити час життя носіїв струму τ . Робиться це таким способом. Оскільки для ГР шуму $S_i \sim (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1}$; де $\omega = 2\pi f$, тобто при $f < (2\pi\tau)^{-1} = f_0$ в його спектрі спостерігається плато, в області якого $S_i \neq S_i(f)$, а при $f > f_0$ величина S_i швидко зменшується з ростом f , то значення τ знаходять за формулою $\tau = (2\pi f_0)^{-1}$; де f_0 - частота, при якій спектральна густина ГР шуму в 2 рази менша, ніж в області плато. Більше того, із спектрів ГР шуму можна за допомогою методів шумової спектроскопії знаходити параметри центрів, які визначають величину τ , а також судити про характер відповідних електронних переходів.

Таким чином, особливістю використаної методики було те, що як величини α_n , так і величини τ визначали із вимірюваних шумових спектрів. Крім того, треба відмітити, що такі вимірювання були незалежними, оскільки для визначення α_n і τ використовувались різні частини спектрів, які відповідають різним фізичним механізмам.

Ge пластини, на яких проводили вимірювання, мали товщину $d = (0.04 + 0.1)$ см і були виготовлені з матеріалу n -типу ($\rho = 40$ Ом.см). Обидві широкі грані пластини шліфували, що забезпечувало високу швидкість поверхневої рекомбінації.

Величину τ в цих експериментах змінювали або шляхом зміни температури в інтервалі $300 + 130$ К, або шляхом використання пластин різної товщини при $T = 300$ К. Оскільки в останньому випадку τ визначалося дифузією до широких граней ($\tau \approx d^2/4D_n$), то зміна d у вказаних вище межах дозволяла змінювати τ приблизно в 6 разів.

При температурних дослідженнях значення τ вдалося змінювати приблизно в 40 разів, причому в інтервалі $T = 300 + 250$ К величина τ із зменшенням температури падала, а в області $T = 250 + 130$ К - зростала. Було знайдено, що аналогічний вигляд мала і залежність $\alpha_n(T)$, так що відношення α_n/τ залишалось практично незалежним від T . Більше того, виявилось, що величини α_n/τ для різних зразків практично співпадають, змінюючись від 50 до 70 с⁻¹. Величини α_n в цих дослідках змінювалися в діапазоні $3 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-2}$.

Аналіз спектрів ГР шуму показав, що в області росту τ з збільшенням T величини τ визначаються процесами обміну електронами зони з двома рівнями з різною глибиною. Визначено їх параметри. В

області $T > 250$ К величина τ визначалась до $T \approx 265$ К об'ємною рекомбінацією, а при $T > 265$ К – дифузією до поверхні.

Таким чином, постійність величини α_n/τ в дослідженому інтервалі температур означала, що відношення α_n/τ не залежало від типу дискретного рівня, захват на який визначав величину τ , характеру процесів обміну (рекомбінація, прилипання), а також того, відбувається захват в об'ємі зразка чи на його поверхні. Іншими словами, знайдений ефект кореляції α_n і τ видається досить універсальним.

Цей ефект підтвердився результатами дослідів, проведених на зразках різної товщини d . Було виявлено, що в пластинках з різною величиною d , в яких на досліді мало місце $\tau \sim d^2$, величина α_n також була різною, змінючись в інтервалі від $1.2 \cdot 10^{-8}$ до 10^{-2} , причому із збільшенням d величина α_n лінійно зростала з відповідним ростом τ . При цьому виявилось, що їх відношення α_n/τ залишається постійним у всьому дослідженому діапазоні d і дорівнює 55 с^{-1} , тобто практично співпадає з величинами, одержаними за результатами температурних досліджень.

В роботі приведено деякі міркування на користь того, що причиною знайденої кореляції α_n з τ могло б бути те, що $1/f$ -шум супроводжує деякі процеси сильної граткової релаксації, які виникають внаслідок протікання в напівпровіднику ГР процесів.

Звернемось до результатів дослідження $1/f$ -шуму в транзисторах низьким рівнем шуму. Якщо скористатися в (5) величиною $\alpha_n/\tau = (50+70)\text{с}^{-1}$, то одержимо: $B = (0.8 \div 1.2) \cdot 10^{-17} \text{ А}$, що співпадає з експериментальними значеннями B для $1/f$ -шуму в таких транзисторах. Це дозволяє зробити висновок, що джерелом $1/f$ -шуму транзисторів з низьким його рівнем є флуктуації швидкості дифузії носіїв заряду в емітерній області.

Таким чином, в результаті досліджень, описаних у третьому розділі, вдалося:

- а) виявити ефект кореляції між величинами α_n і τ ;
- б) встановити, що в широкому діапазоні значень обох цих величин їх відношення α_n/τ залишається практично незмінним;
- в) показати, що джерело $1/f$ -шуму, який переважає в транзисторах з низьким його рівнем, не тільки якісно, але й кількісно може бути однією моделлю, яка пояснює цей шум процесами розсіяння носіїв струму при їх дифузії через емітерну область.

У четвертому розділі приведено результати дослідження природи надлишкового білого шуму колекторного струму, виявленого в дослід-

жених транзисторах [2].

Нагадаємо, що білим називається шум, спектральна густина якого не залежить від частоти, і тому в спектрі такому шуму відповідає плато. Цю компоненту надлишкового шуму спостерігали тільки в спектрах $S_v^+(f)$, до того ж відповідне плато у випадку транзисторів з високим і середнім рівнем I/f -шуму проявлялось при $f > 1$ кГц, а у випадку транзисторів з низьким рівнем I/f -шуму, в яких I/f -компонента в спектрах $S_v^+(f)$ була відсутня, це плато спостерігали вже при найнижчих частотах вимірювання, тобто при $f \approx 20$ Гц. Для всіх досліджених структур це плато простягалось до самих високих частот вимірювання, тобто до 100 кГц.

Важливою особливістю даного білого шуму було те, що значення S_v^+/I_k^2 були більшими в транзисторах першого типу, тобто з ростом величини W_e/w_0 відносна інтенсивність шуму збільшувалась.

Показано, що про надлишковий характер розглянутого білого шуму свідчить не тільки те, що його спектральна густина в кілька разів перевищує рівень шуму, зумовленого тепловим шумом опору бази і дробовими флуктуаціями базового і колекторного струму, але і той факт, що поведінка температурних і струмових характеристик цього шуму протирічить його зв'язку з будь-яким із перерахованих тривіальних джерел білого шуму. Дійсно, було знайдено, що в діапазоні температур (200+350)К величина S_v^+/I_k^2 , виміряна при $t_0(T) = \text{const}$, не залежала від температури. Разом з тим у випадку, коли значення I_k і t_0 змінювали шляхом зміни напруги на емітерному переході при $T = 300$ К, величина S_v^+/I_k^2 змінювалась, причому мало місце $S_v^+/I_k^2 \sim t_0^{-0.3-0.5}$. Проведений в роботі аналіз показав, що ні теплові, ні дробові флуктуації таких залежностей дати не можуть.

Розглянуто такі можливі механізми формування білого шуму:

- 1) флуктуації базового струму, які навіть в режимі короткого замикання можуть передаватися в колекторне коло;
- 2) флуктуації провідності базового опору;
- 3) шум нейтральної емітерної області і емітерного контакту;
- 4) флуктуації провідності нейтральної області колектора і контакту до нього;
- 5) теплові флуктуації в базовому опорі в умовах, коли $r_0 > 2kT/eI_0$, де r_0 - опір бази [3];
- 6) ГР флуктуації заповненості електронами центрів у збідненому шарі колекторного переходу;
- 7) аналогічні флуктуації у збідненому шарі емітерного переходу.

Показано, що у першому випадку надлишковий білий шум повинен спостерігатися не тільки в режимі короткого замикання, але і в режимі холостого ходу, що не співпадає з експериментом. Для другого механізму величина S_{τ}^L/t_{κ}^2 повинна була б не зменшуватися з ростом t_{σ} , як було в експерименті, а зростати; в третьому ж і шостому випадках ця величина взагалі не повинна була б залежати ні від t_{σ} , ні від ω_{σ} , ні від N_{σ} , що суперечить експериментальним результатам.

Що стосується четвертого механізму, то, як показали вимірювання шуму прямозмещеного колекторного переходу, його спектральна густина в цій же області струмів виявилась набагато меншою за величину S_{τ}^L . Це свідчить про незначну роль і цього механізму.

Оскільки на практиці виконувалась умова $r_{\sigma} < 2kT/e t_{\sigma}$, то зрозуміло, що джерелом даного надлишкового шуму не міг бути і п'ятий із наведених вище механізмів.

Разом з тим в роботі показано, що ГР флуктуації електронного заповнення центрів в емітерному переході (див. п.7) є досить реальною причиною розглянутого шуму.

Прованалізовано два можливих джерела таких флуктуацій. Перший зумовлюється процесом рекомбінації на центрах, тобто їх обміном з обома зонами (так званія рекомбінаційний шум). Другий - обміном центрів тільки з с-зоною або тільки з u-зоною (шум прилипання). В процесі такого аналізу дослідили теоретично і порівняли з експериментом температурні і струмові залежності величини S_{τ}^L/t_{κ}^2 , при цьому теоретичні дослідження проводили на основі приведених в [4] результатів розгляду шуму обох типів. При цьому запропоновано і реалізовано метод, за допомогою якого можна знаходити необхідні для такого порівняння температурні залежності рекомбінаційної компоненти базового струму і висоти потенціального бар'єру емітерного переходу, які реалізувалися в експериментальних умовах, тобто при $t_{\sigma}(T) = \text{const}$, із поміряної в цих умовах температурної залежності колекторного струму $i_{\kappa}(T)$.

В результаті було знайдено, що особливості шумових характеристик, які спостерігалися експериментально, знаходять своє пояснення в рамках моделі рекомбінаційного шуму, до того ж для рекомбінаційних центрів повинно мати місце: $\sigma_n \sigma_p \sim T^{-\gamma}$, де $\gamma = 2.5 + 3.5$, що цілком реально, наприклад, для золота в кремнії. В той же час виявилось, що флуктуації заряду на центрах прилипання не можуть привести до таких особливостей шумових характеристик.

Таким чином, надлишковий білий шум колекторного струму знахо-

дять своє пояснення в рамках моделі, описаної у другому розділі.

В роботі показано, що відсутність відповідного надлишкового шуму в спектрі S_i^H не суперечить зробленому висновку. Дійсно, величини S_i^H , підраховані за допомогою (2) по вимірних значеннях S_i^L для розглянутого білого шуму, виявилися значно нижчими за рівень S_i^H , зумовлений дробовим шумом базового струму, який і спостерігався на практиці. Саме тому було неможливим використовувати метод, запропонований у другому розділі, для підтвердження зробленого вище висновку про природу розглянутого білого шуму.

Отже, в четвертому розділі показано, що білий шум, який спостерігається в колекторному струмі досліджених транзисторів, є надлишковим і зумовлений модуляцією колекторного струму флуктуаціями ширини бази, причиною яких є флуктуації об'ємного заряду на рекомбінаційних центрах в емітерному переході. Крім того, знайдено особливості температурних і струмових характеристик надлишкового білого шуму транзисторної структури для різних можливих його джерел, що може бути використано для ідентифікації відповідних механізмів формування такого шуму. Запропоновано також оригінальний метод визначення температурних залежностей ряду нешумових параметрів транзисторної структури.

ВИСНОВКИ

У загальному вигляді основні результати роботи такі:

1. Існують, щонайменше, два різні фізичні механізми формування надлишкового шуму, що спостерігається в біполярних транзисторах. Перший із цих механізмів зумовлений флуктуаціями заряду на центрах у збідненому емітерному шарі і може призвести до існування як I/f , так і білого надлишкового шуму.

Другий механізм не зв'язаний з такими флуктуаціями. Є підстави допустити, що він призводить до флуктуацій, які супроводжують розсіяння носіїв струму при їх дифузії через емітерну область. Зумовлений цим механізмом I/f -шум проявляється в транзисторах з низьким його рівнем.

2. Виявлено ефект кореляції між коефіцієнтом Хоуге α_H , який характеризує відносний рівень I/f -шуму, і часом життя носіїв струму τ в напівпровідниках, який проявляється в тому, що величина $\alpha_H \tau$ відношення α_H/τ зберігається практично незмінною в умовах, коли під впливом різних факторів самі ці величини істотно змінюються.

3. Розроблення в роботі метод дозволяє встановлювати експериментально, з яким із вказаних механізмів формування надлишкового шуму в біполярних транзисторах пов'язаний шум, що спостерігається в кожному конкретному випадку.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО В РОБОТАХ:

1. Тез. докл. V Всесоюзн. конф. "Флуктуационные явления в физических системах". Вильнюс. 1988. с.141-143.
2. Lukuanchikova N.B., Garbar N.P., Petrichuk M.V., Sasciuk A.P. in: 10th International conference on noise in physical systems. Abstracts (Budapest, 1989). P.269-270.
3. N.B.Lukuanchikova, M.V.Petrichuk, N.P.Garbar, A.P.Sasciuk and D.I.Kropman. $1/f$ -Noise and generation-recombination processes at discrete levels in semiconductors. Physica B. 1990. 167. P.201- 207.
4. Лукьянчикова Н.Б., Гарбар Н.П., Петричук М.В., Кропман Д.И. Исследование механизмов формирования $1/f$ -шума в р-п-переходах. ФТП. 1990, 24. №9. с.1659-1667.
5. N.Lukuanchikova, N.Garbar, M.Petrichuk. Study of the nature of excess white noise in bipolar junction transistors. Proc. of the 6th Sci. Conf. on Fluctuation Phenomena in Physical Systems. Palanga, Lithuania. 1991. P.145-149.
6. N.B.Lukuanchikova, N.P.Garbar and M.V.Petrichuk. Excess white noise in bipolar junction transistors. Sol. St. Electron. 1992. 35. No.8. P.1179-1184.

ЛІТЕРАТУРА

1. T.G.M.Kleinpenning. $1/f$ noise in p-n junction diodes. J. Vac. Sci. Technol. A3(1), Jan/Feb 1985. P.176-182.
2. Лукьянчикова Н.Б., Гарбар Н.П., Партыка М.В. и др. Радиотехника и электроника. 1988. 33. №2. с.400-408.
3. Hauser J.R. IEEE Trans. Electron. Dev. 1964. ED-11. No.5. P.238-242.
4. Н.Б.Лукьянчикова. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: "Радио и связь". 1990. 296с.

463624

AB 28.123

AB 28.123