

І.М. ВІКУЛІН, Л.Ф. ВІКУЛІНА, П.Ю. МАРКОЛЕНКО, О.А. НАЗАРЕНКО

ТЕРМОЧУТЛИВІ ГЕНЕРАТОРИ НА ОСНОВІ ОДНОПЕРЕХІДНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Експериментально досліджено вплив температури на характеристики генераторів на основі одноперехідного транзистора (ОПТ). Показано, що при використанні генератора на ОПТ в якості датчика з частотним виходом, для підвищення залежності частоти від температури в коло емітера ОПТ та бази вводяться польові транзистори. Для отримання прямої залежності частоти від температури коло емітера ОПТ вводиться польовий МДН-транзистор, а для отримання зворотної залежності польовий транзистор з $p-n$ переходом в якості затвора. Максимальна чутливість з прямою залежністю досягається при включенні в коло емітера ОПТ МДН-транзистора, а в коло бази, транзистора з $p-n$ переходом. Досліджено вплив радіації на термочутливість генераторів. Складові транзистори опромінювалися потоком електронів, γ -квантів і нейтронів. Встановлено, що опромінення кожного транзистора по-різному впливає на вихідну частоту генератора, вона або зменшується, або збільшується. Показано, що використовуючи схему генератора транзистори з протилежним знаком зміни частоти генератора при радіації, можна зменшувати залежність вихідної частоти від радіації. Максимальна компенсація дії радіації на вихідний сигнал може бути отримана при використанні МДН транзистора в колі емітера ОПТ, а транзистора з $p-n$ переходом в колі бази. Встановлено граничні величини потоків різних випромінювань, після яких генератор перестає працювати.

Ключові слова: одноперехідний транзистор, польовий транзистор, пряма і зворотна залежність частоти датчика від температури

The effect of temperature on the characteristics of generators based on a single-junction transistor (SNT) was experimentally investigated. It is shown that when using an OPT generator as a sensor with a frequency output, field-effect transistors are inserted into the circuit of the OPT emitter and base to increase the dependence of the frequency on the temperature. To obtain a direct dependence of the frequency on the temperature, a field-effect MDN transistor is introduced into the emitter circuit of the OPT, and to obtain an inverse dependence, a field-effect transistor with a p-n junction is used as a gate. The maximum sensitivity with a direct dependence is achieved when an MDN transistor is included in the emitter circuit of the OPT, and a transistor with a p-n junction is included in the base circuit. The influence of radiation on the thermal sensitivity of generators was studied. The component transistors were irradiated with a stream of electrons, γ -quanta and neutrons. It was established that the irradiation of each transistor affects the output frequency of the generator differently, it either decreases or increases. It is shown that using transistors with the opposite sign of the generator frequency change during radiation, it is possible to reduce the dependence of the output frequency on radiation. The maximum compensation of the effect of radiation on the output signal can be obtained when using an MDN transistor in the emitter circuit of the OPT, and a transistor with a p-n junction in the base circuit. Limit values of flows of various radiations, after which the generator stops working, have been established.

Keywords: single-junction transistor, field-effect transistor, direct and inverse dependence of sensor frequency on temperature

Перетворення сигналу з датчика в ряд послідовних імпульсів, частота яких залежить від рівня вимірюваного впливу, є оптимальним для обробки інформації на ЕОМ. Частотно-модульований сигнал зручний для прямого підключення мікропроцесорних систем, оскільки не вимагає аналого-цифрового перетворення. Це дозволяє створювати радіовимірювальні перетворювачі за стандартною інтегральною технологією і дає можливість підвищити швидкість дії, точність і чутливість, розширити діапазон величин, що вимірюються, підвищити надійність, перешкодостійкість і довготривалу стабільність параметрів.

Найбільш перспективними датчиками з частотним виходом є датчики з використанням релаксаційного генератора на одноперехідному транзисторі (ОПТ) [1].

Схема генератора і структура ОПТ показана на рис. 1.

Принцип його дії досить простий. Після включення джерела живлення з ЕРС E , частина її падає на опорі нижньої частини бази r_B та потенціал бази навпроти емітера дорівнює U_B , а напруга на конденсаторі емітера дорівнює нулю і $p-n$ перехід включений у зворотному напрямку.

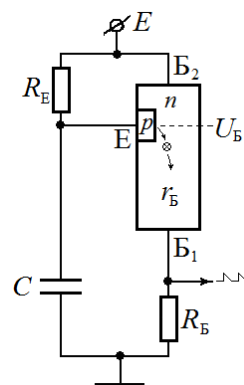


Рис. 1. Схема генератора на ОПТ та його структура.

Конденсатор починає заряджатися через опір R_E . Як тільки напруга U_E перевищить U_B , $p-n$ перехід буде включений у зворотному напрямку та почне інжектувати в базу дірки, які заливають нижню частину бази та r_B зменшується. Це зменшує U_B і ще сильніше збільшує напругу на $p-n$ переході. Такий лавиноподібний процес призводить до розрядки конденсатора, потім процес повторюється. Вихідний імпульсний сигнал знімається з резистора R_{B1} . Період коливань практично дорівнює часу зарядки конденсатора, тому частота

$$f \approx \frac{I_E}{C(U_B - U_3)}, \quad (1)$$

де C — ємність конденсатора; I_E — струм емітера; U_B — напруга включення емітера, U_3 — залишкова

напруга на базі у включеному стані при максимальному зменшенні її опору до $r_{Б1}$ (мінімальний опір при інжекції). Відповідно, $U_{Б} = I_{Б}r_{Б0}$ і $U_{О} = I_{Б}r_{Б1}$, де $r_{Б0}$ — вихідний опір бази до інжекції носіїв заряду з емітера. Тоді рівняння (1) можна записати у вигляді

$$f \approx \frac{I_{Е}}{CI_{Б}(r_{Б0} - r_{Б1})}. \quad (2)$$

Термочутливість такого датчика визначається залежністю різниці $r_{Б0} - r_{Б1}$ від температури, а вона досить мала, та чутливість слабка.

Для збільшення термочутливості можна замість резистора R_E у базу ввести польовий транзистор (ПТ) у двополосному включенні (затвор замкнутий з витоком). Такі ПТ з $p-n$ переходом в якості затвора ПТ1 та МДН-типу ПТ2 виконують функції генераторів струму (струм не залежить від напруги). Вони мають протилежну залежність струму від температури.

Струм насичення через ПТ у двополосному включенні [2] визначається як

$$I_S = \chi \mu n^2, \quad (3)$$

де μ , n — рухливість та концентрація основних носіїв струму в каналі відповідно; χ — постійна, яка не залежить від температури і визначається геометричними розмірами польового транзистора. У напівпровіднику n типу концентрація електронів $n = n_i + n_n$, де n_i , n_n — концентрації власних та домішкових носіїв заряду відповідно. Концентрація носіїв заряду домішки в ПТ1 є великою в порівнянні з власною концентрацією, тому $n \approx n_n$ практично не залежить від температури. Рухливість μ зі зростанням температури зменшується внаслідок збільшення кількості зіткнень носіїв заряду з атомами, що визначає зменшення струму (3) зі зростанням температури.

Експериментально досліджувалися генератори на основі промислових ОПТ типу КТ117Г з ПТ1 типу 2П202 в колі емітера (рис. 2,а) та конденсатором ємністю 6,8 пФ. Залежність частоти від температури для датчиків показаних на рис.2, наведено на рис. 3. При збільшенні температури від 0°C до 100°C частота лінійно зменшувалася від 14 до 3 кГц (рис. 3), що відповідає формулі (2), де I_E — струм через ПТ1. Чутливість такого датчика становить 100-120 Гц/град.

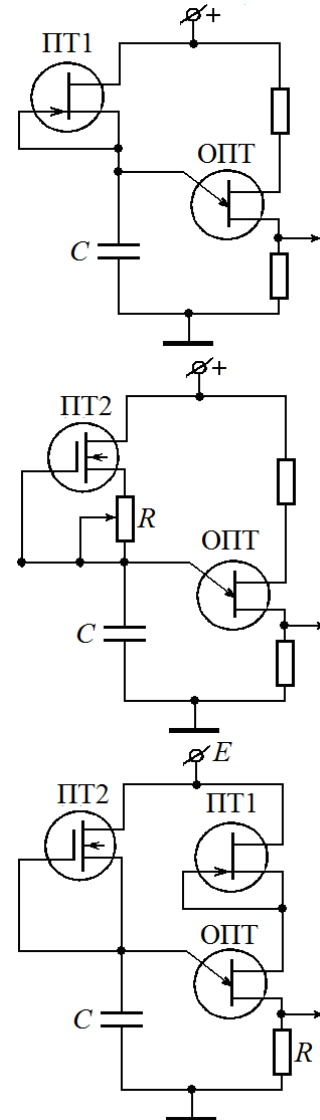


Рис. 2. Схеми датчиків з оберненою (а) та прямою (б, в) залежністю частоти від температури.

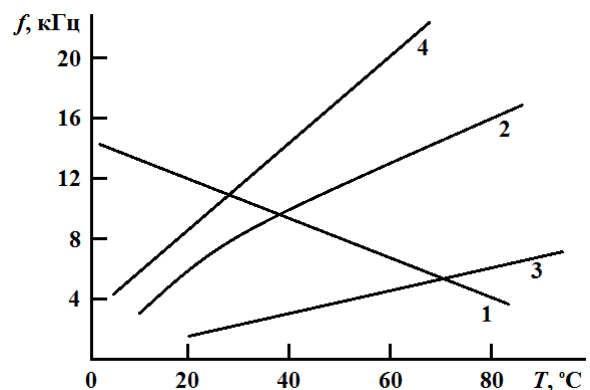


Рис. 3. Залежність частоти від температури для датчика: 1 — на рис. 2,а; 2 — $R = 0\text{ Ом}$, 3 — $R = 400\text{ Ом}$ на рис. 2,б; 4 — на рис. 2,в.

На практиці частіше використовуються датчики зі збільшенням частоти при зростанні температури. У таких датчиках в колі емітера ОПТ

включений ПТ2 МДН-типу (рис. 2,б). Такі транзистори виготовляються з урахуванням напівпровідників з низькою концентрацією домішки. Тому зростання концентрації власних носіїв зі збільшенням температури забезпечує зростання струму (3), та як наслідок призводить до збільшення частоти (2). Рухливість носіїв при цьому зменшується так само як і в ПТ1 але меншою мірою, ніж концентрація. В експериментальних датчиках цього типу (рис. 2,б) використовувалися МДН-транзистори КП305А. Термочутливість датчика при такому ж самому конденсаторі становила 100-200 Гц/град, але залежність $f(T)$ вже не лінійна (рис. 3, крива 2). Для досягнення лінійності в коло між затвором і витоком вводиться резистор, за допомогою якого можна поліпшити лінійність, але чутливість при цьому знижується. Для збільшення чутливості в коло бази ОПТ включається ПТ1 з $p-n$ переходом в якості затвора (рис. 2,в), струм через який зі зростанням температури зменшується (I_B у формулі (2)), що призводить до додаткового зростання частоти та поліпшення лінійності залежності $f(T)$ (лінія 4 на рисунку 3)

Оскільки датчики температури використовуються в умовах радіаційного опромінення, необхідно розглянути вплив радіації на їх параметри.

Для вивчення впливу радіації на характеристики датчиків складові транзистори опромінювалися потоком електронів з енергією 5 MeV, γ -квантами з енергією 1 MeV та потоком нейтронів з енергією 1,1 MeV.

Дія випромінювання на ОПТ складається з впливу на $p-n$ перехід емітера та опір бази r_B тому найбільш чутливим до радіації параметром є остаточна напруга на $p-n$ переході емітера у включеному стані $U_0 \sim I_E r_B$.

Під дією радіації опір r_B зростає як за рахунок зменшення концентрації основних носіїв (рис. 4), так і за рахунок зменшення концентрації носіїв заряду, що інжектовані $p-n$ переходом. Останнє пов'язано з тим, що, по-перше, при дії радіації в $p-n$ переході емітера виникають дефекти, що шунтують, зменшують коефіцієнт інжекції, і, по-друге, зменшується час життя інжектованих носіїв в базі, що призводить до зменшення глибини їхнього проникнення в базу. Всі ці ефекти призводять до зростання U_0 .

Збільшення U_0 під дією радіації призводить до зменшення ділянки з від'ємним диференціальним опором на ВАХ ($U_B - U_0$) та зростанню частоти генерації (1).

Так, наприклад, частота звичайного генератора на ОПТ (з резистором в колі емітера) після опромінення потоком електронів $\Phi_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ з енергією 4 MeV збільшувалася з 350 Гц до 1,8 кГц при температурі 295 K, а термочутливість зростала від 4,8 Гц/град до 29,5 Гц/град. При подальшого росту - величини потоку, величина ($U_B - U_0$) зменшується

настільки, що генерація не виникає.

На рис. 4 показано дію потоку електронів на відношення струму насичення польового транзистора з $p-n$ переходом $I_{S\Phi}$ до струму до опромінення I_{S0} . Як відомо [4], опромінення призводить до утворення дефектів у кристалічній структурі напівпровідника, що призводять до зменшення рухливості та концентрації носіїв заряду в каналі, а отже, і зменшенню струму насичення ПТ1.

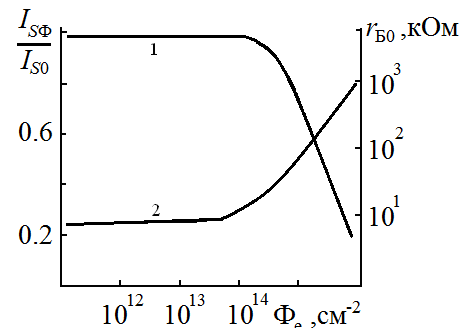


Рис. 4. Вплив потоку електронів на струм насичення ПТ з $p-n$ переходом (1) та міжбазовий опір ОПТ (2).

Це призводить до зменшення частоти датчика на рис. 2,а, де ПТ1 включений в коло емітера ОПТ. Таким чином, ПТ1 частково компенсує дію радіації на вихідну частоту датчика на ОПТ, тобто послаблює дію радіації.

У МДН-транзисторах опромінення призводить до утворення в діелектрику електронно-діркових пар. Більш швидкі електрони йдуть або в метал затвора, або в напівпровідник (залежно від полярності напруги на затворі), а дірки частково захоплюються ловушками в діелектрику і утворюють позитивний заряд. Цей заряд збільшує концентрацію електронів у n -каналі, а опромінення безпосередньо самого каналу зменшує її. Таким чином, залежно від співвідношення цих двох ефектів, при потоках менше 10^{14} см^{-2} струм I_S при опроміненні може в невеликих межах як зменшуватися, так і збільшуватися. Однак, при великих потоках спостерігається його однозначне зменшення подібно до залежності на рис. 4. Аналогічне зменшення відбувається і при опроміненні γ -квантами та нейтронами. При цьому потоку електронів 10^{14} см^{-2} відповідає потік нейтронів 10^{13} см^{-2} або γ -випромінювання дозою 10^5 Р .

У схемі з двома ПТ (рис. 2, в) при опроміненні одночасно зі зменшенням знаменника (2) зменшується і чисельник (струм I_S) та відхилення - частоти після радіаційного впливу менше. Гранична величина потоку опромінення, після якого генератор перестав працювати (визначається ОПТ), не змінюється. Необхідно визначити, що усі транзистори сенсора перебували у стандартних металевих корпусах. При використанні безкорпусних

транзисторів граничні потоки зменшуються.

Таким чином, використання у схемі термочутливого генератора на ОПТ польових транзисторів дозволяє не лише покращити метрологічні характеристики датчика температури, а й підвищити радіаційну стійкість.

Список літератури

1. Шаратов В.М., Поліщук Е.С., Гуржій А.Н. та ін Датчики. Черкаси : Брама-Україна, 2008. – 1072 с.
2. Вікулін І.М., Вікуліна Л.Ф., Горбачов В.Е. Термостабільний радіаційностійкий генератор опорного струму на базі польових транзисторів. Изв . вузів, Радіоелектроніка, 2021, т.64 №6, с.862-374.
3. Находкін М.Г., Сізов Ф.Ф. Елементи функціональної

електроніки . К.: ВПФ УкрІНТЕІ , 2002. – 324 с.

4. Вікулін І.М., Горбачов В.Е., Назаренко А.А. Радіаційно чутливий детектор на основі польових транзисторів. Изв . вузів, Радіоелектроніка, 2017, т.60 №9, с. 515-520.

References (transliterated)

1. Sharapov V.M., Polishchuk E.S., Hurzhii A.N. ta in Datchyky. Cherkasy : Brama-Ukraina, 2008. – 1072 s.
2. Vikulin I.M., Vikulina L.F., Horbachov V.E. Termostabilnyi radiatsiionostiikiy henerator opornoho strumu na bazi polovykh tranzystoriv. Yzv . vuziv, Radioelektronika, 2021, t.64 №6, s.862-374.
3. Nakhodkin M.H., Sizov F.F. Elementy funktsionalnoi elektroniky . K.: VPF UkrINTEI , 2002. – 324 s.
4. Vikulin I.M., Horbachov V.E., Nazarenko A.A. Radiatsiino chutlyvyi detektor na osnovi polovykh tranzystoriv. Yzv . vuziv, Radioelektronika, 2017, t.60 №9, s. 515-520.

Відомості про автора / About the Author

Вікулін Іван Михайлович (Vikulin Ivan Mykhailovych) – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики та наноматеріалів Одеського державного університету інтелектуальних технологій та зв'язку – Одеса-65059, вул. Малиновського 1/1 , кв. 120, тел. 0674845088, lepole1@gmail.com

Вікуліна Лідія Федорівна (Vikulina Lidia Fedorivna) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри математики Одеського державного аграрного університету – Одеса-65059, вул. Малиновського 1/1, кв. 120, тел. 0674844455, lepole1@gmail.com

Марколенко Павло Юрійович (Markolenko Pavlo Yuriyovych) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної фізики та наноматеріалів Одеського державного університету інтелектуальних технологій та зв'язку – Одеса-65005, вул. Балківська 139, кв. 74, тел. 0674827669, markolenkop@gmail.com

Назаренко Олександр Аскольдович (Oleksandr Askoldovych Nazarenko) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Ректор Одеського державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку – Одеса- 65104 , вул. Ак . Глушка 21/1, 17, тел. 0985197202, markolenkop@gmail.com