



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **104132** (13) **U**
(51) МПК (2015.01)
H01L 21/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2015 07208	(72) Винахідник(и): Деменський Олексій Миколайович (UA), Єрохін Сергій Юрійович (UA), Краснов Василь Олександрович (UA), Лебедь Олег Миколайович (UA), Шутов Станіслав Вікторович (UA)
(22) Дата подання заявки: 17.07.2015	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 12.01.2016	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 12.01.2016, Бюл.№ 1	(73) Власник(и): ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, 73000 (UA)

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЖИТТЯ НЕРІВНОВАЖНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДАХ

(57) Реферат:

Спосіб визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровідникових діодах включає вимірювання при заданій температурі прямої вольт-амперної характеристики діода й знаходження шуканого значення часу життя нерівноважних носіїв заряду. Для визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, що рекомбінують переважно в області просторового заряду активних переходів напівпровідникових діодів, додатково, при заданій температурі T_i і прямому струмі через діод I_i вимірюють величину бар'єрної ємності C_{bi} , а величину часу життя нерівноважних носіїв заряду τ_0 обчислюють за формулою:

$$\tau_0 = \frac{n_s}{N_B} \cdot \frac{kT_i}{qI_0} \cdot C_{bi},$$

де n_i - концентрація власних носіїв заряду напівпровідникового матеріалу бази діода, N_B - концентрація основних носіїв заряду в базі діода, I_0 - струм насичення, що відповідає при заданій температурі ділянці вольт-амперної характеристики з домінуванням рекомбінаційного механізму струмопереносу, k - постійна Больцмана, q - елементарний заряд.

UA 104132 U

Корисна модель належить до галузі напівпровідникової електроніки, а саме до способів визначення параметрів напівпровідникових приладів. Вона може бути використана при дослідженні, розробці та контролі напівпровідникових приладів.

Відомий спосіб вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду в базі германієвих напівпровідникових швидкодіючих діодів [Вольфсон Е.Ш., Финкельштейн Е.Я. Способ измерения времени жизни неосновных носителей заряда в базе германиевых полупроводниковых быстродействующих диодов. - Авторское свидетельство СССР № 347699, 1972], суть якого полягає у визначенні відношення максимальної ємності діода до відповідної їй величини прямого струму з урахуванням залежності часу життя неосновних носіїв заряду від рівня інжекції й особливостей геометрії кожного даного типу діодів.

Недоліками даного способу є: відносна складність процедури вимірювань, пов'язана зі знаходженням максимального значення ємності та відповідного їй прямого струму; а також необхідність врахування неконтрольованого параметра залежності часу життя неосновних носіїв заряду від рівня інжекції. Це знижує точність і ускладнює процес вимірювань. Крім того, застосування такого способу придатне переважно для вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду. За допомогою цього способу складно точно виміряти час життя нерівноважних носіїв заряду (ННЗ), що рекомбінують переважно в області об'ємного заряду $P-N$ переходу напівпровідникових діодів.

До того ж цим способом складно визначити час життя носіїв заряду менше 10^{-10} с

Відомий спосіб визначення часу життя носіїв заряду [Ke Lin et. al. A method and system for determining charge carrier lifetime. - No.: WO 2011/040883 A1, 2011]. Даний спосіб включає в себе етапи: подачі сигналу збудження на прилад; запис електричного шуму, що демонструється приладом; і визначення часу життя носіїв заряду приладу на основі записаного електричного шуму.

Однак зазначений спосіб потребує наявності досить складної та дорогої апаратури для його реалізації. Крім того, він є досить грубим, по суті оціночним способом.

Відомий спосіб визначення ефективного часу життя нерівноважних носіїв заряду для імпульсних і змішувальних діодів НВЧ [Диоды полупроводниковые. Методы измерения эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда. / Межгосударственный стандарт. ГОСТ 18986.7-73. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004]. У цьому способі ефективний час життя нерівноважних носіїв заряду визначається за відношенням значення викиду зворотного струму до амплітуди півхвилі прямого струму при перемиканні діода, що вимірюється, високочастотною синусоїдальною напругою.

Недоліком даного способу є те, що з його допомогою складно визначити час життя нерівноважних носіїв заряду в області об'ємного заряду $P-N$ переходу.

До того ж цим способом тільки в окремих випадках можна визначити час життя носіїв заряду менше 10^{-10} с. При цьому похибка таких вимірювань досить висока, перевищує 20 %.

Відомий спосіб визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду [Время жизни неравновесных носителей заряда в базе полупроводникового диода с $P-N$ переходом при произвольных уровнях инжекции / Арамян Н.С. // Известия НАН Армении, Физика, т. 43, № 4, С. 283-292, (2008)]. У цьому способі час життя нерівноважних носіїв заряду визначається на основі вимірювань стаціонарних характеристик діода: вольт-амперної характеристики на постійному струмі (ВАХ) та диференційного опору на низькій частоті. Для визначення рівноважної концентрації носіїв у базі діода вимірюється також залежність бар'єрної ємності від зворотної напруги.

Недоліком зазначеного способу є те, що в ньому не враховується рекомбінація носіїв в області об'ємного заряду, а припускається, що рекомбінація здійснюється в шарі бази. До того ж цим методом складно визначити час життя носіїв заряду менше 10^{-10} с

Відомий спосіб визначення часу життя надлишкових носіїв заряду в напівпровідникових приладах [William J. Alexander. Measurement of excess carrier lifetime in semiconductor devices. - US Patent No.: 4090132, 1978]. У цьому способі на прилад подається серія прямокутних імпульсів струму. Визначення часу життя надлишкових носіїв заряду здійснюється за нахилом кривої спадання напруги розімкненого кола, що слідує за різким припиненням кожного імпульсу.

Цей спосіб не дозволяє надійно визначати час життя носіїв в області об'ємного заряду. Згідно з літературними даними діапазон значень часу життя носіїв заряду, що визначаються цим способом $\tau \geq 10^{-7}$ с.

Відомий також оціночний спосіб визначення часу життя носіїв заряду в напівпровідникових приладах [Hiroyuki Ikezi, Richard L. Freeman. Method of judging carrier lifetime in semiconductor devices. - US Patent No.: 4564807, 1986]. Цей спосіб дозволяє здійснювати сортування або

відбраковування готових приладів (діодів) за принципом "придатний - не придатний". При цьому критерієм відбраковування є частота LC - коливального контуру, одним з елементів якого є випробуваний діод, а саме ємність зворотно зміщеного P-n переходу діода. Оскільки частота коливань і постійна часу контуру, що включає й час життя ННЗ, є взаємно зворотними величинами, тоді у випадку, якщо виміряна резонансна частота виявляється меншою заданої (базової) частоти коливань контуру, то час життя носіїв визнається таким, що перевищує припустиме значення для даного приладу і навпаки.

Недоліком даного способу є те, що з його допомогою складно визначити конкретну величину часу життя носіїв заряду напівпровідникових приладів при $\tau \leq 10^{-6}$ с.

Найбільш близьким технічним рішенням є спосіб визначення ефективного часу життя носіїв заряду напівпровідникового P-n діода на основі 4H-SiC [Temperature sensor based on 4H-silicon carbide pn diode operational from 20 °C to 600 °C / Nuo Zhang, Chili-Ming Lin, Debbie G. Senesky, Albert P. Pisano // Applied Physics Letters, Vol. 104, 073504, (2014) -прототип]. У цьому способі спочатку здійснювалося вимірювання прямих вольт-амперних характеристик діода при заданих температурах. Потім знаходилося значення термочутливості приладу. Визначення часу життя носіїв заряду τ_e здійснювалося зі співвідношення термочутливості й щільності прямого струму діода. Залежність термочутливості прямозмщеного діода від щільності прямого струму в зазначеному способі задається рівнянням:

$$\frac{dV_F}{dT} \approx \frac{2k}{q} \ln\left(\frac{I_{Te}}{qWA}\right) - 7,67 \text{ mV/K}$$

де I - це прямий струм діода при заданій прикладеній напрузі зміщення, q - елементарний заряд, k - постійна Больцмана, n - фактор ідеальності, A - площа поперечного перерізу P-n переходу, W - ширина збідненої області, dV_F/dT - термочутливість.

Недоліком даного способу є те, що в ньому не враховується залежність від температури таких параметрів як ширина збідненої області W і повною мірою ефективна щільність станів зони провідності й валентної зони N_C і N_V . Таке припущення знижує точність визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, оскільки ці параметри не можуть не залежати від температури. Це припущення може бути справедливим тільки у випадку досить вузького інтервалу температур, які розглядаються, що обмежує застосовність даного способу.

Також реалізація цього способу потребує знання значення ширини збідненої області W, а це не тільки ускладнює спосіб визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, але й знижує його точність.

Досить негативно на точність вказаного способу впливає такий параметр, як площа поперечного перерізу P-n переходу, ефективне значення якої залежить від температури, кількості об'ємних і крайових дефектів P-n структури, а також від такого явища, як розтікання струму, що залежить, у свою чергу, від конструкції приладу й контактів.

Крім того, використання для визначення часу життя носіїв заряду такого параметра як термочутливість, вносить додаткову похибку в отриманий результат, оскільки термочутливість, сама по собі, є продуктом обробки експериментальних даних (диференціювання), а не первинно вимірюваним параметром.

В основу корисної моделі поставлено задачу створити більш простий спосіб визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, що рекомбінують переважно в області просторового заряду активного переходу напівпровідникових діодів, а також підвищити точність вимірювання часу життя нерівноважних носіїв заряду в діапазоні значень $\tau \leq 10^{-6}$ с.

Задача вирішується тим, що у способі визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровідникових діодах, що включає вимірювання при заданій температурі прямої вольт-амперної характеристики діода й знаходження шуканого значення часу життя нерівноважних носіїв заряду, для визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, що рекомбінують переважно в області просторового заряду активних переходів напівпровідникових діодів, додатково, при заданій температурі T_i , і прямому струмі через діод I_i , вимірюють величину бар'єрної ємності C_{bi} , а величину часу життя нерівноважних носіїв заряду τ_0 обчислюють за формулою:

$$\tau_0 = \frac{n_i}{N_B} \cdot \frac{kT_i}{qI_0} \cdot C_{bi}$$

де n_i - концентрація власних носіїв заряду напівпровідникового матеріалу бази діода, N_B - концентрація основних носіїв заряду в базі діода, I_0 - струм насичення, що відповідає при заданій температурі ділянці вольт-амперної характеристики з домінуванням рекомбінаційного механізму струмопереносу, k - постійна Больцмана, q - елементарний заряд.

5 Поставлена задача вирішується за рахунок виключення з процесу вимірювань параметрів, які складно вимірювати та важко прогнозувати, таких як товщина шару об'ємного заряду, реальна фізична площа $p-n$ переходу, а також розрахункового параметра диференційна термочутливість та ін.

10 Істотною відмінністю запропонованого способу визначення часу життя ННЗ від прототипу є те, що він враховує залежність часу життя носіїв заряду від температури.

Перевага запропонованого способу полягає в підвищенні точності визначення часу життя, при малих його значеннях, тому що його реалізація передбачає використання, в основному, первинно вимірюваних параметрів: температури T_i , прямого струму через діод I_i , бар'єрної ємності C_{bi} .

15 Формулу для визначення часу життя ННЗ можна вивести на підставі рівнянь для бар'єрної ємності й вольт-амперної характеристики $p-n$ переходу, виразивши час життя τ_0 .

Теоретично вольт-амперна характеристика різкого асиметричного $p-n$ переходу описується рівнянням:

$$I = I_0 \cdot e^{qV/nkT},$$

20 де I_0 - щільність струму насичення, k - постійна Больцмана, T - абсолютна температура, q - елементарний заряд, n - коефіцієнт ідеальності вольт-амперної характеристики діода, $1 \leq n \leq 2$.

Вираз для бар'єрної ємності різних асиметричних $p-n$ переходів має вигляд:

$$C = S \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_B}{2 \cdot (V_{bi} \pm V - 2kT/q)}},$$

25 де знаки плюс і мінус відповідають зворотному й прямому зміщенню відповідно, V_{bi} - контактна різниця потенціалів, V - напруга на переході, T - абсолютна температура, ϵ_s - діелектрична проникність, q - елементарний заряд, N_B - концентрація основних носіїв заряду в базі діода, S - площа $p-n$ переходу.

30 Після нескладних підстановок одержуємо формулу для визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду:

$$\tau_0 = \frac{n_i}{N_B} \cdot \frac{kT_i}{qI_0} \cdot C_{bi}.$$

Даний спосіб дозволяє визначити час життя ННЗ у випадках, коли такі носії рекомбінують не тільки в базі діода, але й в області просторового заряду $p-n$ переходу або інших активних переходів ($p-p^+$, $n-n^+$ та ін.). Причому, на відміну від способу-прототипу, запропонований

35 спосіб дозволяє досить точно визначити τ_0 ННЗ у випадку переважної рекомбінації носіїв в області об'ємного заряду.

Проілюструємо спосіб, що пропонується, прикладом визначення часу життя ННЗ фосфід-галієвого світлодіода з концентрацією основних носіїв заряду в базі $N_B = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Температура середовища випробувань (кімнатна температура) становила $T_a = 295\text{K}$.

40 Для визначення часу життя ННЗ вимірюють пряму гілку вольт-амперної характеристики світлодіода шляхом зняття значень струму, які відповідають прямій напрузі, що подається на діод. Значення напруги перебувають в діапазоні від 0 до 2,5 В.

Згідно з отриманими даними будують графік прямої гілки вольт-амперної характеристики в координатах $|qI| = f(V)$.

45 Лінійну ділянку отриманого графіка продовжують до перетинання з віссю ординат, як показано на кресленні. Точка перетинання продовження графіка з віссю ординат дає значення

$$I_0 = 7,98 \cdot 10^{-21} \text{ А}.$$

Далі на установці для зняття вольт-фарадних характеристик вимірюють бар'єрну ємність діода при кімнатній температурі та нульовому зміщенні. Її значення становить $C_{bi} = 34,3$ пФ. Концентрацію власних носіїв заряду напівпровідникового матеріалу бази діода знаходять за довідковими даними. При температурі вимірювань вона становить $n_i = 0,7097 \text{ см}^{-3}$.

5 Величину часу життя ННЗ обчислюють за формулою:

$$\tau_0 = \frac{n_i}{N_B} \cdot \frac{kT_i}{qI_0} \cdot C_{bi}$$

В результаті величина часу життя ННЗ τ_0 склала:

$$\tau_0 = \frac{0,7097 \text{ см}^{-3}}{5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}} \cdot \frac{1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 295 \text{ К}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 7,98 \cdot 10^{-21} \text{ А}} \cdot 34,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 1,551 \cdot 10^{-9} \text{ с}$$

10 Таким чином, у порівнянні з відомими технічними рішеннями, запропонований спосіб визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, характеризується простотою реалізації, дозволяє підвищити точність вимірювань часу життя ННЗ нижче $\tau \leq 10^{-6} \text{ с}$, а також носіїв, що рекомбінують переважно в області просторового заряду активних переходів напівпровідникових діодів.

15 Усе, перелічене вище, обумовлює його широке застосування при виробництві й дослідженні напівпровідникових діодів.

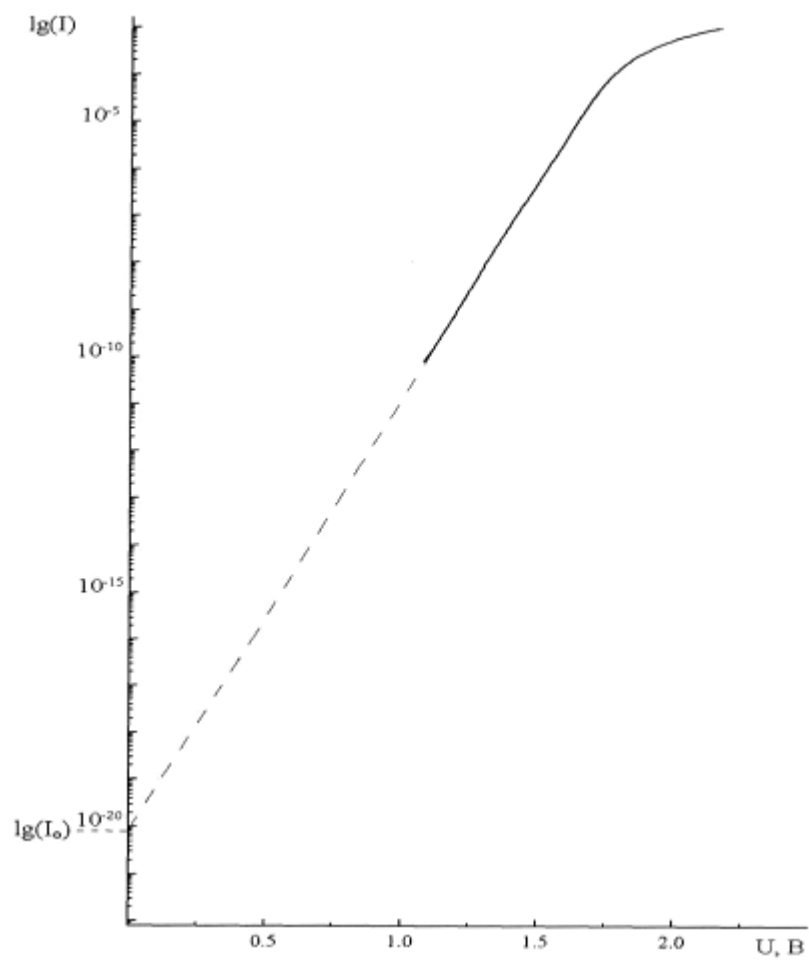
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

20 Спосіб визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровідникових діодах, що включає вимірювання при заданій температурі прямої вольт-амперної характеристики діода й знаходження шуканого значення часу життя нерівноважних носіїв заряду, який **відрізняється** тим, що для визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, що рекомбінують переважно в області просторового заряду активних переходів напівпровідникових діодів, додатково, при заданій температурі T_i і прямому струмі через діод I_i вимірюють величину бар'єрної ємності

25 C_{bi} , а величину часу життя нерівноважних носіїв заряду τ_0 обчислюють за формулою:

$$\tau_0 = \frac{n_i}{N_B} \cdot \frac{kT_i}{qI_0} \cdot C_{bi},$$

30 де n_i - концентрація власних носіїв заряду напівпровідникового матеріалу бази діода, N_B - концентрація основних носіїв заряду в базі діода, I_0 - струм насичення, що відповідає при заданій температурі ділянці вольт-амперної характеристики з домінуванням рекомбінаційного механізму струмопереносу, k - постійна Больцмана, q - елементарний заряд.



Комп'ютерна верстка І. Скворцова

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601