



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **78989** (13) **U**  
(51) МПК (2013.01)  
**G01R 31/308** (2006.01)  
**G01N 21/00**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: **u 2012 10677**  
(22) Дата подання заявки: **11.09.2012**  
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.04.2013**  
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.04.2013, Бюл.№ 7**

(72) Винахідник(и):  
**Мельник Віктор Павлович (UA),  
Малютенко Володимир Костянтинович (UA),  
Хацевич Ігор Мирославович (UA),  
Малютенко Олег Юрійович (UA),  
Богатиренко Вячеслав Валерійович (UA),  
Нікірін Віктор Андрійович (UA),  
Гамов Дмитро Вікторович (UA),  
Кирюша Олексій Іванович (UA)**  
(73) Власник(и):  
**ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ  
ІМ. В.С. ЛАШКАРЬОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ  
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ,  
пр. Науки, 41, м. Київ, 03680 (UA)**

**(54) СПОСІБ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИЯВЛЕННЯ ЛЕГОВАНИХ ОБЛАСТЕЙ В НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ МАТЕРІАЛІ**

**(57) Реферат:**

Спосіб безконтактного виявлення легованих областей в напівпровідниковому матеріалі включає визначення розподілу концентрації вільних носіїв заряду по поверхні зразка. При цьому зразок нагрівають і з допомогою тепловізійної камери реєструють розподіл по поверхні зразка густини потоку теплового інфрачервоного випромінювання в області за краєм фундаментального поглинання даного напівпровідника.

**UA 78989 U**



Корисна модель належить до оптоелектроніки і пов'язана зі способами візуалізації в напівпровідникових матеріалах легованих областей, в яких концентрація вільних носіїв заряду відрізняється від концентрації носіїв в напівпровіднику.

Стрімкий розвиток мікроелектроніки, зумовлений використанням напівпровідникових елементів, безпосередньо пов'язаний з формуванням в напівпровідниковому кристалі областей з різною концентрацією вільних носіїв заряду за рахунок введення активних домішок. Аналіз просторового розподілу та параметрів цих легованих областей важливий на всіх стадіях виготовлення напівпровідникових мікросхем.

Для вирішення цієї задачі використовується велика кількість методів досліджень, які в загальному можна розділити на дві групи: неруйнівні методи отримання інформації про розподіл активних домішок в напівпровіднику та руйнівні методи аналізу. До першої групи належать методи, які являють собою різні модифікації атомносилової мікроскопії - скануюча емнісна мікроскопія, скануюча тунельна мікроскопія, скануюча мікроскопія кельвінівського типу, а також скануюча електронна мікроскопія. До руйнівних методів аналізу областей розподілу активних домішок в напівпровіднику належать вторинна іонна маспектроскопія, Оже-електронна спектроскопія, просвічуюча електронна мікроскопія, електронна голографія та ін. Слід зазначити, що просвічуюча електронна мікроскопія та її модифікація - електронна голографія за способом отримання інформації про об'єкт не є руйнівними але підготовка зразків для аналізу передбачає зменшення товщини зразка до сотень нанометрів, тобто вимагає руйнування зразків.

Відомий спосіб візуалізації легованих областей з допомогою скануючої тунельної мікроскопії [1] полягає в наступному. Зонд атомносилового мікроскопа рухається над поверхнею зразка на відстані кількох нанометрів. Між зондом та досліджуванним зразком прикладається напруга. Аналізуючи тунельний струм, який проходить між поверхнею зразка та зондом під дією прикладеного електричного поля, отримують інформацію про концентрацію носіїв заряду в приповерхневій області. Збільшення носіїв заряду в певній області приводить до збільшення величини тунельного струму. Таким чином, інформація про величину тунельного струму в різних точках досліджуваної поверхні дозволяє візуалізувати леговані області, в яких концентрація вільних носіїв заряду відрізняється від носіїв в напівпровіднику.

До недоліків зазначеного методу слід віднести: 1) можливість аналізу тільки абсолютно гладких поверхонь з шорсткістю менше 1 нм; 2) необхідність проведення аналізу тільки у високовакуумній камері, щоб уникнути модифікації поверхні за рахунок адсорбції домішок; 3) чутливість методу тільки до поверхні досліджуваного зразка, отже леговані області, які знаходяться на глибині кілька десятків нанометрів, не можна виявити даним методом; 4) невисока чутливість методу, з допомогою скануючої тунельної мікроскопії можна візуалізувати локальну область на поверхні з концентрацією активних домішок  $10^{17}-10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

Ще один спосіб візуалізації легованих областей в напівпровіднику запропоновано в [2]. В цьому випадку для отримання двохмірного зображення легованих областей на поверхні досліджуваного зразка використовується скануюча емнісна мікроскопія. Між зондом скануючого атомносилового мікроскопа та досліджуванним зразком прикладається змінна напруга і аналізується емність досліджуваної структури, а сканування поверхні проводиться в два етапи. На першому етапі аналізується рельєф поверхні, тобто атомносиловий мікроскоп працює в звичайному режимі. Після цього, враховуючи інформацію про рельєф поверхні, проводять вимірювання локальної емності досліджуваного зразка. Оскільки наявність активної домішки в напівпровіднику призводить до зміни емності досліджуваної структури, інформація про величину локальної емності по поверхні дозволяє візуалізувати леговані області в напівпровіднику.

До недоліків даного методу слід віднести: 1) безпосередній контакт зонда з поверхнею зразка (на першому етапі при аналізі рельєфу поверхні), що ускладнює процес візуалізації після кожного етапу формування напівпровідникової мікросхеми; 2) суттєвий вплив на результат наявності на поверхні будь-якого діелектричного шару неоднорідного по товщині; 3) складність кількісної оцінки концентрації легованої домішки за даними скануючої емнісної мікроскопії.

В [3] запропоновано спосіб безконтактної візуалізації легованих областей на поверхні напівпровідника р-типу з допомогою скануючої електронної мікроскопії, вибраний за найближчий аналог. На поверхню досліджуваного напівпровідника фокусується електронний промінь, який зумовлює емісію з поверхні вторинних електронів. Аналіз спектру вторинних електронів містить інформацію про концентрацію носіїв заряду в даній області. Скануючи поверхню напівпровідника можна отримати двомірне зображення, на якому чітко видно області з різною концентрацією вільних носіїв заряду (тобто леговані області). Метод дозволяє визначити наявність на поверхні напівпровідника областей з концентрацією вільних носіїв

заряду (або активних домішок) понад  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Метод безконтактний і дозволяє проводити візуалізацію легованих областей для будь-яких поверхонь.

До недоліків зазначеного методу слід віднести: 1) необхідність проведення такого аналізу тільки у високовакуумній камері; 2) неможливість відрізнити області n-типу провідності з різними концентраціями домішок; 3) отримання інформації про розподіл легованих областей тільки на поверхні зразка, оскільки глибина виходу вторинних електронів складає всього десятки нанометрів.

Задачею корисної моделі є спрощення способу безконтактної візуалізації в напівпровідниковому матеріалі легованих областей, в яких концентрація вільних носіїв заряду відрізняється від концентрації носіїв в напівпровіднику, при одночасному забезпеченні можливості визначення легованих областей як p- так і n-типу.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що в способі безконтактного виявлення легованих областей в напівпровідниковому матеріалі, що включає визначення розподілу концентрації вільних носіїв заряду по поверхні зразка, зразок нагрівають до температури 50-200 °С і з допомогою тепловізійної камери реєструють розподіл по поверхні зразка густини потоку теплового інфрачервоного випромінювання в області за краєм фундаментального поглинання даного напівпровідника, який відповідає розподілу концентрації вільних носіїв заряду по поверхні зразка.

Наявні способи безконтактної неруйнівної візуалізації легованих областей вимагають проведення досліджень у високовакуумних камерах, з використанням складного обладнання (електронна мікроскопія, атомносілова мікроскопія тощо). Такі методи, незважаючи на їхню інформативність (високу роздільну здатність по поверхні зразка та чутливість в різниці концентрації вільних носіїв заряду на рівні  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>), важко використовувати для експресного аналізу напівпровідникового матеріалу в технологічному циклі. Для таких цілей потрібен неруйнівний безконтактний спосіб візуалізації, який не вимагає проведення досліджень в високовакуумній камері та складного процесу підготовки зразка до вимірювань. Запропонований нами метод дозволяє виявляти леговані області в напівпровіднику шляхом реєстрації теплового інфрачервоного випромінювання і не вимагає проведення вимірювань у високовакуумній камері та складної системи отримання візуалізованого зображення поверхні напівпровідника, як описано у найближчому аналогу. Для вирішення поставленої задачі достатньо нагріти зразок до температури 50-200 °С та зареєструвати інтенсивність теплового випромінювання від зразка в інфрачервоній області спектру з допомогою тепловізійної камери.

В основу запропонованого способу покладена властивість напівпровідникового матеріалу змінювати випромінювальну здатність при зміні концентрації вільних носіїв заряду.

Відповідно до закону Стефана-Больцмана густина потоку теплового випромінювання тіла Р при заданій температурі дорівнює добутку випромінювальної здатності тіла  $\epsilon$  (яка згідно з законом Кірхгофа дорівнює поглинальній здатності) на густину потоку теплового випромінювання абсолютно чорного Р<sub>bb</sub> тіла з такою ж температурою

$$P = \epsilon P_{bb} \quad (1)$$

Таким чином задача розрахунку теплового випромінювання тіла зводиться до знаходження його поглинальної здатності. Механізм поглинання світла у твердому тілі, на базі якого ґрунтується запропонований нами метод візуалізації легованих областей в напівпровіднику, це поглинання світла вільними носіями заряду, що спостерігається за краєм (на шкалі довжин хвиль) фундаментального (власного) поглинання, тобто при енергіях кванта випромінювання менших за ширину забороненої зони досліджуваного напівпровідника. Такий спектр поглинання залежить від електронної та фононної енергетичних структур конкретного напівпровідника, але коефіцієнт поглинання на вільних носіях заряду завжди пропорційний концентрації носіїв. При чому коефіцієнт поглинання чутливий, як до зміни концентрації дірок так і до зміни концентрації вільних електронів в напівпровіднику, що дозволяє виявляти леговані області як p- так і n-типу. Таким чином, проаналізувавши поверхневий розподіл інтенсивності теплового випромінювання напівпровідника, можна отримати однозначну інформацію про поверхневий розподіл вільних носіїв заряду в напівпровіднику та, відповідно, визначити леговані області, як p- так і n-типу.

Випромінювальна здатність напівпровідникової пластини товщиною d, з коефіцієнтом поглинання K(x) і коефіцієнтом відбивання від поверхні R (відбивання вважаємо дзеркальним) з урахуванням багаторазового відбивання від поверхонь визначається формулою [4]

$$\varepsilon = \frac{(1-R) \cdot \left( 1 - \exp\left(-\int_0^d K(x) dx\right) \right)}{\left( 1 - R \cdot \exp\left(-\int_0^d K(x) dx\right) \right)}, \quad (2)$$

де вісь  $x$  спрямована перпендикулярно поверхні пластини.

$K(x)$  за краєм власного поглинання має вигляд:

$$K(x) = \sigma_n n(x) + \sigma_p p(x) + K_l, \quad (3)$$

де  $n(x)$ ,  $p(x)$  - концентрації вільних електронів і дірок відповідно;  $\sigma_n$ ,  $\sigma_p$  перерізи поглинання електронами та дірками квантів інфрачервоного випромінювання;  $K_l$  - коефіцієнт поглинання кристалічної ґратки.

З метою виключення впливу теплового випромінювання оточуючого середовища ( $T_{bb}=25^\circ\text{C}$ ) зразок нагрівають до температури  $50-200^\circ\text{C}$ .

Отже, в напівпровіднику з легованими областями, в яких концентрація вільних носіїв заряду відрізняється від концентрації носіїв заряду в нелегованій частині напівпровідника, інтенсивність теплового випромінювання легованих областей буде відрізнятися від інтенсивності теплового випромінювання нелегованої його частини (області). Отже, реєстрація просторового розподілу теплового випромінювання в діапазоні довжин хвиль більших за край фундаментального поглинання (для енергій квантів менших за ширину забороненої зони) напівпровідника дозволяє безконтактно візуалізувати леговані області. Оскільки інтенсивність теплового випромінювання зі збільшенням концентрації легованих домішок (відповідно, зі збільшенням концентрації вільних носіїв заряду) збільшується, метод також дозволяє проводити кількісний аналіз концентрації домішок в легованій області за величиною густини потоку теплового випромінювання. Даний метод дозволяє візуалізувати не тільки леговані області безпосередньо на поверхні, а й області, вбудовані в глибину напівпровідника або покриті шаром діелектрика. Процес візуалізації безконтактний і не вимагає спеціальних обробок зразка, його можна проводити експресно після кожного технологічного процесу формування структури в напівпровіднику (мікросхем).

Запропонований нами спосіб дозволяє безконтактно виявляти в напівпровідниковому матеріалі леговані області, в яких концентрація вільних носіїв заряду відрізняється від концентрації носіїв в напівпровіднику, без необхідності проведення аналізу у високовакуумній камері, при одночасному забезпеченні можливості визначення легованих областей як  $p$ - так і  $n$ -типу.

Приклади:

В наведених нижче варіантах способу у вихідну пластину товщиною 300 мкм, кремній  $n$ -типу КЭФ-4.5, питомий опір  $\rho=4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , концентрація електронів  $n_e \approx 8,2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , для формування легованих областей імпантували іони бору з енергією 40 кеВ. В процесі імпантації було створено чотири області, у формі квадратів  $15 \times 15 \text{ мм}^2$ , з різними дозами імпантованого бору:  $6,25 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $6,25 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $6,25 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $6,25 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Після імпантації пластина була відпалена при  $T=1000^\circ\text{C}$  протягом 10 хв. в атмосфері азоту. Розрахунок профілю імпантованого бору проведено з допомогою програми TRIM 2000. Розподіл дірок по глибині зразка після відпалу було розраховано за умови повної активації бору після відпалу, та з врахуванням значення коефіцієнту дифузії бору  $\sim 5 \text{ нм}^2/\text{с}$  при температурі відпалу. На фіг. 1 показано розраховані профілі розподілу по глибині зразка бору після імпантації (штрихова лінія) та профілі розподілу концентрації дірок після термічного відпалу при  $T=1000^\circ\text{C}$ , 10 хв., в  $\text{N}_2$  (суцільна лінія) для різних доз імпантованого бору: 1- $6,25 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , 2- $6,25 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 3- $6,25 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 4- $6,25 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Такий процес імпантації забезпечував формування легованих областей з концентрацією домішок від  $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (для мінімальної дози імпантації) до  $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (для максимальної дози імпантації) перед відпалом і концентрацію дірок в максимумі розподілу після відпалу  $\sim 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  для мінімальної дози імпантованого бору, та  $\sim 2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  - для максимальної дози імпантованого бору.

В наведених нижче варіантах способу для аналізу просторового розподілу густини потоку теплового випромінювання використано тепловізійні камери, чутливі в діапазонах 3-5 мкм і 8-12 мкм. З метою виключення впливу теплового випромінювання оточуючого середовища ( $T_{bb}=25^\circ\text{C}$ ) зразок нагрівали до  $T=100 \pm 5^\circ\text{C}$ .

В одному з варіантів способу імпантована поверхня пластини з чотирма імпантованими областями (параметри пластини та умови імпантації наведено вище) була попередньо полірована, а протилежна - залишилась неполірованою. Аналіз розподілу теплового

випромінювання тепловізійною камерою, чутливою в діапазоні 3-5 мкм, з боку імплантованої поверхні зазначеної пластини після імплантації бору (без відпалу радіаційних дефектів та активації домішки), свідчить про відсутність областей, оптичні властивості яких відрізнялись би від оптичних властивостей напівпровідникової пластини (фіг. 2, а). Нагріта до температури  $100 \pm 5$  °С пластинка мала однакову по всій поверхні густину потоку теплового випромінювання,  $P_0 = 571$  Вт/м<sup>2</sup>. Отже, сам процес імплантації іонів бору не призводить до зміни випромінювальної здатності Е напівпровідникового матеріалу в імплантованих областях, тобто до зміни коефіцієнтів поглинання К та відбивання R, які були б пов'язані з модифікацією поверхні чи введенням радіаційних дефектів під час відпалу.

Після відпалу досліджуваного зразка тепловізійна камера чітко фіксує (фіг. 2, б) наявність двох імплантованих областей з дозою імплантованого бору понад  $6,25 \times 10^{13}$  см<sup>-2</sup> (область 3 і 4). При менших дозах імплантації леговані області 1 і 2 не фіксувались на фоні не імплантованої поверхні пластини (фіг. 2, б). Потужність теплового потоку ділянок 3 і 4 з дозами імплантації  $6,25 \times 10^{13}$  см<sup>-2</sup> і  $6,25 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> складає відповідно 627 Вт/м<sup>2</sup> і 813 Вт/м<sup>2</sup>. Мінімальний зафіксований рівень легування пластини (область 3) становив  $\sim 2 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

В одному з варіантів способу дві поверхні пластини з чотирма імплантованими областями (параметри пластини та умови імплантації наведено вище) були попередньо поліровані. Аналіз розподілу теплового випромінювання тепловізійною камерою, чутливою в діапазоні 3-5 мкм, боку імплантованої поверхні зазначеної пластини після імплантації бору (без відпалу радіаційних дефектів та активації домішки) знову ж таки свідчить про відсутність областей, оптичні властивості яких відрізнялись би від оптичних властивостей напівпровідникової пластини (фіг. 3, а). Нагріта до температури  $100 \pm 5$  °С пластинка мала однакову по всій поверхні густину потоку теплового випромінювання. Проте вихідна потужність теплового випромінювання для двосторонньо полірованої пластини виявлялась меншою ( $P_0 = 452$  Вт/м<sup>2</sup>) ніж у випадку пластини, полірованої тільки з одного боку ( $P_0 = 571$  Вт/м<sup>2</sup>). Тобто видалення розсіюючої поверхні в другому варіанті зменшує вихідну випромінювальну здатність пластини і, отже, дозволяє в принципі ідентифікувати менші дози імплантації.

Дійсно після відпалу з допомогою тепловізійної камери, чутливої в діапазоні 3-5 мкм, можна чітко визначити положення трьох імплантованих областей (2-4) з дозою імплантованого бору понад  $6,25 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. При менших концентраціях легована область 1 не фіксувалась на фоні вільної від імплантації поверхні пластини (фіг. 3, б). Потужність теплового потоку ділянок з дозами імплантації  $6,25 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup>,  $6,25 \times 10^{13}$  см<sup>-2</sup>,  $6,25 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> складала відповідно 457 Вт/м<sup>2</sup>, 468 Вт/м<sup>2</sup> і 523 Вт/м<sup>2</sup>. Область 1 з мінімальною дозою імплантації  $6,25 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup> не фіксувалась.

Зображення, наведені на фіг. 2-3, отримані тепловізійною камерою, в діапазоні довжин хвиль 3-5 мкм при температурі пластини 100 °С.

Таким чином, процес оптичного полірування задньої поверхні пластини забезпечив підвищення контрасту густини потоку теплового випромінювання між імплантованими та неімплантованими ділянками і в результаті дозволив зафіксувати теплове випромінювання ділянки 1 з дозою імплантації  $6,25 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, яке перевищує теплове випромінювання не імплантованої поверхні на 5 Вт/м<sup>2</sup>. В результаті, мінімальний рівень зафіксованої концентрації носіїв заряду (дірок) вдалось знизити на порядок ( $\sim 2 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>), в порівнянні з випадком пластини, полірованої з одного боку ( $\sim 2 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>).

В одному з варіантів способу аналіз розподілу теплового випромінювання боку імплантованої поверхні зазначеної пластини виконувався з допомогою тепловізійної камери, чутливої в діапазоні 8-12 мкм. Отримані автентичні результати.

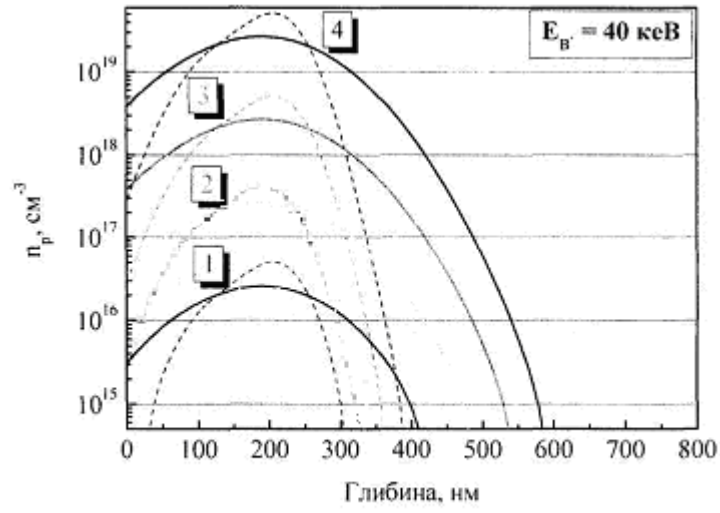
Джерела інформації:

1. Fukutome H. Two-dimensional carrier profiling by scanning tunneling microscopy and its application to advanced device development // Fujitsu Sci. Tech. J., Vol. 46, No. 3 (2010), P. 237-242.
2. Патент США № 7788732.
3. Elliott S.L., Broom R.F. and Humphreys C.J. Dopant profiling with the scanning electron microscope-A study of Si // Journal of applied physics, Vol. 91, No. 11 (2002), P. 9116-9122.
4. Мосс Т. Полупроводниковая оптоэлектроника. - М., 1976.

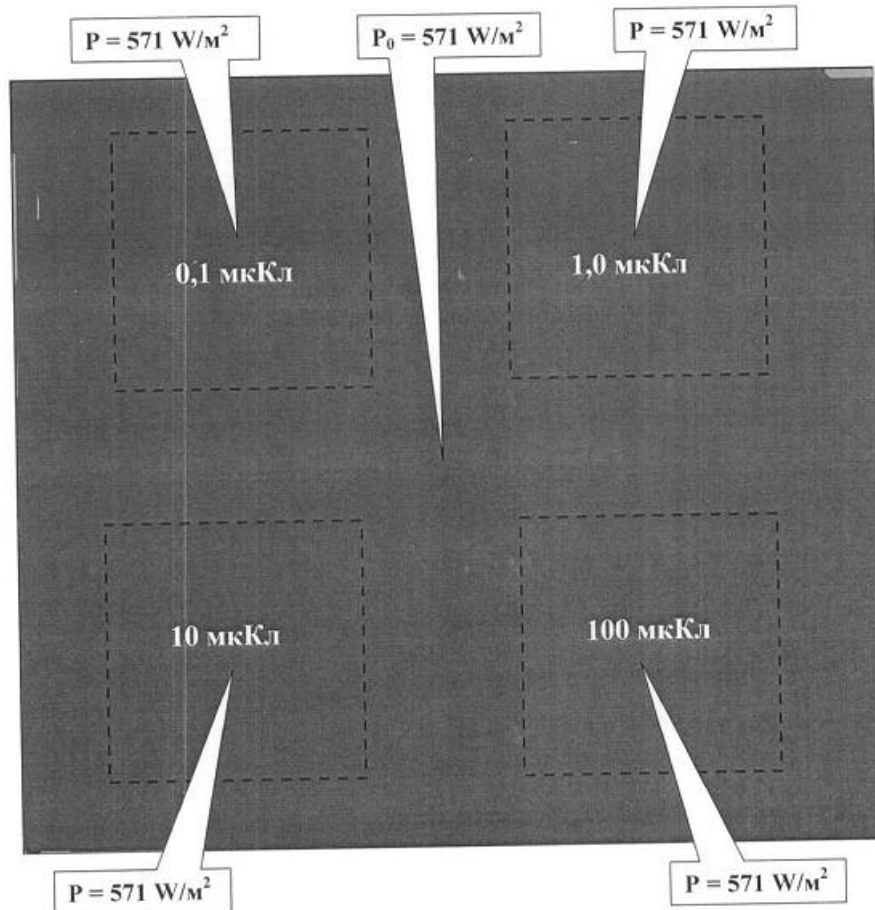
#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб безконтактного виявлення легованих областей в напівпровідниковому матеріалі, що включає визначення розподілу концентрації вільних носіїв заряду по поверхні зразка, який **відрізняється** тим, що зразок нагрівають до температури 50-200 °С і з допомогою тепловізійної камери реєструють розподіл по поверхні зразка густини потоку теплового інфрачервоного

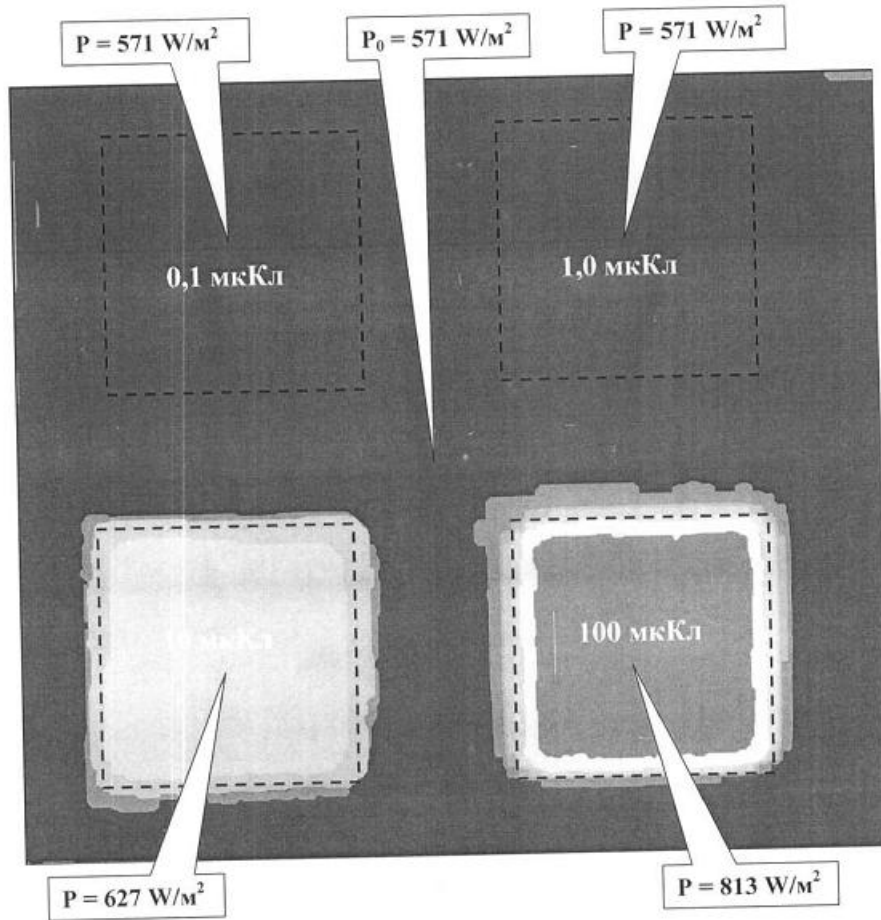
випромінювання в області за краєм фундаментального поглинання даного напівпровідника, який відповідає розподілу концентрації вільних носіїв заряду по поверхні зразка.



Фіг. 1

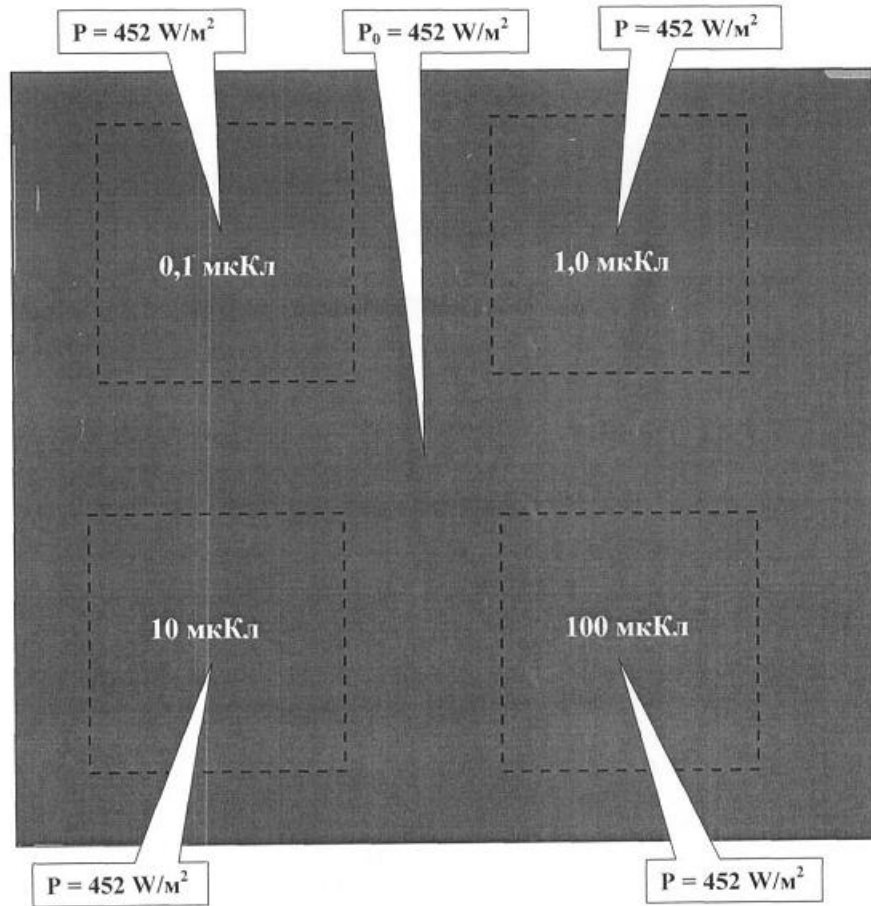


Фіг. 2, а

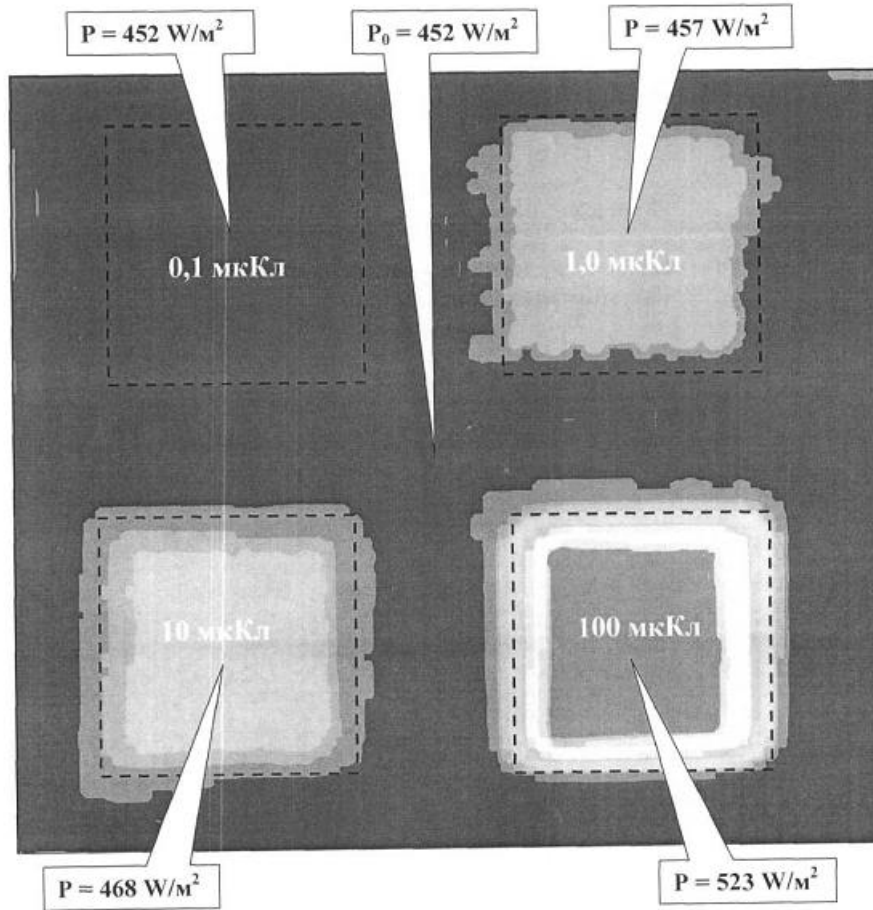


Фиг. 2, б





Фіг. 3, а



Фиг. 3, б

---

Комп'ютерна верстка Л. Купенко

---

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

---

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