



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **53343** (13) **U**
(51) МПК (2009)
G01N 27/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ**ОПИС**
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту**(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЛАСТИНАХ КРЕМНІЮ**

1

2

(21) u201001213

(22) 08.02.2010

(24) 11.10.2010

(46) 11.10.2010, Бюл. № 19, 2010 р.

(72) ЧИРЧИК СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ, ЛИСОЧЕНКО СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ, ПРИМАЧЕНКО ІВАН АНДРІЙОВИЧ, СМОЛИЧ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ

(73) ВІДКРИТЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "КВАЗАР"

(57) Спосіб визначення рекомбінаційних параметрів в технологічних пластинах кремнію, що включає імпульсне освітлення поверхні напівпровідника

світлом з довжиною хвилі, меншою краю власного поглинання напівпровідника, постійне опромінення напівпровідника надвисокочастотною електромагнітною хвилею, вимірювання концентрації нерівноважних носіїв заряду від часу за величиною потужності, відбитої або яка пройшла через зразок електромагнітної хвилі, і наступний розрахунок ефективного часу життя, який **відрізняється** тим, що спочатку визначають швидкість поверхневої рекомбінації за початковою ділянкою кінетики спаду концентрації і надалі розраховують об'ємний час життя за відомою величиною ефективного часу життя.

Корисна модель відноситься до технології виробництва напівпровідникових приладів. Корисна модель може бути використаний на підприємствах мікроелектронного профілю для контролю рекомбінаційних параметрів пластин технологічного Si, таких як: швидкість поверхневої рекомбінації, ефективний і об'ємний час життя носіїв заряду.

Існують різновиди способу визначення рекомбінаційних параметрів в напівпровідниках, які базуються на дослідженнях явищ кінетики провідності, фотопровідності, а також фотоманітоелектричних, фотоманітоконцентраційних ефектів і їх похідних [1-9]. На досліді в напівпровідниковому зразку за допомогою світлового або притискного зонду створюють надлишкову концентрацію електронів Δn та дірок Δp і спостерігають криві кінетик процесу релаксації напівпровідника між рівноважним та нерівноважним станами, або визначається просторовий розподіл концентрації нерівноважних носіїв заряду в зразку. При спостереженнях кінетик релаксації або просторового розподілу нерівноважних носіїв заряду застосовуються притискні омичні або випрямляючі контакти [1-3], або безконтактні неруйнуючі методи [4-9]. Фізичними величинами, що вимірюються в цих експериментах є напруги і струми [1-3], контактна різниця потенціалів [4], випромінювання спектрів збудження фотолюмінісценції [5], потужність надлишкового теплового випромінювання напів-

провідника [6], провідність зразка, що вимірюється за величиною потужності відбитої або пройшовшої через зразок надвисокочастотної (НВЧ) електромагнітної хвилі, [7-9]. В цих дослідженнях при порівнянні теорії з даними експериментальних спостережень визначаються рекомбінаційні характеристики напівпровідникового матеріалу - час життя τ_{eff} або довжина дифузії L_{eff} нерівноважних носіїв заряду, що пов'язані між собою відомим співвідношенням $L_{eff} = (D\tau_{eff})^{1/2}$, де D - коефіцієнт дифузії, і є еквівалентними з точки зору опису матеріалу. Загальним недоліком перерахованих методів є неможливість розмежування внесків об'ємних рекомбінаційних процесів з поверхневими. Швидкість поверхневої рекомбінації s може на декілька порядків перевищувати об'ємну і тим самим визначальним чином впливати на характеристики напівпровідникових приладів, що виготовляються на кремнієвих пластинах. Останнє є особливо важливим при зменшенні розмірів елементів мікроелектронних виробів, а також у випадку коли генераційно-рекомбінаційні процеси і перенос заряду відбуваються в тонкому приповерхневому шарі пластин, наприклад в сонячних елементах (СЕ). Тому проблема виділення частини рекомбінаційних процесів, що проходять на поверхні напівпровідника, була і залишається однією з основних в роботах спрямованих на поліпшення

(13) **U**
(11) **53343**
(19) **UA**

характеристик сонячних елементів та зменшення розмірів мікроелектронних структур.

Найбільш близьким за своєю технічною сутністю і досягаемому технічному результату до заявляемого, являється спосіб вимірювання рекомбінаційних параметрів, що включає імпульсне освітлення поверхні напівпровідника світлом з довжиною хвилі меншою краю власного поглинання напівпровідника, постійне опромінення напівпровідника НВЧ електромагнітною хвилею і вимірювання концентрації неосновних носіїв заряду від часу [7-9]. В цьому випадку величинами, що вимірюються, є потужність відбитої або пройшовшої через зразок НВЧ електромагнітної хвилі, що пов'язані з величинами концентрації нерівноважних носіїв заряду і провідності. Поглинання світла і генерація нерівноважних носіїв заряду в напівпровіднику спадають за експоненціальним законом в напрямку від поверхні. Після закінчення імпульсного освітлення спад фотопровідності буде визначатися як рекомбінацією на поверхневих станах, так і в об'ємі напівпровідника. Ці процеси рекомбінації, а також дифузійні процеси призводять до перерозподілу внесків в кінетику НВЧ провідності зразка нерівноважних носіїв заряду, що рекомбінують в приповерхневій області і об'ємі. З часом, вплив рекомбінаційних процесів в об'ємі починає переважати і тому розрахунок ефективного часу життя τ_{eff} по кривій кінетики спаду концентрації проводиться на її кінцевій ділянці, а початкова ділянка не береться до уваги.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що комплекс експериментальних умов, алгоритмів і методів розрахунків в розглянутих способах-аналогах не вирішує задач відокремлення частин об'ємних і поверхневих рекомбінаційних характеристик при дослідженні технологічних пластин кремнію, що є необхідною передумовою для розробки ефективних методів зменшення швидкості поверхневої рекомбінації і розуміння фізичних механізмів її формування.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення способу визначення рекомбінаційних параметрів в технологічних пластинах кремнію шляхом визначення швидкості поверхневої рекомбінації за початковою ділянкою кінетики спаду концентрації, розрахунку об'ємного часу життя за відомою величиною ефективного часу життя і тим самим забезпечити можливості підвищення інформативності, точності і швидкості досліджень.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі визначення рекомбінаційних параметрів в технологічних пластинах кремнію, що включає імпульсне освітлення поверхні напівпровідника світлом з довжиною хвилі меншою краю власного поглинання напівпровідника, постійне опромінення напівпровідника НВЧ електромагнітною хвилею, вимірювання концентрації нерівноважних носіїв заряду від часу за коефіцієнтом відбивання або пропускання надвисокочастотної хвилі і наступний розрахунок ефективного часу життя, відповідно до корисної моделі, що заявляється, спочатку визначається швидкість поверхневої рекомбінації за початковою ділянкою кінетики спаду концентрації і

надалі розраховується об'ємний час життя за відомою величиною ефективного часу життя.

В способі, що заявляється, сукупність суттєвих ознак дає можливість визначення поверхневих і об'ємних рекомбінаційних параметрів в технологічних пластинах кремнію. Імпульсне опромінення локальної області пластини кремнію з довжиною хвилі нижче краю поглинання створює достатню концентрацію нерівноважних носіїв заряду в приповерхневій області. Постійне опромінення НВЧ електромагнітною хвилею і вимірювання концентрації нерівноважних носіїв заряду від часу за величиною потужності відбитої або пройшовшої через зразок НВЧ електромагнітної хвилі, дозволяє визначити залежність концентрації нерівноважних носіїв заряду від часу. Проведення розрахунків за початковою ділянкою кінетики спаду концентрації нерівноважних носіїв заряду дає можливість визначити швидкість поверхневої рекомбінації. Об'ємний час життя розраховується за одержаною швидкістю поверхневої рекомбінації і величиною ефективного часу життя, що визначається за відомими методами. Це значно підвищує інформативність експериментальних досліджень, забезпечує можливість безконтактного визначення швидкості поверхневої рекомбінації, об'ємного і ефективного часу життя за один вимір і робить можливим застосування способу для неруйнівних експрес вимірювань.

Для визначення рекомбінаційних параметрів в технологічних пластинах кремнію необхідно провести наступні дослідження і розрахунки:

Виходячи з рівняння неперервності для до напівнескінченного напівпровідникового зразка, що освітлюється імпульсом монохроматичного світла після припинення освітлення часова залежність повної концентрації генерованих світлом вільних носіїв Δn_{tot} від часу t описується рівнянням [10]:

$$\Delta n_{\text{tot}}(t) = \sum_k B_k b_k \exp \left(- \left(\frac{1}{\tau_v} + \alpha_k^2 D \right) t \right) \frac{\sin(z_k)}{z_k} \quad (1),$$

де

$$k = 1, 2, \dots, \infty, z_k = \frac{\alpha_k d}{2}, b_k = - \frac{D \alpha_k \cos(z_k) + s \sin(z_k)}{D \alpha_k \sin(z_k) - s \cos(z_k)} B_k, D$$

- коефіцієнт дифузії носіїв заряду у напівпровіднику, s — швидкість поверхневої рекомбінації, τ_v - об'ємний час життя. Константи α_k визначаються з (2), яке отримане з граничних умов для рівняння неперервності.

$$\alpha_k d = 2 \arctg \left(\frac{s}{D \alpha_k} \right) + k\pi \quad (2)$$

Коефіцієнти B_k визначаються з початкових умов, що являють собою початковий розподіл концентрації генерованих світлом носіїв з врахуванням багаторазового відбивання від обох граней зразка ($\Delta n_{\text{tot}}(x, t=0)$):

$$B_k = \frac{C\alpha_k}{(b_k^2(\alpha_k d + \sin(\alpha_k d)) + (\alpha_k d - \sin(\alpha_k d)) \cdot (\alpha^2 + \alpha_k^2))} \times \\ \times \left(b_k \left(\cos(z_k) \sinh\left(\frac{\alpha d}{2}\right) + \frac{\alpha_k}{\alpha} \sin(z_k) \cosh\left(\frac{\alpha d}{2}\right) \right) \cdot (1 + R \cdot \exp(-\alpha d)) + \right. \\ \left. + \left(\frac{\alpha_k}{\alpha} \cos(z_k) \sinh\left(\frac{\alpha d}{2}\right) - \sin(z_k) \cosh\left(\frac{\alpha d}{2}\right) \right) \cdot (1 - R \cdot \exp(-\alpha d)) \right) \quad (3)$$

де α - коефіцієнт поглинання збуджуючого світла на довжині хвилі λ , R - коефіцієнт відбивання збуджуючого світла від поверхні напівпровідника, C - константа, що визначається потужністю випромінювання збуджуючого джерела (значення константи C не є необхідним для визначення рекомбінаційних параметрів).

Залежність повного числа фотогенерованих носіїв від часу (1) складається з нескінченного числа доданків, кожен з яких являє собою експоненціально-спадну функцію. З аналізу рівняння (2) випливає, що при зростанні номера k , величина констант α_k швидко зростає. Це в свою чергу означає, що при зростанні часу (t), впливом доданків з великими значеннями k можна знехтувати. Таким чином, в початкову частину залежності (1) вносять вклад усі експоненціальні доданки, тоді як при $t \rightarrow \infty$ залежність може бути представлена однією експонентою з постійною часу, яка являє собою ефективний час життя носіїв заряду τ_{eff}

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_V} + \alpha_1^2 D \quad (4)$$

Суть проведення розрахунків за корисною моделлю пояснюється кресленням де зображена:

- фіг. 1 - Кінетика релаксації потужності відбитого сигналу НВЧ електромагнітної хвилі ΔU у відносних одиницях в залежності від часу t .

У напівлогарифмічному масштабі кінцева область залежності (1) буде лінійною (Фіг. 1). Це дає можливість визначати ефективний час життя за часовою залежністю зміни числа генерованих світлом носіїв заряду, яка при низьких рівнях збудження лінійно пов'язана з величиною потужності ΔU відбитої (пройшовшої через зразок) НВЧ хвилі. Ефективний час життя τ_{eff} визначається за нахилом прямої, яка являє собою лінійну область отриманої залежності $\Delta U(t)$, що побудована в напівлогарифмічному масштабі:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = - \frac{\ln(\Delta U(t_1)) - \ln(\Delta U(t_2))}{t_1 - t_2} \quad (5)$$

Величина відрізка δ (Фіг. 1.), що відтинає на осі ординат пряма, що екстраполює залежність $\ln \Delta U(t)$ в кінцевій області нормованої залежності (1), представляється у вигляді:

$$\delta = \text{const} + \ln \left(\frac{B_1 b_1 \frac{\sin(z_1)}{z_1}}{\sum_k B_k b_k \frac{\sin(z_k)}{z_k}} \right) \quad (6)$$

Важливим наслідком що випливає з (6) є те, що δ не залежить від об'ємного часу життя, а є функцією від s . За відомими параметрами напівпровідника, такими як: коефіцієнт дифузії D , тов-

щина d , коефіцієнт поглинання збуджуючого світла $\alpha(\lambda)$, з формул (1)-(3) розраховується функція $s(\delta)$ (кожному значенню s відповідає своє значення δ). Таким чином визначається швидкість поверхневої рекомбінації за залежністю $\Delta U(t)$, що вимірюється і чисельно розрахованою залежністю $s(\delta)$. Швидкість поверхневої рекомбінації s визначають за величиною відрізка δ , що відсікає на осі ординат пряма екстраполююча лінійну область отриманої залежності $\Delta U(t)$, побудованої в напівлогарифмічному масштабі.

Для визначення ефективного часу життя і швидкості поверхневої рекомбінації запропонованим методом не потрібно проводити вимірювання в абсолютних величинах. За відомими значеннями s і τ_{eff} по формулі (4) легко визначити об'ємний час життя носіїв заряду τ_V . Таким чином, з одного виміру визначаються зразу три важливих рекомбінаційних параметри носіїв заряду в пластині (s , τ_{eff} , τ_V).

Заявлений спосіб реалізують наступним чином:

Напівпровідник постійно опромінюється надвисокочастотною електромагнітною хвилею і періодично освітлюється імпульсами світла з довжиною хвилі меншою краю власного поглинання напівпровідника. Після дії на зразок кожного імпульсу світла вимірюється залежність потужності U відбитої НВЧ електромагнітної хвилі від часу t . Для вимірювання потужності НВЧ електромагнітної хвилі використовується детектор, сигнал з якого поступає на швидкодіючий АЦП і зчитується персональним комп'ютером через інтерфейс USB. Після цифрової обробки сигналу будується залежність $U(t)$ і обчислюється величина ефективного часу життя τ_{eff} за відомими методами [7-9]. Надалі з формул (1)-(3) розраховується теоретична функція $s(\delta)$ (кожному значенню s відповідає своє значення δ). При розрахунку в якості параметрів зразка беруть коефіцієнт дифузії D , товщину пластини d , коефіцієнт поглинання збуджуючого світла $\alpha(\lambda)$. Експериментальне значення δ визначають за величиною відрізка, що відсікає на осі ординат пряма екстраполююча лінійну область отриманої залежності $\ln \Delta U(t)$ (Фіг. 1). Порівнюючи розраховану теоретично залежність $s(\delta)$ і експериментально знайдене значення δ визначається швидкість поверхневої рекомбінації s . За відомими значеннями δ і τ_{eff} по формулі (4) визначається об'ємний час життя носіїв заряду τ_V .

Приклад конкретної реалізації способу.

Досліджувались пластини легованого бором р-Si різної товщини (0,2-3)мм. Пластини вирізалися зі зливків вирощених методом Чохральського і безтигельної зонної плавки (БЗП), що використовувались у виробництві сонячних елементів. При математичному моделюванні коефіцієнт дифузії D був розрахований на основі роботи [11], коефіцієн-

ти поглинання збуджуючого світла α - на основі [12], а коефіцієнти відбивання R - на основі [13].

На зразках вирощених методом БЗП вимірний за пропонованим методом об'ємний час життя τ_V складав сотні мкс, а на вирощених методом Чохральського - десятки мкс, що співпадало з паспортними даними злитків, з яких були виготовлені пластини. Вимірне значення швидкості поверхневої рекомбінації на полірованих поверхнях пластин складало $>10^4$ см/с, а після травлення у СР-4 ≈ 1000 см/с, що добре корелювало з літературними даними [14-16]. Отримані дані підтверджують працездатність запропонованого способу визначенню рекомбінаційних параметрів в пластинах Si.

Таким чином, порівняно з відомими способами, заявляється спосіб визначення рекомбінаційних параметрів в технологічних пластинах кремнію, дозволяє значно спростити реалізацію необхідних умов експериментальних досліджень, а саме забезпечити можливість безконтактного визначення з одного виміру трьох важливих рекомбінаційних параметрів носіїв заряду в пластинах кремнію (s , τ_{eff} , τ_V) і тим самим розділити частини рекомбінаційних процесів, що проходять на поверхні напівпровідника і в об'ємі. Це робить можливим його застосування для неруйнівних експрес досліджень кремнієвих пластин при виробництві мікроелектронних виробів, в тому числі сонячних елементів.

Джерела інформації:

1. СМ. РЫБКИН, Фотоэлектрические явления в полупроводниках, М., Госиздат физ.-мат. литературы, 1963, гл. 13,14.

2. Специальный практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам. Под ред. К.В. Шалимовой, М., Госэнергоиздат 1962. Стр. 32.

3. В.В. Батавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович, Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур, М., Радио и связь, 1985, 264 с. Глава 4.

4. Патент України №67130, МІЖ G01N 27/00.

5. Пека Г.П., Спектор С.А., Шекель Л.Г. Определение рекомбинационных параметров полупроводников из спектров возбуждения фотolumинесценции. // ФТП т.9, вип. 10, 1975, с.1920-1924

6. Патент України №15589, МПК G01N27/00.

7. Патент США №5049816, МПК G01R31/26.

8. Патент України №57427, МПК G01N27/00.

9. Патент України №38308, МПК G01N27/00.

10. A.Buczowski, Z.J.Radzinski, G.A.Rozgonyi, F.Shimura. Separation of bulk and surface components of recombination life time obtained with a single laser/microwave photoconductance technique. Journal of Appl. Phys., v.72, issue 2, p.2873, 1992.

11. C. Jacoboni, C Canali, G. Ottaviani, A.A. Quaranta. A Review of Some Charge Transport Properties of Silicon. Solid State Electron. 20, 77, 1977.

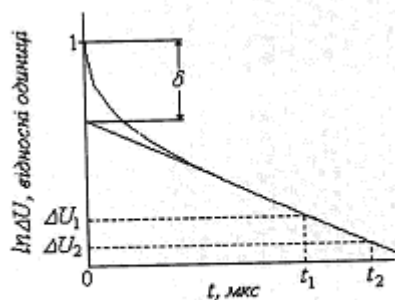
12. K. Rajkanan, R. Singh, J. Shewchun, Solid State Electron. Absorption coefficient of silicon for solar sell. 22, 9, 793, 1979.

13. J. Philipp H.R., Taft E.A. Optical Constant of Silicon in the Region 1 to 10 eV. Physical Review, 120,1, p.37-38, 1960.

14. Файнштейн СМ. Обработка поверхности полупроводниковых приборов. МЛ 966.

15. V. Malyutenko, S. Chyrchuk. Surface recombination velocity in Si wafers by photoinduced thermal emission. Appl. Phys. Lett. 89, 051909, 2006.

16. Baek D., Rouvimov S., Kim B., Jo T.-C., Schroder D.K. Surface recombination velocity of silicon wafers by photoluminescence // Applied Physics Letters 86,112110, 2005.



Фіг.