



УКРАЇНА

(19) UA (11) 67186 (13) U
(51) МПК (2012.01)
G01N 27/00ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕРІВНОВАЖНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ

1

2

(21) u201107523

(22) 14.06.2011

(24) 10.02.2012

(46) 10.02.2012, Бюл. № 3, 2012 р.

(72) ЧИРЧИК СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ, КУДРИК
ЯРОСЛАВ ЯРОСЛАВОВИЧ, ШЕРЕМЕТ ВОЛОДИ-
МИР МИКОЛАЙОВИЧ(73) ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ ІМ.
В.Є. ЛАШКАРЬОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
НАУК УКРАЇНИ(57) Спосіб визначення рекомбінаційних параметрів нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках, що включає постійне опромінення напівпровідника надвисокочастотною (НВЧ) електромагнітною хвилею і освітлення поверхні напівпровідника імпульсом світла з довжиною хвилі λ_1 , меншою краю власного поглинання напівп-

ровідника, і тривалістю фронту спадання інтенсивності набагато менше ефективного часу життя нерівноважних носіїв заряду у напівпровіднику τ_{eff} , вимірювання відношення $(P_1(t)/P_0)$ потужностей відбитої або пройденої через зразок НВЧ хвилі P_1 і падаючої НВЧ хвилі P_0 в залежності від часу t після закінчення світлового імпульсу і визначення τ_{eff} , який відрізняється тим, що поверхню напівпровідника додатково освітлюють імпульсом світла, довжина хвилі якого $\lambda_2 \neq \lambda_1$, і знову вимірюють відношення $(P_2(t)/P_0)$ потужностей відбитої або пройденої через зразок НВЧ хвилі P_2 і падаючої НВЧ хвилі P_0 і визначають додатково швидкість поверхневої рекомбінації та об'ємний час життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровіднику.

Корисна модель належить до технології виробництва напівпровідникових приладів. Корисна модель може бути використана 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 дослідженні явищ кінетики провідності, фотопровідності, а також фотоманітоелектричних, фотоманітоконцентраційних ефектів і їх похідних [1-6]. В напівпровідниковому зразку за допомогою світлового або притискового зонда створюють надлишкову концентрацію електронів Δn та дірок Δp і спостерігають кінетику релаксації надлишкової концентрації. При спостереженні кінетики релаксації або просторового розподілу нерівноважних носіїв заряду застосовуються притискові омичні або випрямляючі контакти [1], або безконтактні неруйнуючі методи [2-6]. Фізичними величинами, що вимірюються в цих експериментах, є напруги і струми [1], спектри фотolumінесценції [3], потужність надлишкового теплового випромінювання напівпровідника [4], провідність зразка, що вимірюється за відношен-

ням потужностей падаючої і відбитої або пройденої через зразок НВЧ хвилі, [5-6]. В цих дослідженнях при порівнянні теорії з даними експериментальних спостережень визначаються рекомбінаційні характеристики напівпровідникового матеріалу - ефективний 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 визначення швидкості поверхневої рекомбінації s та об'ємного часу життя τ_v . Швидкість поверхневої рекомбінації 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,

(19) UA (11) 67186 (13) U

була і залишається однією з основних в роботах спрямованих на поліпшення характеристик сонячних елементів та зменшення розмірів мікроелектронних структур.

Найбільш близьким за своєю суттю і технічним результатом до заявленого, є спосіб вимірювання рекомбінаційних параметрів, що включає постійне опромінення напівпровідника НВЧ хвилею і освітлення поверхні напівпровідника імпульсом світла з довжиною хвилі, меншою краю власного поглинання напівпровідника, і тривалістю фронту спадання інтенсивності набагато менше ефективного часу життя нерівноважних носіїв заряду у напівпровіднику, вимірювання в залежності від часу після закінчення світлового імпульсу відношення потужностей падаючої НВЧ хвилі і відбитої або пройдені через зразок НВЧ хвилі [5]. 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 метод дозволяє визначити ефективний час життя τ_{eff} по кривій кінетики спаду концентрації (що пропорційна НВЧ провідності) на її кінцевій ділянці, а початкова ділянка не береться до уваги.

Метод не дозволяє визначити швидкість поверхневої рекомбінації s та об'ємний час життя τ_v .

В основу корисної моделі поставлено задачу збільшення інформативності способу визначення рекомбінаційних параметрів в пластинах напівпровідника, а саме визначення швидкості поверхневої рекомбінації s та об'ємного часу життя τ_v .

Поставлена задача вирішується тим, що в способі визначення рекомбінаційних параметрів, що включає постійне опромінення напівпровідника надвисокочастотною електромагнітною хвилею і освітлення поверхні напівпровідника імпульсом світла з довжиною хвилі λ_1 , меншою краю власного поглинання напівпровідника і тривалістю фронту спадання інтенсивності набагато менше ефективного часу життя нерівноважних носіїв заряду у напівпровіднику τ_{eff} , вимірювання відношення $(P_1(t)/P_0)$ потужностей відбитої або пройдені через зразок НВЧ хвилі P_1 і падаючої НВЧ хвилі P_0 в залежності від часу t після закінчення світлового імпульсу і визначають τ_{eff} , вводять додатково освітлення поверхні напівпровідника імпульсом монохроматичного світла, довжина хвилі якого $\lambda_2 \neq \lambda_1$ і повторне вимірювання відношення $(P_2(t)/P_0)$ потужностей відбитої або пройдені через зразок НВЧ хвилі P_2 і падаючої НВЧ хвилі P_0 і визначення додатково швидкості поверхневої рекомбінації та об'ємного часу життя нерівноважних носіїв заряду.

В способі, що заявляється, сукупність суттєвих ознак дає можливість визначення поверхневих і об'ємних рекомбінаційних параметрів в пластинах напівпровідника. Імпульсне опромінення (тривалі-

стю фронту спадання інтенсивності набагато менше за ймовірний час життя нерівноважних носіїв заряду у напівпровіднику τ_{eff}) напівпровідника з довжиною хвилі нижче краю поглинання створює достатню для вимірювання стаціонарну концентрацію нерівноважних носіїв заряду в приповерхневій області. Постійне опромінення НВЧ електромагнітною хвилею і вимірювання відношення потужностей відбитої або пройдені через зразок НВЧ хвилі і падаючої НВЧ хвилі в залежності від часу після закінчення світлового імпульсу, дозволяє визначити величину ефективного часу життя нерівноважних носіїв заряду. Оскільки в початковий момент після закінчення світлового імпульсу коефіцієнт поглинання в основному визначається швидкістю поверхневої рекомбінації та довжиною хвилі, то по відношенню величин потужностей відбитих або пройдених через зразок НВЧ електромагнітних хвиль в момент після припинення збуджувального випромінювання на цих довжинах хвиль $(P_{1\text{max}}-P_{2\text{max}})$ визначається 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 і робить можливим застосування способу для неруйнівних експрес-вимірювань.

При визначенні рекомбінаційних параметрів в частинах напівпровідника проводять наступні дослідження і розрахунки:

Виходячи з рівняння неперервності для напівнескінченного напівпровідникового зразка, що освітлюється імпульсом монохроматичного світла, після припинення освітлення, часова залежність повної концентрації генерованих світлом вільних носіїв Δn від часу t описується рівнянням [7]:

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

$$\text{де } k=1, 2, \dots, \infty, \quad z_k = \frac{a_k d}{2},$$

$$b_k = -\frac{Da_k \cos(z_k) + s \sin(z_k)}{Da_k \sin(z_k) - s \cos(z_k)} B_k,$$

D - коефіцієнт дифузії носіїв заряду у напівпровіднику.

Константи a_k визначаються з (2), яке отримане з граничних умов для рівняння неперервності,

$$a_k d = 2 \arctg\left(\frac{s}{Da_k}\right) + k\pi. \quad (2)$$

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

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

де α - коефіцієнт поглинання збуджуючого світла на довжині хвилі λ ,

R - коефіцієнт відбивання збуджуючого світла від поверхні напівпровідника,

C - константа, що визначається потужністю світлового випромінювання (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 експоненційно-спадну функцію. З аналізу рівняння (2) випливає, що при зростанні номера k , величина констант a_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} .

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_v} + a_1^2 D. \quad (4)$$

Суть проведення розрахунків за корисною моделлю пояснюється кресленням, де зображена:

(див. кресл.) - Кінетика релаксації відношення потужностей відбитої і падаючої НВЧ хвилі у відносних одиницях.

У напівлогарифмічному масштабі кінцева область залежності (1) буде лінійною (див. кресл.). Це дає можливість визначати ефективний час життя за часовою залежністю зміни числа генерованих світлом носіїв заряду, яка при низьких рівнях збудження прямо пропорційна до відношення потужностей відбитої (пройденої через зразок) НВЧ хвилі до падаючої потужності. Ефективний час життя τ_{eff} визначається за нахилом прямої, яка являє собою лінійну область отриманої залежності, що побудована в напівлогарифмічному масштабі:

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = - \frac{\ln(P_1(t_1)/P_0) - \ln(P_1(t_2)/P_0)}{t_1 - t_2}. \quad (5)$$

В області сильного поглинання вираз для повного числа фотогенерованих носіїв заряду Δn_{max} (за час світлового імпульсу $t > \tau_{\text{eff}}$) можна записати у такому вигляді, оскільки експоненційними членами можна знехтувати (подібне співвідношення отримане у [12]):

$$\Delta n_{\text{max}} \approx G_0 L^2 \frac{1 + \frac{s}{D} \frac{1}{\alpha}}{D + sL \coth \frac{d}{2L}}.$$

Тоді для максимуму величини відносної потужності $P_{1\text{max}}/P_0$ відбитої (пройденої через зразок)

НВЧ хвилі має місце наступний вираз:

$$\frac{P_{1\text{max}}/P_0}{J_0} \sim A \left(1 + \frac{s}{D} \frac{1}{\alpha_\lambda} \right), \quad (6)$$

де J_0 - кількість квантів, що падають на одиницю поверхні напівпровідника за одиницю часу, D - коефіцієнт дифузії,

α_λ - коефіцієнт поглинання падаючого світла на довжині хвилі λ . При цьому умова сильного поглинання означає, що $\alpha_\lambda L \gg 1$, $\alpha_\lambda d \gg 1$, (де L - дифузійна довжина, d - товщина напівпровідникового зразка). Зауважимо, що A не залежить від α_λ .

Це дає можливість визначати s за залежністю максимуму величини відносної потужності P_{max}/P_0 відбитої (пройденої через зразок) НВЧ хвилі від довжини хвилі світла, що поглинається. Чим менше довжина хвилі збуджуючого світла (а значить вище коефіцієнт поглинання), тим менше товщина приповерхневого шару напівпровідника, в якому воно поглинається, а це призводить до зміни сигналу максимуму величини відносної потужності P_{max}/P_0 відбитої (пройденої через зразок) НВЧ хвилі (який визначається інтегралом надлишкової концентрації по товщині кристалу), внаслідок рекомбінації надлишкових носіїв на поверхні.

Якщо вибрати такі довжини хвилі збуджуючого світла $\lambda_1 \neq \lambda_2$, для яких $\alpha_\lambda L \gg 1$ і $\alpha_\lambda d \gg 1$, то по

відношенню $\frac{P_{1\text{max}}}{P_{2\text{max}}} = a$ на цих довжинах хвиль

можна визначити s :

$$\frac{s}{D} = \frac{a - 1}{1 - a \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} \cdot \alpha_1, \quad (7)$$

де α_1 і α_2 - коефіцієнти поглинання збуджуючого світла для λ_1 і λ_2 відповідно. За формулою (8)

для даних α_1 і α_2 можна наперед побудувати графік залежності s від α , тоді достатньо вимірювати відношення сигналів α , щоб знайти s .

Таким чином визначається швидкість поверхневої рекомбінації за залежністю $\frac{P_{1\text{max}}}{P_{2\text{max}}} = a$, що

вимірюється (див. кресл.).

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, визначаються зразу три важливих рекомбінаційних параметри носіїв заряду в пластині (s , τ_{eff} , τ_v).

Заявлений спосіб реалізують наступним чином:

Напівпровідник постійно опромінюють НВЧ електромагнітною хвилею і освітлюють поверхню напівпровідника імпульсом світла з довжиною хвилі λ , меншою краю власного поглинання напівпровідника, і тривалістю фронту спадання інтенсивності набагато менше ефективного часу життя нерівноважних носіїв заряду у напівпровіднику τ_{eff} , вимірюючи відношення $(P_1(t)/P_0)$ потужностей відбитої або пройденої через зразок НВЧ хвилі P_1 і падаючої НВЧ хвилі P_0 в залежності від часу t після закінчення світлового імпульсу, і визначають τ_{eff} , після чого поверхню напівпровідника додатково освітлюють імпульсом світла, довжина хвилі якого $\lambda_2 \neq \lambda_1$, і знову вимірюють відношення $(P_2(t)/P_0)$ потужностей відбитої або пройденої через зразок НВЧ хвилі P_2 і падаючої НВЧ хвилі P_0 і визначають швидкість поверхневої рекомбінації та об'ємний час життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровіднику.

Для вимірювання потужності НВЧ електромагнітної хвилі використовується детектор, сигнал з якого надходить на швидкодіючий АЦП і зчитується персональним комп'ютером через інтерфейс USB. Після цифрової обробки сигналів будується залежність $P_1(t)/P_0$ і $P_2(t)/P_0$. При цьому швидкість поверхневої рекомбінації визначається по відношенню сигналів $\frac{P_{1\text{max}}}{P_{2\text{max}}}$, що вимірюється (див. формулу (7)).

Величина ефективного часу життя τ_{eff} обчислюється відомими методами [5-6] (див. формулу (5)). За знайденими значеннями s 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 злиwkів 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 [8], коефіцієнти поглинання збуджуючого світла α - на основі [9], а коефіцієнти відбивання R - на основі [10].

Для імпульсного опромінення використано смужковий лазерний діод 5ПВ-828 (виготовлено ФТІ ім. Йоффе, С-Пб) AlGaAs/GaAs/InGaAs, $\lambda_1=0,98$ мкм, $P_{\text{max}}=2$ Вт та лазер на неодимовому склі (виготовлено СКТБ ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, Київ), $\lambda_2=1,06$ мкм, енергія імпульсу 260 мДж. Для зменшення потужності використано набір калібрувальних фільтрів. Випромінювання обох лазерів балансувалося по кількості квантів.

На зразках, вирощених методом БЗП, вимірний за пропонуваним методом об'ємний час життя τ_V складав сотні мкс, а на вирощених методом Чохральського - десятки мкс, що співпадало з пас-

портними даними злитків, з яких були виготовлені пластини. Виміряне 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 [11]. Отримані дані підтверджують можливість запропонованого способу визначення рекомбінаційних параметрів в пластинах Si.

Таким чином, порівняно з відомими способами, заявлюваний спосіб визначення рекомбінаційних параметрів в напівпровідниках дозволяє забезпечити можливість безконтактного експрес-контролю 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, наприклад, сонячних елементів.

Джерела інформації:

1. Рывкин С.М., Фотоэлектрические явления в полупроводниках, М.: Госиздат физ.-мат. литературы, 1963, гл. 13, 14.

2. Патент України №67130, МПК G01N 27/00.

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

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

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

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

7. 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.

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

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

10. 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.

11. 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.

12. Субашиев В.К., Петрусевич В.А., Дубровский Г.Б. Определение рекомбинационных постоянных из кривой спектрального распределения фотопроводимости // ФТП, 2, в. 5, 1960, с. 1022-1024.

