



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **108977** (13) **U**

(51) МПК (2016.01)

C30B 11/00

C30B 11/04 (2006.01)

C30B 11/12 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2016 00351	(72) Винахідник(и): Фочук Петро Михайлович (UA), Склярчук Валерій Михайлович (UA)
(22) Дата подання заявки: 16.01.2016	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.08.2016	(73) Власник(и): ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58012 (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.08.2016, Бюл.№ 15	

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТЕКТОРА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

(57) Реферат:

Спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання з випрямляючим контактом створює в напівізолюючих напівпровідниках CdTe , $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ збіднену область, яка при відсутності зворотної напруги рівна " $W(0)$ ", товщину якої можна розрахувати по відомих методиках. Напівпровідниковий кристал виготовляють товщиною " d ", яка рівна або менша $10 \times W(0)$.

UA 108977 U

Корисна модель належить до способу створення детекторів іонізуючого випромінювання з випрямляючим контактом для покращення енергетичної розрізної здатності детектора. Як відомо, така важлива характеристика напівпровідникового детектора іонізуючого випромінювання, як енергетична розрізна здатність, суттєво залежить не тільки від величини темного струму детектора, а й від напруженості електричного поля, яка створюється в кристалі, що є основою детектора. Важливо створити в кристалі високу напруженість електричного поля $E = U/d$, де d - товщина кристала, U - прикладена напруга. Висока напруженість електричного поля необхідна для ефективного збирання носіїв заряду, що створюються при поглинанні іонізуючого випромінювання. Але з другого боку, це не повинно приводити до значного зростання темного струму через детектор. Тобто для реалізації високої розрізної енергетичної здатності детектора необхідно зменшувати темновий струм і при цьому добиватись якомога вищої напруженості електричного поля в активній області детектора. В нашій корисній моделі ми пропонуємо таке конструктивне рішення, яке приводить до зменшення темного струму детектора при збереженні високої напруженості електричного поля, що таким чином, покращить його енергетичну розрізну здатність.

Відомо, що темнові струми суттєво впливають на енергетичну розрізну здатність детекторів іонізуючого випромінювання, які виготовляють на основі монокристалів $CdTe$, $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($Cd_{1-x}Mn_xTe$), далі CZT (CMT). Відомо, що для зменшення темнових струмів детекторів на основі таких напівпровідникових матеріалів, один з контактів детектора виготовлять випрямляючим [1-4]. При створенні випрямляючого контакту в кристалі детектора утворюється збіднена вільними носіями область просторового заряду, опір якої суттєво більший ніж нейтральної частини. Товщина цієї області, W , залежить від концентрації некомпенсованих домішок і прикладеної напруги наступним чином

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_0 - qU)}{q^2N}} \quad (1),$$

де N - концентрація некомпенсованих домішок, ε - відносна діелектрична проникність напівпровідника, ε_0 - електрична постійна, φ_0 - висота потенційного бар'єра з боку напівпровідника, U - прикладена напруга. Таким чином, якщо товщина кристала рівна d , то при нульовій напрузі товщина нейтральної частини, W_n , рівна

$$W_n = d - W(0),$$

де $W(0)$ - товщина збідненої області при прикладеній напрузі U , рівній нулю. Нашими дослідженнями встановлено, що співвідношення між d та $W(0)$ має важливе значення для мінімізації темного струму детектора. Встановлено, що для мінімізації темного струму, $W(0)$ має бути рівною або більшою ніж $0.1d$, тобто товщина збідненої області при відсутності напруги має займати не менше десятої частини товщини кристала.

Найближчим аналогом, є спосіб описаний в роботі [1]. В ній автори виготовляють детектор з $CdTe$ з двома контактами: один контакт з випрямляючим бар'єром Шотткі, другий контакт - омичний. Недоліками прототипу є те, що навіть не обговорюється товщина кристала та товщина збідненої області, що не дає можливості використати всі потенціальні можливості матеріалу при виготовленні детектора.

В основу корисної моделі поставлена задача покращення розрізної здатності детектора за рахунок встановлення оптимального співвідношення між товщиною кристала детектора d і товщиною збідненої області $W(0)$ при $U = 0$ В.

Таким чином, корисна модель встановлює співвідношення між товщиною кристала d і товщиною збідненої області $W(0)$ при відсутності зворотної напруги. Тобто, фактично між товщиною кристала і концентрацією некомпенсованих домішок, яка і визначає товщину збідненої області при відсутності напруги.

Поставлена задача вирішується тим, що перед виготовленням детектора, розраховують товщину збідненої області $W(0)$ по формулі (1) для $U = 0$ В. Потім розраховують оптимальну товщину кристала, яка має бути рівною $d = 10W(0)$ або бути меншою цієї величини. До кристала такої товщини на протилежних гранях виготовляють випрямляючий та омичний контакти.

Оптимізація товщини кристала суттєво змінює ВАХ: для оптимальної товщини кристала помітно зменшуються темнові струми в діапазоні важливих для роботи детектора напруг і, що дуже важливо, суттєво збільшується максимальна напруга, яку можна прикласти до детектора, що приводить до зростання напруженості електричного поля в активній області детектора. Що

без сумніву покращує не тільки розрізну енергетичну здатність, а й надійність роботи детектора. Це пов'язано з тим, що темновий струм формують два механізми: генераційний в збідненій області обернено зміщеного випрямляючого контакту і струми, обмежені просторовим зарядом (СОПЗ) в нейтральній частині кристала.

5 Запропонований спосіб відрізняється тим, що помітно зменшує темнові струми в діапазоні важливих для роботи детектора напруг і, що дуже важливо, суттєво збільшує максимальні напруги, яку можна прикласти до детектора при помірному зростанні темнового струму, що без сумніву покращує розрізну здатність та надійність його роботи.

10 Такі ознаки не зустрічаються в жодному з аналогів, що забезпечує корисній моделі необхідний новизну. Промислове використання запропонованої корисної моделі не вимагає спеціальних технологій і матеріалів, її реалізація можлива на існуючих підприємствах електронного приладобудування.

15 Послідовність виконання запропонованого процесу виготовлення детектора на монокристалах CdTe, $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($Cd_{1-x}Mn_xTe$) наступна. Перед виготовленням детектора, розраховують товщину збідненої області $W(0)$ по формулі (1) для $U=0$ В. Потім розраховують оптимальну товщину кристала, яка рівна $d=10W(0)$, або менша цієї величини. До кристала такої товщини виготовляють на протилежних гранях випрямляючий та омичний контакти.

Суть корисної моделі пояснюють креслення.

20 На Фіг. 1 приведено залежність диференційного опору R_{dif} від напруги при зворотному зміщенні структури Cr/Cd(Zn)Te/In при різній товщині кристала: 1 - 1.0 мм, 2 - 2.0 мм, 3 - 4.5 мм, 4 - 0,5 мм. Температура 293 К.

На Фіг. 2 приведено експериментальну залежність диференційного опору R_{dif} при зворотному зміщенні структури Cr/Cd(Zn)Te/In від товщини кристала.

25 На Фіг. 3 приведено залежність амплітуди фотовідгуку при опроміненні структури Cr/Cd(Zn)Te/In ізотопом ^{241}Am : 1 - з боку випрямляючого контакту (хром), 2 - з боку омичного контакту (індій). Кружки - експеримент, суцільні лінії - розрахунок. Товщина кристала 1,0 мм. Температура 293 К. $N \sim 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Приклад конкретного виконання.

30 Описаний спосіб був використаний для виготовлення детекторів іонізуючого випромінювання на кристалах $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ n-типу провідності. Перед виготовленням детектора, розраховували товщину збідненої області $W(0)$ по формулі (1) для $U=0$ В. Потім розраховували оптимальну товщину кристала, яка рівна $d=10W(0)$, або менша цієї величини. До кристала з такою товщиною виготовляли на протилежних гранях випрямляючий та омичний контакти. В нашому випадку розрахована оптимальна товщина кристала $d=1$ мм, при розмірах

35 $5 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$ ($d=1$ мм). Для порівняння виготовляли також кристали інших товщин: розміром $5 \times 5 \times 0.5 \text{ мм}^3$ ($d=0,5$ мм), $5 \times 5 \times 3 \text{ мм}^3$ ($d=3$ мм), $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$ ($d=5$ мм). Випрямляючий контакт виготовляли напилюванням хрому, омичний - напилюванням індію. Розмір металевих контактів 4×4 мм задавали молибденовими масками. Проводили виміри темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ).

40 На Фіг. 1 приведено залежність диференційного опору R_{dif} від напруги при зворотному зміщенні структури Cr/Cd(Zn)Te/In при різній товщині кристала: 1 - 1,0 мм, 2 - 2,0 мм, 3 - 4,5 мм, 4 - 0,5 мм. Температура 293 К.

45 На Фіг. 2 приведено експериментальну залежність диференційного опору R_{dif} при зворотному зміщенні структури Cr/Cd(Zn)Te/In від товщини кристала. Температура 293 К. З Фіг. 2 видно, що максимальне значення диференціального опору досягається при товщині кристала 1 мм.

Важливим параметром кристалів, який в значній мірі визначає товщину збідненої області W , є концентрація некомпенсованих домішок N . Для оцінки N , важливого параметра кристалів, які використовувались для досліджень, проводили виміри спектрів при опроміненні структури Cr/Cd(Zn)Te/In ізотопом ^{241}Am як з боку, що випрямляється, так і з боку омичного контактів. Вибір ізотопу ^{241}Am для таких вимірів обумовлений порівняно великим коефіцієнтом послаблення α_γ в Cd(Zn)Te, що дорівнює приблизно 40 см^{-1} . У цьому випадку ефективна

50 глибина проникнення радіації становить ~ 250 мкм, а на товщині кристала $d=0,5$ мм радіація слабшає приблизно в $\exp(\alpha_\gamma d) \approx 7$ разів. Очікується, що при настільки нерівномірній генерації

55 електронно-діркових пар відношення I_{sh}/I_{ohm} повинне залежати від прикладеної до детектора

напруги, особливо якщо область просторового заряду (ОПЗ) займає тільки частину товщини кристала. Через I_{ohm} і I_{sh} позначені висоти піків у спектрі при опроміненні Cd(Zn)Te детектора відповідно з боку омичного контакту й контакту, що випрямляє. Напругу змінювали в межах від 5 В до 1000 В. Отримані результати наведені на Фіг. 3.

5 Як видно з Фіг. 3, I_{sh} перевищує I_{ohm} у всьому діапазоні напруг. Для кристала n-типу провідності зворотне зміщення відповідає плюсу напруги на омичному контакті. Тому при опроміненні ізотопом ^{241}Am з боку випрямляючого контакту кращі умови для збирання заряду будуть у малорухливих дірок, які будуть рухатися до негативного електрода по більш короткому шляху, ніж електрони.

10 Для оцінки величини N , експериментальні результати порівнювали з розрахунковими, у яких підгінним параметром служила величина N . Для врахування рекомбінаційних втрат при розрахунку ефективності детектора використовували рівняння Хехта й закон Бугера.

15 Якщо знехтувати поверхневою рекомбінацією на фронтальній поверхні кристала, дрейфову компоненту ефективності детектування діода Шотткі для енергій фотонів ~ 60 кеВ можна представити виразом:

$$\eta_{sh}^{drift} = \int_0^W \alpha_\gamma \exp(-\alpha_\gamma \cdot x) \eta_H(x) dx, \quad (2)$$

де α_γ - лінійна складова коефіцієнта фотоелектричного поглинання X/γ -випромінювання.

Рекомбінацію (захоплення) фотогенерованих носіїв заряду можна врахувати, скориставшись рівнянням Гехта для напівпровідника n-типу :

$$20 \quad \eta_H(x) = \frac{\lambda_n}{W} \left[1 - \exp\left(-\frac{x-W}{\lambda_n}\right) \right] + \frac{\lambda_p}{W} \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda_p}\right) \right], \quad (3),$$

де x - координата, де виникає електронно-діркова пара, середні довжини дрейфу для електронів $\lambda_n = \tau_n \mu_n E$ і дірок $\lambda_p = \tau_p \mu_p E$, E - напруженість електричного поля в ОПЗ, τ_n, τ_p - часи життя електронів і дірок в ОПЗ, μ_n та μ_p - рухливості електронів і дірок відповідно. У діоді типу метал-напівпровідник (контакт Шотткі) електричне поле неоднорідне, але врахування неоднорідності спрощується, оскільки напруженість поля лінійно зменшується з координатою x , тобто на ділянках $(0, x)$ і (x, W) напруженість поля у виразах для λ_n і λ_p можна замінити величинами $(\varphi_0 - q)(2 - x/W)/q$ і $(\varphi_0 - q)(1 - x/W)/q$, відповідно.

При опроміненні з боку омичного контакту рекомбінацією на поверхні, що прилягає до контакту Шотткі, можна знехтувати, тому...

30 Проведені розрахунки показали, що внесок дифузійної компоненти є вагомим тільки у діапазоні напруг 0 В \sim 1 В. Для спрощення розрахунків, починаючи з напруг ~ 10 В внеском дифузійної компоненти можна знехтувати. При розрахунках приймали $\mu_n = 900 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}$, $\mu_p = 80 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}$, $\tau_n = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $\tau_p = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $\varphi_0 = 0,4 \text{ еВ}$. Часи життя були знайдені з вимірів α -спектрів. Результати розрахунку наведені на Фіг. 3 суцільними лініями. Зрозуміло, що по осі ординат побудована величина пропорційна ефективності. Тому результати розрахунку і експерименту були "зшиті", але тільки для верхньої кривої. Добрий збіг експерименту (кружки) і розрахунку (суцільні лінії) спостерігається при для $N \sim 1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. При такому N вже при $U = 0$ В, $W \sim 0,1$ мм, при напрузі 500 В, $W \sim 1,6$ мм. Таким чином, при напрузі 0 В, збіднена область займає 0,1d, тобто десятю частину товщини кристала, товщиною

40 1 мм.

Джерела інформації:

1. Funaki M., Ando Y., Jinnai R., Tachibana A. and Ohno R.. Development of CdTe detectors in Acrorad. Acrorad Co., Ltd.

45 2. C. Matsumoto, T. Takahashi, K. Takizawa, R. Ohno, T. Ozaki, K. Mori. IEEE Trans. Nucl. Sci. - 1998. - Vol. 45(3). - P. 428-432.

3. Prokesch M., Szeles C. Accurate measurement of electrical bulk resistivity and surface leakage of CdZnTe radiation detector crystals // J. Appl. Phys. - 2006. - Vol. 100. - P. 014503-014503-8.

4. Sato G., Takahashi T., Sugiho M., et al. Characterization of CdTe/CdZnTe detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci. - 2001. - Vol. 49. - P. 1258-1263.

50

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 Спосіб виготовлення детектора іонізуючого випромінювання з випрямляючим контактом, який створює в напівізолюючих напівпровідниках CdTe , $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ збіднену область, яка при відсутності зворотної напруги рівна " $W(0)$ ", товщину якої можна розрахувати по відомих методиках, який **відрізняється** тим, що напівпровідниковий кристал виготовляють товщиною " d ", яка рівна або менша $10 \times W(0)$.

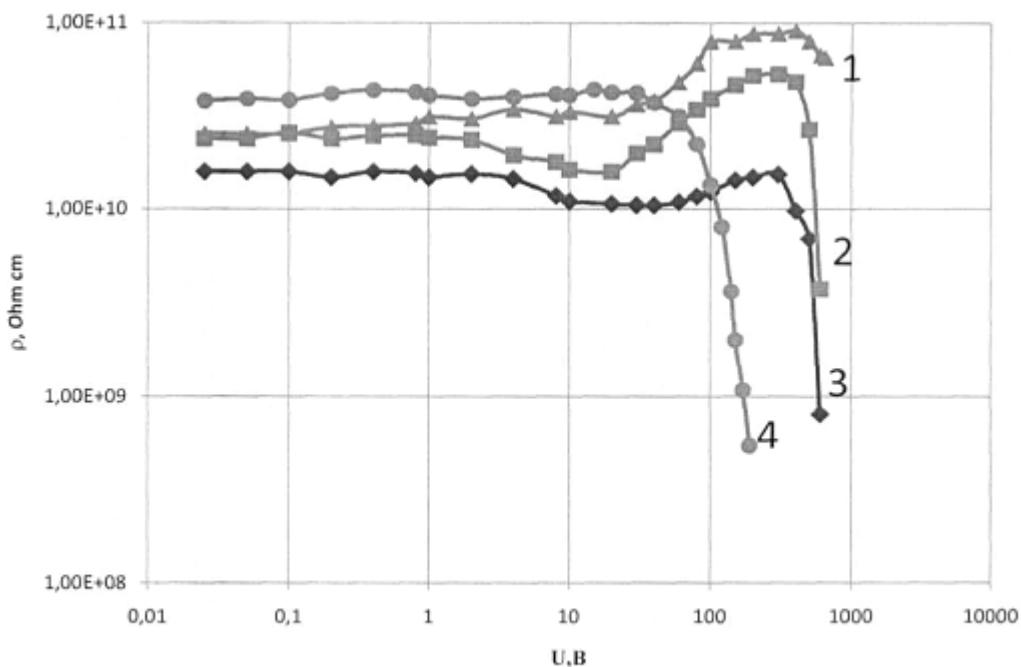


Fig. 1

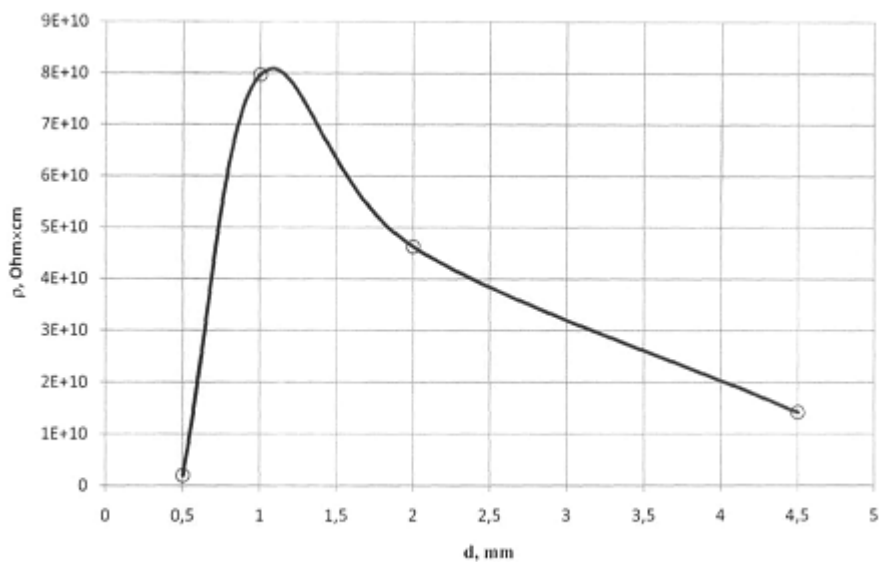


Fig. 2

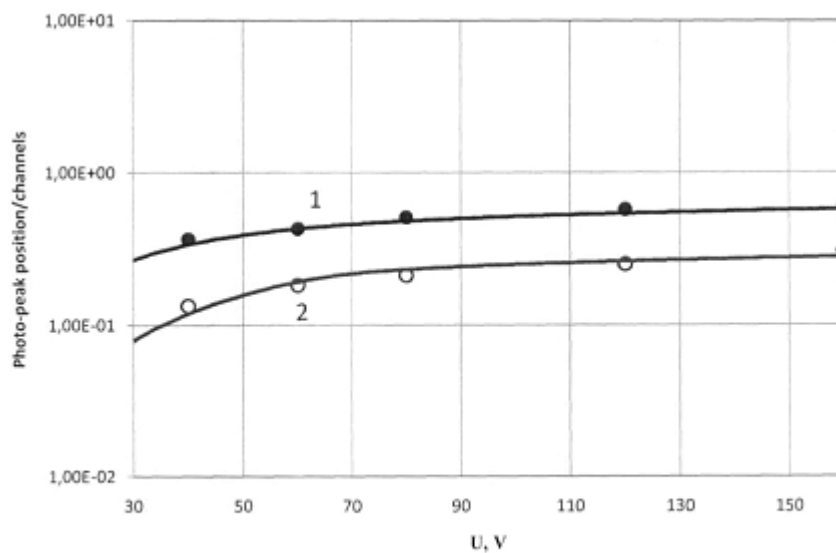


Fig. 3

Комп'ютерна верстка А. Крулевський

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