

ТЕМНОВИЙ СТРУМ ТА НИЗЬКОЧАСТОТНИЙ ШУМ В InAs- ТА InSb-ФОТОДІОДАХ

Д. ф.-м. н. В. В. Тетьоркін¹, к. т. н. А. І. Ткачук², А. В. Сукач¹

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, м. Київ;

²Центральноукраїнський державний педагогічний університет

ім. В. Винниченка, м. Кропивницький

Україна

atkachuk08@meta.ua

Із досліджень температурних залежностей ВАХ та диференційного опору встановлено, що транспорт носіїв заряду в дифузійних InSb- та InAs-фотодіодах задовільно пояснюється в рамках моделі неоднорідного p-n-переходу. Показано, що найбільш ймовірною причиною надлишкового темного струму та низькочастотного 1/f-шуму є тунельний струм через неоднорідні ділянки p-n-переходу, зумовлені протяжними дефектами (дислокаціями, преципітатами). Запропоновано модель 1/f-шуму, згідно з якою шумовий струм за низької температури виникає внаслідок флуктуацій тунельного обміну носіями між дислокаційними та зонними станами.

Ключові слова: інфрачервоний фотодіод, InSb, InAs, низькочастотний шум.

Антимонід та арсенід індію є базовими матеріалами сучасної інфрачервоної фотоелектроніки, які широко використовуються для виготовлення фотоприймачів, світлодіодів та лазерів [1]. Розробки квантово-розмірних структур з використанням вказаних матеріалів спрямовано на створення якісно нової елементної бази з покращеними характеристиками. Встановлення природи низькочастотного шуму у вказаних структурах залишається актуальною проблемою, яка має прикладний і фундаментальний характер [2]. Метою даної роботи стало дослідження та розробка моделі низькочастотного шуму в дифузійних InAs- та InSb-фотодіодах, яка б дозволила пояснити результати експериментальних досліджень температурних залежностей їхніх темнових струмів.

InAs- та InSb-p-n-переходи виготовлялись методом дифузії Cd у монокристалічні підкладки n-типу провідності. Поверхню мезаструктурних фотодіодів пасивували у водному розчині $(\text{NH}_4)_2\text{S}$. Досліджували фотодіоди зі свіжоприготовленою (не пасивованою) та пасивованою поверхнями. Детально технологія виготовлення фотодіодів та методика їх досліджень описана у [3, 4].

Типові залежності прямого струму від температури та зміщення в отриманих фотодіодах показані на рис. 1, 2. За низьких значень температури у темновому струмі переважає тунельна складова, а за високих — активаційна, зумовлена дифузійним та генераційно-рекомбінаційним механізмом переносу заряду. За температури 77 К тунельна складова струму переважає при невеликих прямих напругах зміщення, а при більш високих — рекомбінаційна. Для пояснення експериментальних результатів запропоновано модель неоднорідного переходу, у якій тунельний і генераційно-рекомбінаційний струми протікають різними ділянками області просторового заряду (ОПЗ). Отримано експериментальні докази того, що неоднорідний розподіл дефектів може бути викликано дислокаціями, які перетинають ОПЗ [5]. Встановлено, що ультразвукова обробка зумовлює істотне зростання тунельної компоненти струму і лише слабку зміну генераційно-рекомбінаційної компоненти.

Прямі ВАХ фотодіодів можна представити як суму тунельного і рекомбінаційного струмів:

$$I = I_{01} \exp\left(\frac{eU - IR_S}{E_0}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{eU - IR_S}{kT}\right),$$

де E_0 — характеристична енергія; β — коефіцієнт неідеальності; R_S — послідовний опір. Множник I_{01} слабо залежить від температури, що вказує на його тунельну природу, в той час як I_{02} активаційно залежить від температури. Характеристична енергія E_0 за температури 77 К у InAs фотодіодах змінювалась у межах від 30 до 60 меВ. Основний результат досліджень спектрів шуму зводиться до наступного. За температур, близьких до кімнатної, шум виникає внаслідок флуктуацій рухливості носіїв заряду і пояснюється в рамках теоретичної моделі, розробленої у [6].

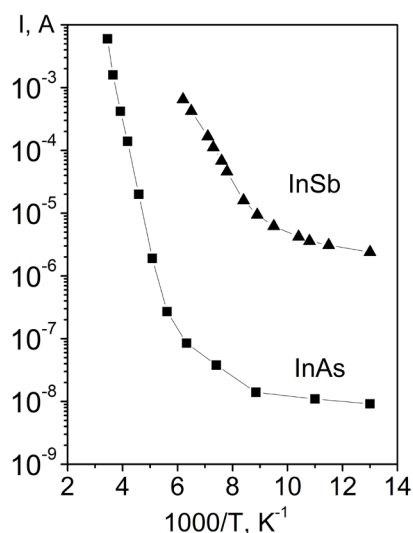


Рис. 1. Температурні залежності прямого струму в InAs та InSb фотодіодах ($U = 10$ мВ)

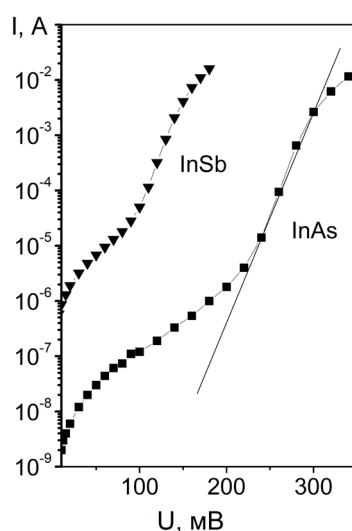


Рис. 2. Прямі ВАХ InAs та InSb фотодіодів при 77 К (пряма лінія – розрахунок рекомбінаційного струму)

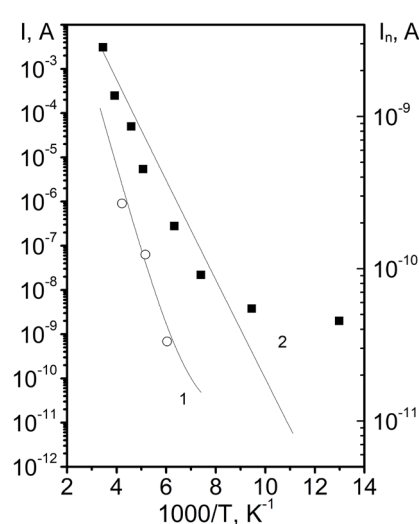


Рис. 3. Температурна залежність темного I (■) та шумового I_n (○) струмів InAs-фотодіода; 1 – розрахунок шумового струму згідно з [6]; 2 – розрахунок рекомбінаційного струму

Узгодження між розрахованими та експериментальними результатами досягається для значень постійної Хоуга (Hooge) $\alpha_H \approx 10^{-4} - 10^{-5}$ (рис. 3). Частота, за якої надлишковий шум типу $1/f$ порівнювався з так званим білим шумом, була вищою у фотодіодах з меншим диференціальним опором. Низькочастотний шум у досліджених фотодіодах пояснюється модуляцією провідності ОПЗ, спричиненої дислокаціями, які виникають у процесі їх виготовлення. Тунельна складова темного струму може бути зумовлена транспортом носіїв заряду як вздовж ядра дислокацій, так і тунельним обміном носіями між електронними станами дислокацій та станами енергетичних зон. У такому випадку параметр E_0 відображає енергію тунельних переходів між вказаними станами. Її флуктуації зумовлюють флуктуації числа носіїв заряду та струмовий шум фотодіодів.

Таким чином, запропонована модель $1/f$ -шуму дозволяє пояснити результати досліджень температурних залежностей темного та шумового струмів дифузійних InAs- та InSb-фотодіодів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M. et al. InAsSb-Based Infrared Photodetectors: Thirty Years Later On. *Sensors*, 2020, 20, 7047.
2. Ciuraa L., Kopytko M., Martyniuk P. Low-frequency noise limitations of InAsSb-, and HgCdTe-based infrared detectors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 305, 111908.
3. Tetyorkin V., Sukach A., Tkachuk A. InAs infrared photodiodes. In *Advances in photodiode*. Ed. Gian-Franco Dalla Betta. *INTECH*, 2011, p. 427–446.
4. Sukach A.V., Tetyorkin V.V., Tkachuk A.I. Electrical properties of InSb p-n junctions prepared by diffusion methods. *SPQEO*, 2016, 19(3), p. 295–298.
5. Сукач А.В., Тетеркин В.В. Трансформация электрических свойств InAs p-n-переходов в результате ультразвуковой обработки. *Письма в ЖТФ*, 2009, т. 35, №11, с. 67–75.
6. Kleinpenning T. G. M. $1/f$ noise in p-n-junction diodes. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1985, A3 (1), p. 176182.

V. V. Tetyorkin, A. I. Tkachuk, A. V. Sukach

Dark current and low-frequency noise in InAs and InSb photodiodes

The experimental studies of current-voltage, capacitance-voltage characteristics and differential resistance as a function of temperature allowed establishing that the transport of charge carriers in diffused InSb and InAs photodiodes is satisfactorily explained within the framework of the inhomogeneous p-n-junction. It is shown that the most probable cause of excess dark current and low-frequency $1/f$ noise is the tunnel current through inhomogeneous parts of the p-n-junction caused by extended defects such as dislocations and precipitates. A model of $1/f$ noise is proposed, according to which the noise current at low temperatures arises due to fluctuations of tunnel exchange of carriers between dislocation and band states.

Keywords: infrared photodiode, InSb, InAs, low frequency noise.