

В.М. Катеринчук¹, Б.В. Кушнір¹, З.Р. Кудринський¹, З.Д. Ковалюк¹,
І.Г. Ткачук¹, О.С. Литвин²

Топологія та фотоелектричні властивості гетероструктури p-GaTe – n-InSe

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Чернівецьке відділення,
вул. І. Вільде, 5, Чернівці, 58001, e-mail: chimpsp@ukrpost.ua

² Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, пр. Науки, 41, Київ, 03028

Досліджені фотоелектричні властивості гетеропереходів p-GaTe – n-InSe, що сформовані методом механічного контакту окисленої пластини GaTe з ван-дер-ваальсовою поверхнею InSe. За допомогою АСМ-зображень встановлено, що на гетерограниці p-GaTe – n-InSe присутній тонкий діелектричний шар власного оксиду Ga₂O₃. Побудована енергетична зонна діаграма гетеропереходу. Встановлено, що гетероперехід p-GaTe – n-InSe володіє fotocутливістю в діапазоні 0,74 - 1,0 мкм.

Ключові слова: InSe, GaTe, шаруваті кристали, гетеропереходи, АСМ-зображення, спектральні характеристики.

Стаття поступила до редакції 08.07.2016; прийнята до друку 05.12.2016.

Вступ

Шаруваті кристали групи A³B⁶ є перспективними матеріалами для створення гетеропереходів на їх основі [1-4]. Типовими представниками цих кристалів є, зокрема, селенід індію і телурид галію. Ці матеріали з різною симетрією і періодами кристалічної ґратки дозволяють методом ван-дер-ваальсового контакту їх поверхонь створювати якісні гетероструктури [4-6].

Телурид галію відрізняється від більшості інших сполук цієї групи можливістю отримання монокристалів з відносно невеликими значеннями питомого опору. Завдяки цим обставинам можна виготовляти гетеропереходи (ГП) з низьким послідовним опором. Крім цього, GaTe при створенні гетеропереходів p-GaTe – n-InSe відіграє роль фронтального напівпровідника. Він не перешкоджає проходженню квантів світла з енергією меншою, ніж ширина його забороненої зони та зумовлює утворення p-n переходу переважно в підкладці n-

InSe, де відбувається поглинання і розділення фотогенерованих носіїв заряду [7-8].

І. Зразки та методика експерименту

Шаруваті кристали вирощувалися методом Бріджмена з нестехіометричного складу, а саме Ga₆Te₅ і In_{1.03}Se_{0.97}. Електрофізичні параметри вихідних кристалів показані в таблиці 1.

Окислені пластини GaTe і свіжосколоті пластини InSe приводились в тісний механічний контакт згідно з методикою, описаною в роботах [1-2]. Дослідження поверхні шаруватих кристалів GaTe і InSe здійснювались за допомогою атомно-силової мікроскопії (Nanoscope IIIa Dimension 3000 SPM (Digital Instruments, USA). Вольт-амперні (ВАХ) характеристики гетеропереходів досліджувалися на установці Schlumberger SI 1255 з комп'ютерним інтерфейсом. Спектри fotocутливості виготовлених гетеропереходів отримувалися за допомогою монохроматора МДР-3 з роздільною здатністю

Table 1

Electrophysical parameters of GaTe and InSe

Crystal	Type conductivity	n(p), cm ⁻³	μ, cm ² /(В·с)	σ _{⊥C} , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹
GaTe	p	10 ¹⁶	10 ²	1,6·10 ⁻¹
InSe	n	(1-2)·10 ¹⁴	8·10 ²	1,3·10 ⁻²

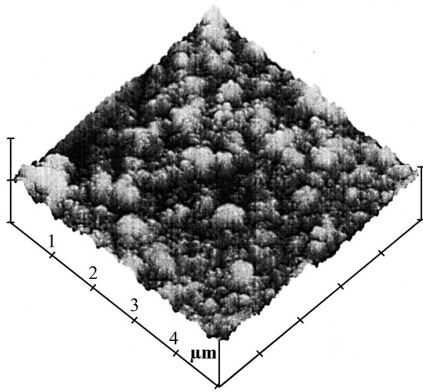


Fig. 1. 3D AFM image of the surface of the GaTe oxidized at 400 °C for 4 hours in air.

2,6 нм/мм. Всі спектри нормувалися відносно кількості падаючих фотонів.

II. Результати та їх обговорення

На рис. 1 показано 3D AFM-зображення поверхні GaTe, окисленої при 400°C протягом 4 годин на повітрі. Так як кристали мають шарувату будову, в якій кожен шар складається з моноатомних шарів у послідовності Te-Ga-Ga-Te, то взаємодія між шарами

здійснюється силами Ван-дер-Ваальса через зв'язки Te-Te. При сколюванні та окисленні кристалів насамперед повинні утворюватися оксиди телуру, а потім і оксиди галію. Але висока температура окислення сприяє сублімації і розпаду оксидів телуру. Тому, утворений при таких температурах оксидний шар, відповідає триоксиду галію - Ga₂O₃.

Як видно з рис. 1, поверхня оксиду не є рівною площиною, а має куполоподібну форму. Це свідчить про те, що при окисленні поверхні утворюються безліч зародкових центрів оксиду. Внаслідок окислення та за рахунок їх розростання, молекули оксиду набувають форм, при яких вільна поверхнева енергія стає найменшою. Так як вільна енергія пропорційна коефіцієнту поверхневого натягу і площі, то вона досягається за умови, що молекули оксиду приймають сферичну форму, при якій площа поверхні є найменшою. Внаслідок розширення зародків оксиду можливі процеси їх коалесценції і утворення агломератів великих розмірів. Як показує дане зображення, сформовані агломерати не мають впорядкованого характеру. Латеральні розміри і висота скупчень оксиду різні і коливаються в межах 250 - 500 ± 25 нм, відповідно. Це видно з профілограми довільно обраного нормального перерізу поверхні оксиду, показаного на рис. 2.

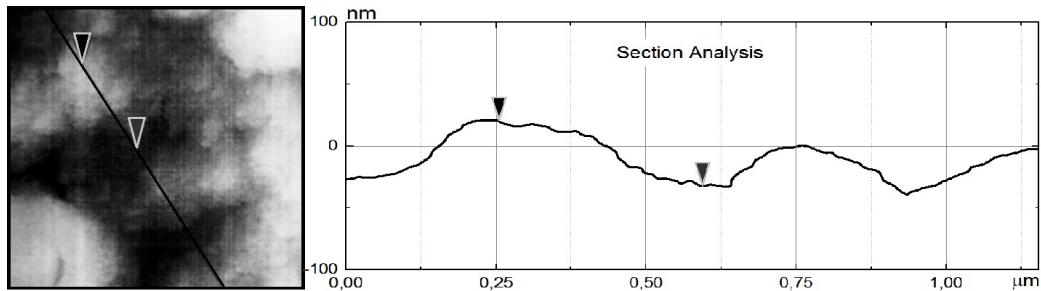


Fig. 2. Profiling image randomly selected normal section of the surface of the GaTe oxidized at 400°C for 4 hours in air.

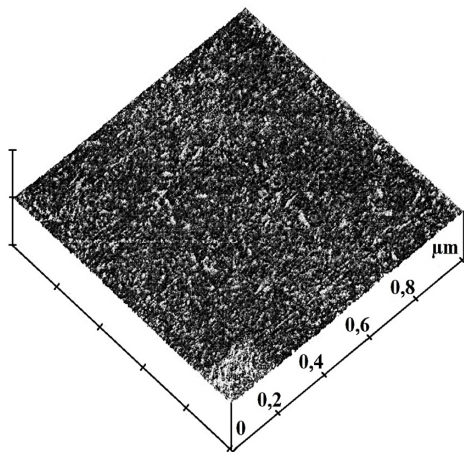


Fig. 3. AFM-image of a fragment of the sample surface obtained after removal of the crystals InSe.

На рис. 3 наведено АСМ-зображення фрагмента поверхні зразка, отриманого після сколювання кристалів InSe (0001). Середньоарифметичне значення шорсткості R_a неокисленої підкладки становило ~ 0,053 нм, тобто таку поверхню можна вважати атомарно-рівною. Дослідження особливостей шорсткості оксиду і кристалу показують їх значні розбіжності. У той же час, при контакті поверхонь GaTe і InSe вони утримуються силами Ван-дер-Ваальса і гетероконтакт міцний навіть при великих температурних перепадах.

На рис. 4 показано спектр квантової ефективності фотоструму (а) і пряма гілка ВАХ гетеропереходу p-GaTe – n-InSe (b). Як видно з рис. 4, (а), спектр fotocутливості гетеропереходу має вигляд смуги, обмеженої з двох сторін: низькоенергетичний край спектра визначається поглинанням світла в InSe, а високоенергетичний – GaTe. Зміна величини квантової ефективності фотоструму викликано

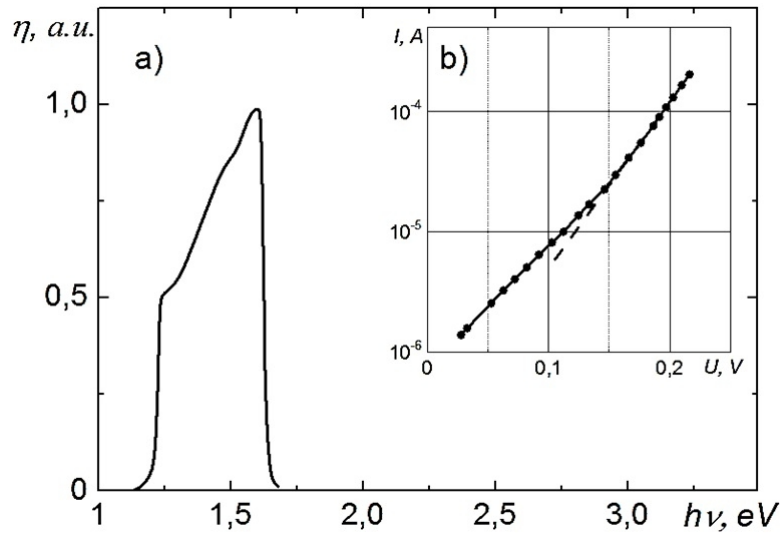


Fig. 4. The spectrum of the quantum efficiency of the photocurrent (a) and the direct branch of the CVC of the heterojunction p-GaTe n-InSe (b).

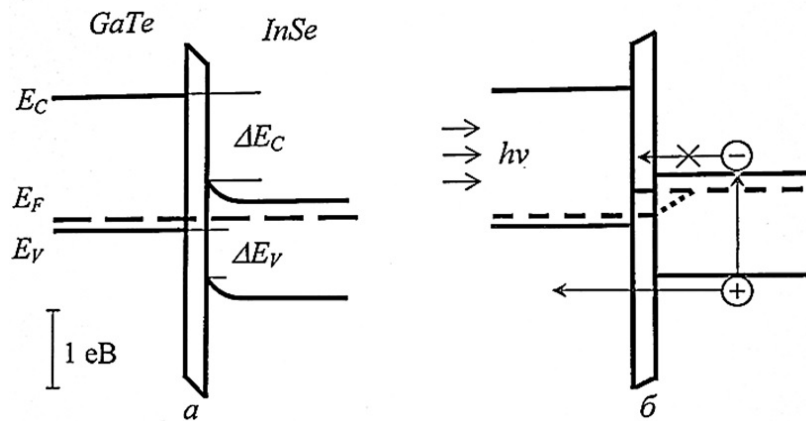


Fig. 5. Energy band diagram GP p-GaTe n-InSe thin dielectric on heteromer: a) equilibrium; b) in non-equilibrium conditions, corresponding to a situation of flat zones.

збільшенням коефіцієнта поглинання світла в InSe і, відповідно, поліпшенням коефіцієнта збирання фотоносіїв. Рис. 4, (b) показує, що в напівлогарифмічних координатах ВАХ - лінійна. Це дозволяє визначити діодний коефіцієнт ВАХ з її нахилу, який близький до одиниці і дорівнює 1,07. Температурні вимірювання в області 210 – 300 K свідчать про те, що значення діодного коефіцієнта зберігається. Отже, близькі до одиниці значення цього коефіцієнта свідчать з одного боку, про високу якість р-n-переходів, а з іншого - про механізм переносу носіїв заряду через бар'єри цих гетеропереходів, який визначається їх дифузією.

У ГП з розривами зон та спеціально введеним тунельно-прозорим діелектричним прошарком можлива ситуація, коли фото-ерс насичення може перевищувати дифузійний потенціал переходу. На рис. 5 зображена зонна діаграма ГП p-GaTe - n-InSe. При її побудові збережений масштаб використаних енергетичних величин: дані про E_g , глибина залягання рівнів Фермі у відповідних напівпровідниках, величина вигину зон. Концентрації дірок в p-GaTe і електронів в n-InSe визначалися з холівських вимірювань та приведені в таблиці 1.

Ширини заборонених зон GaTe і InSe при кімнатній температурі відповідно дорівнюють 1,66 і 1,25 eV. Для коректного визначення дифузійного потенціалу ϕ_0 використовувалася методика, згідно з якою смісні напруги відсічок при різних частотах апроксимувалися до значення при нульовій частоті. В результаті значення ϕ_0 склало 0,25 eV. Глибина залягання рівнів Фермі - 0,14 eV для GaTe і 0,2 eV для InSe. Тому розриви дозволених зон становили: $\Delta E_C = 1,11$ eV; $\Delta E_V = 0,6$ eV.

Як видно з цієї діаграми, прямий струм через р-n-перехід визначається моноінжекцією дірок з GaTe в InSe завдяки меншій величині ΔE_V . У нерівноважних умовах випрямлення зон, появі додаткової фото-ерс також сприяє невідповідність розміщення енергетичних рівнів у валентній зоні, тобто ΔE_V .

Теоретично додаткова різниця потенціалів може рости до тих пір, поки переходи носіїв заряду з вищих енергетичних рівнів на нижчі не врівноважаться зворотними переходами під дією електричного поля. Фото-ерс, що додатково виникає при цьому, прикладена до діелектричного шару. Максимальна фото-ерс повинна складати 0,85 V, проте в даному типі ГП не спостерігалось таких високих значень. Причиною цього може служити

наявність поверхневих рекомбінаційних центрів, нехтувати якими неможливо порівняно з ГП GaSe-InSe [9]. У випадку GaSe-InSe ми спостерігали додаткову фото-ерс насичення.

Слід зазначити, що з аналізу літературних джерел випливає, що спроба створення подібного ГП GaTe - InSe здійснювалася в [10], однак основна увага авторів цієї роботи приділялась дослідженню спектральних характеристик ГП, а не його діодним властивостями.

Висновки

Проведені дослідження гетеропереходів показують, що вони володіють високими діодними властивостями і фоточутливістю в інтервалі довжин хвиль 0,74 - 1,0 мкм. З допомогою АСМ-мікроскопії виявлена присутність на гетеромержі p-GaTe – n-InSe

тонкого шару власного оксиду Ga₂O₃. Він володіє діелектричними властивостями і в межах десятків нанометрів є тунельно-прозорим для носіїв заряду. Побудована енергетична зонна діаграма гетероперехода p-GaTe – n-InSe з тонким діелектриком на гетерограниці.

Катеринчук В.М. - кандидат фізико-математичних наук;

Кушнір Б.В. – аспірант;

Кудринський З.Р. - кандидат фізико-математичних наук;

Ковалюк З.Д. - доктор фізико-математичних наук, професор;

Ткачук І.Г. – аспірант;

Литвин О.С. - кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

- [1] V.N. Katerinchuk, M.Z. Kovaljuk, A.D. Ogorodnik, Neorg. mater. 32 (8), 937 (1996).
- [2] V.L. Bakumenko, Z.D. Kovaljuk, L.N. Kurbatov, V.G. Tagaev, V.F. Chishko, FTP 14 (6), 1115 (1980).
- [3] Z.D. Kovaljuk, Fizicheskie osnovy poluprovodnikovogo materialovedeniya (Kiev, Naukova dumka, 1986).
- [4] V.N. Katerinchuk, Z.R. Kudrinskij, Z.D. Kovaljuk, FTP 49 (5), 612 (2015).
- [5] A. K. Geim and I. V. Grigorieva, Van der Waals heterostructures (Manchester, Nature, 2013) v. 499, p. 419.
- [6] K. S. Novoselov, A. H. Castro Neto, Phys. Scr. 146, 014006 (2012).
- [7] A.G. Milnes, D.L. Feucht. Heterojunction and metal-semiconductor junction (New York, Academic Press, 1972).
- [8] N. Balakrishnan, Z. R. Kudrynskyi, M. W. Fay, G. W. Mudd, S. A. Svatek, O. Makarovskiy, Z. D. Kovalyuk, L. Eaves, P. H. Beton, A. Patanu, Advanced Optical Materials 2(11), 1064 (2014).
- [9] V.M. Katerinchuk, Z.D. Kovaljuk, M.V. Tovarnic'kij, Ukr. fiz. zh. 45(1), 87 (2000).
- [10] K. Davletov, F. Ragimov, FTP 16(9), 1631 (1982).

V.M. Katerinchuk¹, B.V. Kushnir¹, Z.R. Kudrynskyi¹, Z.D. Kovalyuk¹,
I.G. Tkachuk¹, O.S. Litvin²

Topology and Photoelectric Properties of Heterostructure p-GaTe – n-InSe

¹Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Chernivtsi Department, 5, Iryna Vilde Str., Chernivtsi, 58001

²Lashkarev Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine, Nauki Ave. 45, 03028 Kyiv, Ukraine

We investigated the photoelectrical properties of the heterojunctions p-GaTe – n-InSe fabricated by the method of mechanical contact of GaTe oxidized plate with van der Waals surface of InSe. The AFM-images revealed that there was formed thin oxide dielectric layer of Ga₂O₃ on the heterointerface p-GaTe – n-InSe. The energy band diagram was constructed. It was established that the p-GaTe – n-InSe heterojunction is photosensitive in the spectral range 0,74 - 1,0 μm.

Key words: InSe, GaTe, layered crystals, heterojunction, AFM-images spectral characteristics.