

Катеринчук Валерій Миколайович, канд. фіз.-мат. наук

Кушнір Богдан Валерійович, аспірант

Кудринський Захар Русланович, канд. фіз.-мат. наук

Ковалюк Захар Дмитрович, д-р фіз.-мат. наук

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Чернівецьке відділення

Литвин Оксана Степанівна, канд. фіз.-мат. наук

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

Катеринчук Валерий Николаевич, канд. физ.-мат. наук

Кушнир Богдан Валерьевич, аспирант

Кудринский Захар Русланович, канд. физ.-мат. наук

Ковалюк Захар Дмитриевич, д-р физ.-мат. наук

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Черновицкое отделение

Литвин Оксана Степановна, канд. физ.-мат. наук

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины

Valery N. Katerynychuk, *Cand. Sc. (Phys. & Math.)*

Bohdan V. Kushnir, *postgraduate*

Zakhar R. Kudrynskyi, *Cand. Sc. (Phys. & Math.)*

Zakhar D. Kovalyuk, *Dr. Phys. & Math. Sc.*

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Chernivtsi Department

Oksana S. Lytvyn, *Cand. Sc. (Phys. & Math.)*

Lashkarev Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine

ФОТОЧУТЛИВА ГЕТЕРОСТРУКТУРА

GaTe – НАНОСТРУКТУРОВАНІЙ ДІЕЛЕКТРИК – INSE

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРА

GaTe – НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЙ ТОНКИЙ ДИЭЛЕКТРИК – InSe

PHOTOSENSITIVE HETEROSTRUCTURE OF

GaTe – THIN NANOSTRUCTURED DIELECTRIC – InSe

Анотація: Гетероструктура p-GaTe – n-InSe сформована методом механічного контакту окисленої пластини GaTe з ван-дер-ваальсовою поверхнею InSe. За допомогою АСМ-зображень досліджено топологію поверхні шаруватих кристалів GaTe і InSe. Показано, що на гетеромежі p-GaTe – n-InSe присутній тонкий діелектричний шар власного оксиду Ga₂O₃. Наведена пряма гілка вольт-амперної характеристики показує, що гетероперехід вологіє високими гідними властивостями. Встановлена область спектральної фоточутливості гетероструктури p-GaTe – n-InSe і показані особливості її зонної енергетичної діаграми.

Ключові слова: селенід індію, шаруваті кристали, гетеропереходи, АСМ-зображення, спектральні характеристики.

Аннотация: Гетероструктура p-GaTe – n-InSe сформирована методом механического соприкосновения окисленной пластины GaTe с ван-дер-ваальсовой поверхностью InSe. С помощью АСМ-изображений исследована топология поверхности слоистых кристаллов GaTe и InSe. Показано, что на гетерогранице p-GaTe – n-InSe присутствует тонкий диэлектрический слой собственного оксида Ga₂O₃. Приведенная прямая ветвь вольт-амперной характеристики показывает, что гетеропереход обладает высокими гидными свойствами. Установлена область спектральной фоточувствительности гетероструктуры p-GaTe – n-InSe и показаны особенности ее зонной энергетической диаграммы.

Ключевые слова: селенид индия, слоистые кристаллы, гетеропереходы, АСМ-изображения, спектральные характеристики.

Summary: Heterostructure *p*-GaTe – *n*-InSe was prepared by the method of mechanical contact of GaTe oxidized plate with van der Waals surface of InSe. Topology of surfaces of GaTe and InSe layered crystals were studied by using AFM-images. It is shown that there was formed thin oxide dielectric layer of Ga₂O₃ on the heterojunction *p*-GaTe – *n*-InSe. The direct branch of the current-voltage characteristics of the heterostructure show high diode properties. Sensitivity spectral area of *p*GaTe – *n*-InSe heterostructure was identified and the characteristics of its energy band diagram were shown.

Key words: indium selenide, layered crystals, heterojunction, AFM-images spectral characteristics.

Введение

Слоистые кристаллы группы A³B⁶ являются перспективными материалами для создания гетеропереходов на их основе [1–4]. Типичными представителями этих кристаллов являются, в частности, селенид индия и теллурид галлия. Эти материалы с разной симметрией и периодами кристаллической решетки позволяют методом ван-дер-ваальсового контакта их поверхностей создавать качественные гетероструктуры [4–6].

Теллурид галлия отличается от большинства других соединений этой группы возможностью получения монокристаллов с относительно низкими значениями удельного сопротивления. Благодаря этим обстоятельствам можно изготавливать гетеропереходы (ГП), последовательное сопротивление которых незначительное. Кроме этого, GaTe при создании гетеропереходов *p*-GaTe – *n*-InSe играет роль фронтального полупроводника. Он не препятствует прохождению квантов света с энергией меньшей, чем ширина его запрещенной зоны и приводит к образованию *p*-*n* перехода преимущественно в подложке *n*-InSe, где происходит поглощение и разделение фотогенерированных носителей заряда [7–8].

Образцы и методика эксперимента

Слоистые кристаллы выращивались методом Бриджмена с нестехиометрического состава, а именно Ga₆Te₅ и In_{1.03}Se_{0.97}. Электрофизические параметры этих кристаллов показаны в таблице.

Таблица.

Электрофизические параметры GaTe и InSe

Кристалл	Тип проводимости	<i>n</i> (<i>p</i>), см ⁻³	μ, см ² /(В·с)	σ _{⊥с} , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹
GaTe	<i>p</i>	10 ¹⁶	10 ²	1,6·10 ⁻¹
InSe	<i>n</i>	(1–2) ·10 ¹⁴	8·10 ²	1,3·10 ⁻²

Оксисленные пластины GaTe и свежосколотые пластины InSe приводились в тесный механический контакт, согласно методике, описанной в работах [1–2].

Исследование поверхности слоистых кристаллов GaTe и InSe проводилось с помощью атомно-силовой микроскопии (Nanoscope IIIa Dimension 3000 SPM (Digital Instruments, USA)).

Вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики гетеропереходов исследовались на установке Schlumberger SI 1255 с компьютерным интерфейсом. Спектры фоточувствительности изготовленных гетеропереходов исследовались с помощью монохроматора МДР-3 с разрешением 2,6 нм/мм. Все спектры нормировались относительно количества падающих фотонов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показано 3D AFM-изображение поверхности GaTe, окисленной при 400°С в течение 4 часов на воздухе. Так как кристаллы имеют слоистое строение, в котором каждый слой состоит из моноатомных слоев в последовательности Те-Ga-Ga-Те, то взаимодействие между слоями осуществляется силами Ван-дер-Ваальса через связи Те-Те. При скалывании и окислении кристаллов прежде всего должны образовываться оксиды теллура, а затем и оксиды галлия. Но высокая температура окисления способствует сублимации и распаду оксидов теллура. Поэтому образующийся при таких температурах оксидный слой соответствует триоксиду галлия – Ga₂O₃.

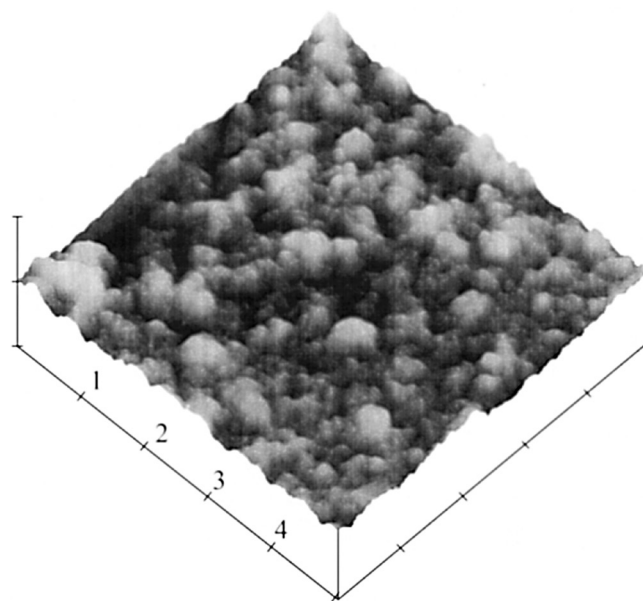


Рис. 1. 3D AFM-изображение поверхности GaTe, окисленной при 400°С в течение 4 часов на воздухе. Как видно из рис. 1 поверхность оксида не является ровной плоскостью, а имеет куполообразную

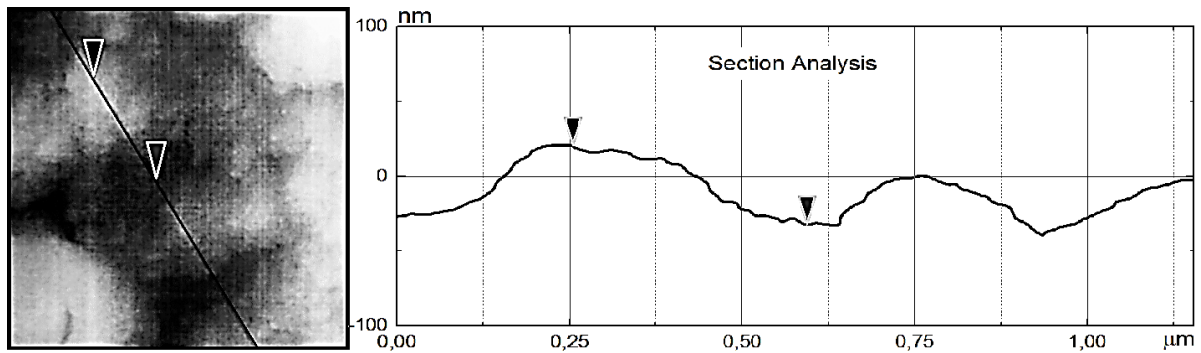


Рис. 2. Профилограмма произвольно выбранного нормального сечения поверхности GaTe, окисленной при 400°C в течение 4 часов на воздухе

форму. Это свидетельствует о том, что при окислении поверхности образуются множество зародышевых центров оксида. Вследствие окисления и за счет их роста происходит приобретение молекулами оксида форм, при которых свободная поверхностная энергия становится наименьшей. Так как свободная энергия пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения и площади, то она достигается при условии, что молекулы оксида принимают сферическую форму, при которой площадь поверхности является наименьшей. Вследствие расширения зародышей оксида возможные процессы их коалесценции и образования агломератов больших размеров. Как показывает данное изображение сформированные агломераты не имеют упорядоченного характера. Латеральные размеры и высота скоплений оксида различна и колеблется в пределах 250–500 и ± 25 нм, соответственно. Это видно из профилограммы произвольно выбранного нормального сечения поверхности оксида, показанного на рис. 2.

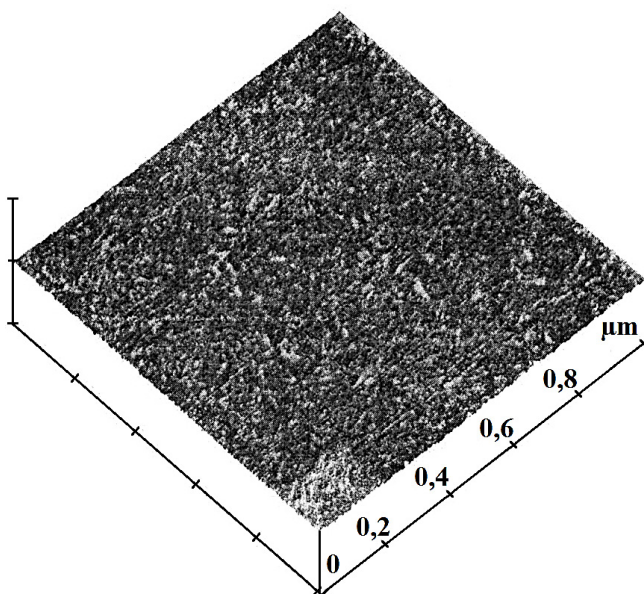


Рис. 3. АСМ-изображение фрагмента поверхности образца, полученного после скальвания кристаллов InSe.

На рис. 3. приведены АСМ-изображение фрагмента поверхности образца, полученного после скальвания кристаллов InSe (0001). Среднеарифметическое значение шероховатости R_a неокисленной подложки составляло $\sim 0,053$ нм, то есть такую поверхность можно считать атомарно-ровной.

Исследованные особенности шероховатости оксида и кристалла показывают их значительное расхождение. В тоже время при соприкосновении поверхностей GaTe и InSe они удерживаются силами Ван-дер-Ваальса и гетероконтакт прочный даже при больших температурных перепадах.

На рис. 4 показаны спектр квантовой эффективности фототока (a) и прямая ветвь ВАХ гетероперехода p-GaTe – n-InSe (b). Как видно из рис. 4 (a) спектр fotocувствительности гетероперехода имеет вид полосы, ограниченной с двух сторон: низкоэнергетический край спектра определяется поглощением света в InSe, а высокоэнергетический – GaTe. Изменение величины квантовой эффективности фототока вызвано увеличением коэффициента поглощения света в InSe и, соответственно, улучшением коэффициента сбора фотоносителей.

Рис. 4 (b) показывает, что в полулогарифмических координатах ВАХ линейна. Это позволяет определить диодный коэффициент ВАХ из ее наклона, который близок к единице и равен 1,07. Температурные измерения в области 210–300 К свидетельствуют о том, что значение диодного коэффициента сохраняется. Следовательно, близкие к единице значение этого коэффициента свидетельствуют с одной стороны, о высоком качестве p-n-переходов, а с другой – о механизме переноса носителей заряда через барьеры этих гетеропереходов, который определяется их диффузией.

В ГП с разрывами зон и специально введенной туннельно-прозрачной диэлектрической прослойкой возможна ситуация, когда фото-эдс насыщения может превышать диффузионный потенциал перехода. На рис. 5 показана зонная диаграмма ГП p-GaTe – n-InSe.

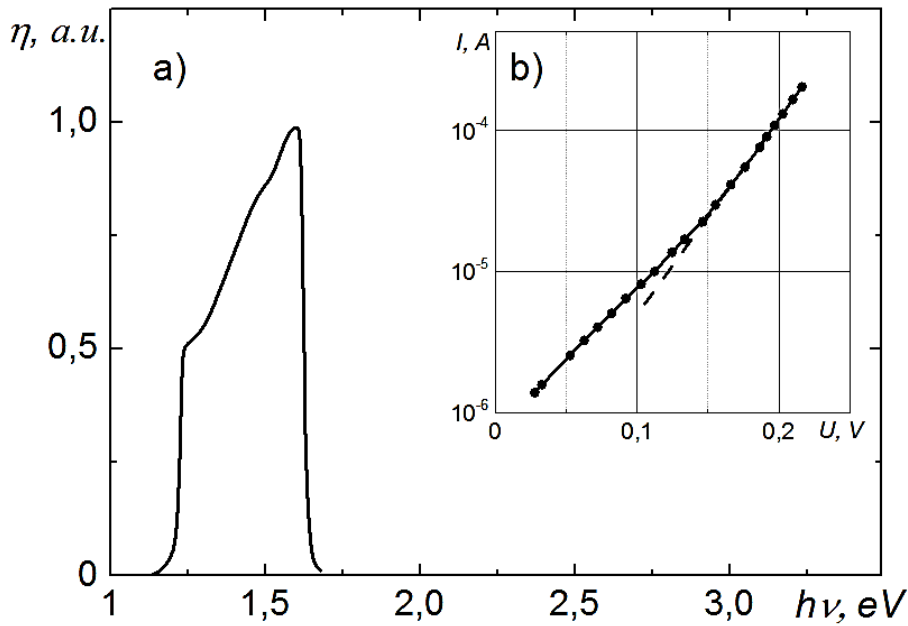


Рис. 4. Спектр квантовой эффективности фототока (а) и прямая ветвь ВАХ гетероперехода p-GaTe – n-InSe (б)

При ее построении соблюден масштаб использованных энергетических величин: данные о E_g , глубине залегания уровней Ферми в соответствующих полупроводниках, величине изгиба зон. Концентрации дырок в p-GaTe и электронов в n-InSe определялись по измерениям эффекта Холла и приведены в таблице.

Ширины запрещенных зон GaTe и InSe при комнатной температуре соответственно равны 1,66 и 1,25 эВ. Для корректного определения диффузионного потенциала ϕ_0 , использовалась методика, согласно которой емкостные напряжения отсечек при различных частотах аппроксимировались до значения при нулевой частоте. В результате, значение ϕ_0 составило 0,25 эВ. Глубина залегания уровней Ферми – 0,14 эВ для

GaTe и 0,2 эВ для InSe. Поэтому разрывы разрешенных зон составляли: $\Delta E_C = 1,11$ эВ; $\Delta E_V = 0,6$ эВ.

Как видно из этой диаграммы, прямой ток через p-n-переход определяется моноинжекцией дырок с GaTe в InSe благодаря меньшей величине ΔE_V . В неравновесных условиях выпрямления зон, появлению дополнительной фото-эдс также способствует несоответствие размещения энергетических уровней в валентной зоне, то есть ΔE_V . Теоретически дополнительная разность потенциалов может расти до тех пор, пока переходы носителей заряда из высших энергетических уровней на более низкие не уравниваются обратными переходами под действием электрического поля. Дополнительно возникающая при этом фото-

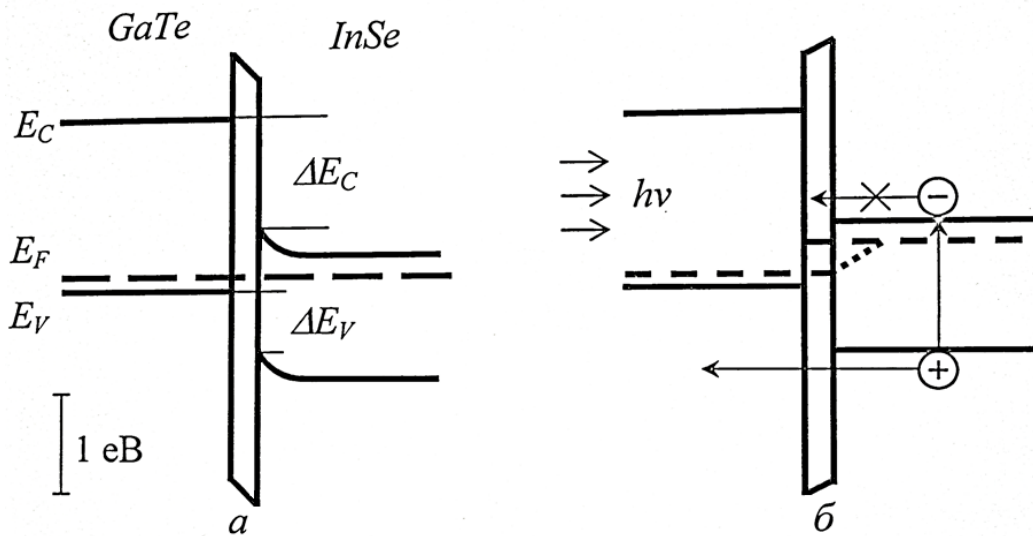


Рис. 5. Энергетическая зонная диаграмма ГП p-GaTe – n-InSe с тонким диэлектриком на гетерогранице: а) в равновесных условиях; б) в неравновесных условиях, соответствующих ситуации плоских зон

то-эдс приложена к диэлектрическому слою. Максимальная фото-эдс должна составлять 0,85 В. Однако в данном типе ГП не наблюдалось таких высоких значений. Причиной этому могло служить наличие поверхностных рекомбинационных центров, пренебречь которыми невозможно по сравнению с ГП GaSe-InSe [9]. В случае GaSe-InSe мы наблюдали дополнительную фото-эдс насыщения.

Стоит отметить, что с анализа литературных источников следует, что попытка создания подобного ГП GaTe – InSe осуществлялась в [10], однако основное внимание авторов этой работы уделялось исследованию спектральных характеристик ГП, а не его диодным свойствам.

Выводы

Проведенные исследования гетеропереходов показывают, что они обладают высокими диодными свойствами и фоточувствительностью в интервале длин волн 0,74–1,0 мкм. Присутствие на гетерогранице p-GaTe – n-InSe тонкого слоя собственного оксида Ga₂O₃ обнаружено с помощью АСМ-микроскопии. Он обладает диэлектрическими свойствами и в пределах десятков нанометров является туннельно-прозрачным для носителей заряда. Построена энергетическая зонная диаграмма гетероперехода p-GaTe – n-InSe с тонким диэлектриком на гетерогранице.

Литература

1. В.Н. Катеринчук, М.З. Ковалюк, А.Д. Огородник. Неорг. матер., 32, 937 (1996).
2. В.Л. Бакуменко, З.Д. Ковалюк, Л.Н. Курбатов, В.Г. Тагаев, В.Ф. Чишко. ФТП, 14, 1115 (1980).
3. З.Д. Ковалюк. Особенности физических свойств слоистых кристаллов // В кн.: Физические основы полупроводникового материаловедения. (Киев, Наукова думка, 1986) с. 7.
4. В.Н. Катеринчук, З.Р. Кудринский, З.Д. Ковалюк. ФТП, 49, 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. В.М. Катеринчук, З.Д. Ковалюк, М.В. Товарницький. Укр. фіз. ж., 45 (1), 87 (2000).
10. К. Давлетов, Ф. Рагимов. ФТП, 16, 1631 (1982).