

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОГО ВІДПАЛУ НА ВЛАСТИВОСТІ МОНОСЕЛЕНІДУ ІНДІЮ ТА ГАЛІЮ, ЛЕГОВАНОГО КОБАЛЬТОМ І СЕЛЕНІДОМ ВАНАДІЮ

З. Д. Ковалюк, В. В. Шевчик, В. Б. Боledзюк, В. В. Нетяга

*Інститут проблем матеріалознавства НАН України,
Чернівецьке відділення, Чернівці,
Україна*

Надійшла до редакції 14. 05. 2014

Досліджено частотні спектри імпедансу та діелектричної проникності легованих кобальтом та селенідом ванадію кристалів InSe та GaSe. Встановлено сильну частотну залежність діелектричної проникності для легованих кристалів GaSe<Co>. Показано вплив термічного відпалу у вакуумі на електричні властивості кристалів InSe та GaSe легованих кобальтом і селенідом ванадію та виявлено залежність зміни електричного опору легованих кристалів від температури термообробки.

Ключові слова: шаруватий кристал, відпал, ванадій, кобальт, легування, імпеданс.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА СВОЙСТВА МОНОСЕЛЕНИДА ИНДИЯ И ГАЛЛИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО КОБАЛЬТОМ И СЕЛЕНИДОМ ВАНАДИЯ

З. Д. Ковалюк, В. В. Шевчик, В. Б. Боledзюк, В. В. Нетяга

Исследованы частотные спектры импеданса и диэлектрической проницаемости легированных кобальтом и селенидом ванадия кристаллов InSe и GaSe. Установлена сильная частотная зависимость диэлектрической проницаемости для легированных кристаллов GaSe <Co>. Показано влияние термического отжига в вакууме на электрические свойства кристаллов InSe и GaSe легированных кобальтом и селенидом ванадия, выявлена зависимость изменения сопротивления легированных кристаллов от температуры термообработки.

Ключевые слова: слоистый кристалл, отжиг, ванадий, кобальт, легирование, импеданс.

THE EFFECT OF THERMAL TREATMENT ON THE PROPERTIES OF THE InSe AND GaSe, DOPED BY COBALT AND VANADIUM SELENIDEM

Z. D. Kovalyuk, V. V. Shevchyk, V. B. Boledzyuk, V. V. Netyaga

The spectral dependences of the impedance and dielectric susceptibility of the InSe and GaSe crystals doped by cobalt and vanadium selenide were investigated. The strong frequency dependence of the dielectric susceptibility of the doped GaSe<Co> crystals was established. We have shown the effect of annealing in vacuum on electrical properties of the InSe and GaSe crystals doped by cobalt and vanadium selenide as well as the dependence of the electrical resistance of the doped crystals vs. the annealing temperature.

Keywords: layered crystal, annealing, vanadium, cobalt, doping, impedance.

ВСТУП

Шаруваті кристали InSe та GaSe є представниками напівпровідників групи A^3B^6 . Вони володіють шаруватою структурою, де кожний шар лежить в площині, яка перпендикулярна до вісі с кристалу і містить в собі групу атомних площин Se-(Ga)In-(Ga)In-Se. Між цими атомними площинами існує сильний ковалентний зв'язок, тоді як між окремими

шарами цих сполук діють слабкі сили Ван-дер-Ваальса, які є причиною сильної анізотропії властивостей даного типу напівпровідників вздовж і впоперек шарів, а також їх відносно легким сколюванням в напрямку площини шарів [1, 2]. Кристали InSe та GaSe можуть використовуватись в якості твердотільних електродів, детекторів випромінювання, а також для виготовлення

фотоперетворювачів та інших приладів радіаційностійкої електроніки [3].

Залежно від концентрації, впроваджені домішки можуть локалізуватись як у незаповнених октаедричних позиціях міжшарового простору, так і проникати всередину кристалічних шарів. Цілеспрямоване впровадження в шаруваті напівпровідники 3d-перехідних елементів дозволяє створювати структури із почерговими металічними й напівпровідниковими прошарками, товщина яких становить кілька нанометрів і, відповідно, одержувати матеріали, у яких поєднані властивості як металів, так і напівпровідників [4]. Легування кристалів домішками перехідних елементів дозволяє, з однієї сторони, вивчати кристали та їх вплив на домішкові іони, а з іншої — досліджувати вплив домішок на властивості напівпровідникового матеріалу.

В даній роботі досліджені електричні та діелектричні властивості легованих кристалів $\text{InSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$, $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$ та $\text{GaSe}\langle\text{Co}\rangle$, а також вплив термічної обробки на ці властивості.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Монокристали InSe , $\text{InSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$, $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$ та $\text{GaSe}\langle\text{Co}\rangle$ вирощували методом Бріджмена із розплаву нестехіометричного складу. Методом Вайсенберга встановлено, що монокристали InSe володіють структурою γ -політипу (просторова група C_{3v}^5), а GaSe — структурою ϵ -політипу (просторова група D_{3h}^1). Виміряні періоди ґратки становили $a = 4,003 \text{ \AA}$, $c = 24,9553 \text{ \AA}$ та $a = 3,755 \text{ \AA}$, $c = 15,95 \text{ \AA}$ (в гексагональних осях) відповідно для InSe та GaSe . Детально кристалічна будова та параметри вихідних шаруватих кристалів описано в [2, 5].

Легування шаруватих кристалів домішками проводилось шляхом додавання кобальту (Co) класу ХЧ або попередньо синтезованого селеніду ванадію (VSe_7) із розрахунку 0,1 % маси перед синтезом моноселенідів індію та галію.

Вирощені кристали InSe та $\text{InSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$ володіли n -типом провідності. При кімнатній температурі концентрація вільних електронів n знаходилась в межах $2\text{—}4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$,

а холлівська рухливість вздовж шарів становила $\sim 200 \text{ см}^2/(\text{В}\times\text{с})$. Монокристали GaSe , $\text{GaSe}\langle\text{Co}\rangle$ та $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$ володіли p -типом провідності. Концентрація дірок в кристалах GaSe складала $p = 10^{13}\text{—}10^{14} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$, їх рухливість становила $\mu = 25\text{—}30 \text{ см}^2/\text{В}\times\text{с}$.

Дослідження властивостей вихідних і легованих монокристалів InSe і GaSe виконані методом діелектричної спектроскопії за допомогою імпедансного спектрометра «Solartron 1255 FRA» та потенціостату «Solartron 12860» (діапазон частот — $1\text{—}107 \text{ Гц}$, амплітуда синусоїдального сигналу — $10\text{—}100 \text{ мВ}$). Частотна залежність комплексної діелектричної проникності аналізувалась графоаналітичним методом з використанням програмного пакету ZView 2,8 (Scribner Associates). Для досліджень використовувались монокристалічні зразки InSe та GaSe у вигляді плоско паралельних пластинок, з середніми розмірами $10 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$. Омічні контакти наносились на природні свіжо сколені поверхні перпендикулярно вісі c кристалу згідно методики [6].

В даній роботі досліджено частотні залежності імпедансу моноселеніду індію і галію, легованих кобальтом та селенідом ванадію, а також вплив на дані характеристики термічного відпалу у вакуумі.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати досліджень методом імпедансної спектроскопії легованих кобальтом кристалів GaSe як до процесу термічного відпалу, так і після, приведені на рис. 1.

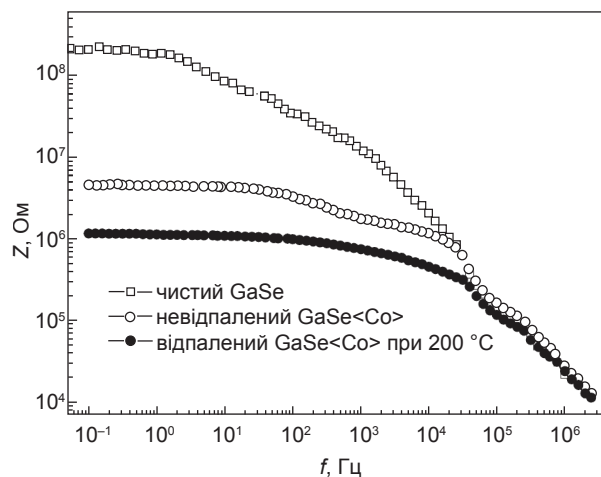


Рис. 1. Вплив відпалу на значення електроопору легованих кобальтом зразків GaSe

З рис. 1 видно різницю між чистим GaSe, легованим кобальтом та відпаленим легованим зразком при температурі $T = 200\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 4-ох годин. Атоми кобальту при легуванні значно зменшують електричний опір у порівнянні з чистим GaSe, який володіє значно більшим значенням імпедансу GaSe<Co>. При низькотемпературному відпалі легованого кристалу GaSe<Co> ($T = 200\text{ }^\circ\text{C}$) спостерігається збільшення провідності у порівнянні з невідпаленим зразком. Схожі результати також були одержані в роботі [7], де досліджувався вплив відпалу на чисті зразки моноселеніду індію та галію. Крім частотних залежностей імпедансу для GaSe<Co>, були отримані діаграми Найквіста в напрямку вісі c досліджуваних кристалів, які приведені на рис. 2.

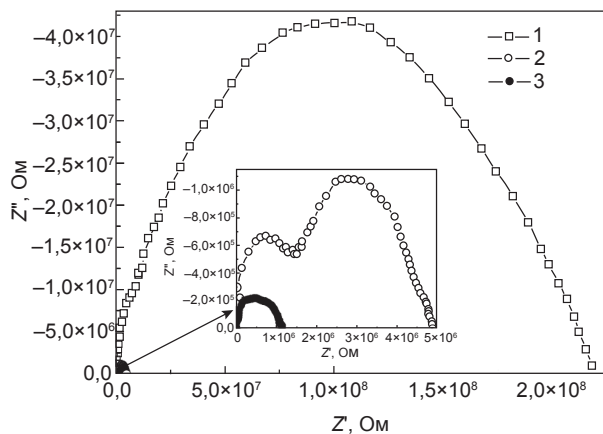


Рис. 2. Вплив відпалу на вигляд діаграм Найквіста отриманих в напрямку осі c легованих кобальтом кристалів GaSe; 1 — чистий GaSe; 2 — невідпалений GaSe<Co>; 3 — відпалений GaSe<Co>

Вид залежності дійсної та уявної частин імпедансу відповідає еквівалентній схемі з послідовного з'єднання опору зразка, який враховує опір кристалу, контактів і провідів, а також паралельного контуру шунтуючого опору та бар'єрної ємності. Як видно з рисунку форма півкола для чистого GaSe (крива 1) і відпаленого зразка GaSe<Co> (крива 3) не відрізняються. Діаграма Найквіста отримана для невідпаленого зразка (рис. 2, крива 2) є суперпозицією двох півкіл зміщених одне відносно одного по осі Z' . Це є свідченням двох релаксаційних процесів в діапазоні частот 10^4 — 10^5 та частотах близьких до 100 Гц, що чітко видно по ходу частотної залежності імпедансу на рис. 1 для легованого кристалу.

Можливою причиною значного зменшення опору легованого зразка в порівнянні з чистим GaSe є наявність кобальту в об'ємі кристалу, атоми якого виступають в ролі провідної металічної плівки в кристалі та можуть розташовуватись як в тетраедричних, так і в октаедричних пустотах. Зниження опору легованого зразка внаслідок низькотемпературного відпалу можна пояснити впорядкуванням політипної структури і зменшенням кількості структурних дефектів у порівнянні з вихідними кристалами, що може бути причиною зникнення меншого півкола на кривій 3 рис. 2 [7].

Крім досліджень впливу термічної обробки на електричні властивості легованих кристалів також були проведені дослідження зміни діелектричних властивостей при відпалі. На рис. 3 приведена частотні залежності діелектричної проникності ϵ монокристалів GaSe легованих кобальтом.

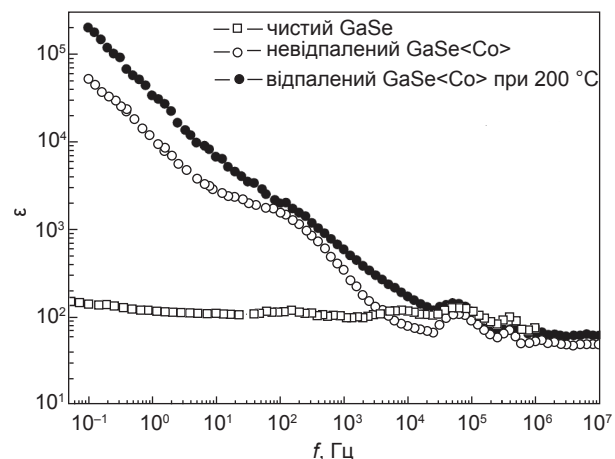


Рис. 3. Вплив відпалу на частотну дисперсію діелектричної проникності легованих кобальтом монокристалів GaSe

Як видно з представлених залежностей для чистого GaSe суттєвої дисперсії ϵ практично не спостерігається у всьому досліджуваному діапазоні частот. По мірі росту частоти спостерігається значна дисперсія діелектричної проникності для невідпаленого і відпаленого GaSe<Co>. Для монокристалів GaSe<Co> значення ϵ трохи більше у відпаленого зразка, що характеризується більшою провідністю в порівнянні з невідпаленим. З ростом частоти електричного струму значення ϵ для легованих кристалів стрімко зменшується і при

досягненні максимальної частоти (10^7 Гц) величина діелектричної проникності менша за початкову приблизно на 3 порядки. Спостережуване монотонне зменшення діелектричної проникності для відпаленого зразка свідчить про релаксаційну дисперсію. Немонотонне зменшення значення ϵ для невідпаленого зразка є свідченням існування двох релаксаційних процесів, які присутні на діаграмі Найквіста (рис. 2, крива 2), утворюючи суперпозицію двох півкіл різного діаметру [8].

Крім зразків GaSe легованих селенідом ванадію також були проведені дослідження і для зразків GaSe легованих кобальтом. На рис. 4 приведені частотні залежності імпедансу для легованих $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$.

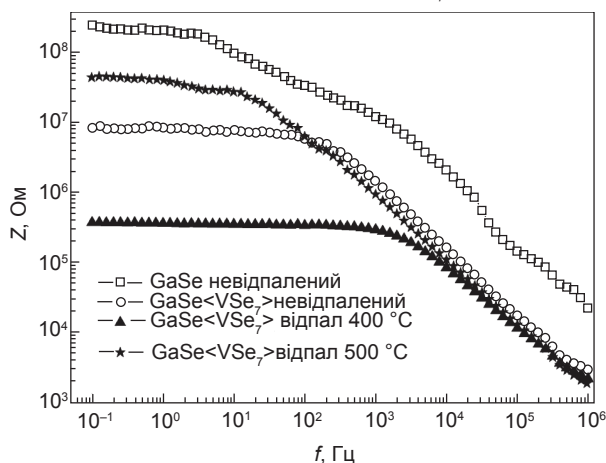


Рис. 4. Вплив відпалу на частотну залежність імпедансу легованих монокристалів $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$

З приведених залежностей видно, що частотна залежність імпедансу Z легованих зразків містить частотну незалежну ділянку, на відміну від аналогічної залежності для чистого GaSe, у якого така ділянка практично відсутня. Схожа ситуація спостерігалась у зразків GaSe інтеркальованих кобальтом з низькою концентрацією інтеркалянта [9]. Зразки $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$ аналогічно до зразків $\text{GaSe}\langle\text{Co}\rangle$, характеризуються значно меншим значенням імпедансу в порівнянні з нелегованим GaSe.

Відпал $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$ у вакуумі при температурі $400\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 4-ох годин привів до зменшення електричного опору більш ніж на порядок і розширення частотно-незалежної ділянки імпедансу. При термічному відпалі у вакуумі при $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 4-ох годин

спостерігається дещо інша ситуація. Хоча опір і знизився в порівнянні з чистим GaSe, але крива залежності дуже схожа на криву залежності GaSe та практично відсутня частотно-незалежна ділянка імпедансу. Можливою причиною таких ефектів можуть бути інтенсивні процеси дефектоутворення і політипні перетворення в середині кристалу при $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$. Також при високих температурах відпалу можливе утворення термічно стійкої сполуки сполуки Ga_2Se_3 n -типу провідності, що може впливати на значення імпедансу легованого кристалу $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$ чи вступаючи в реакцію з атомами ванадію створювати сполуки зі складним хімічним складом [8].

На рис. 5 приведені діаграми Найквіста для легованих монокристалів $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$.

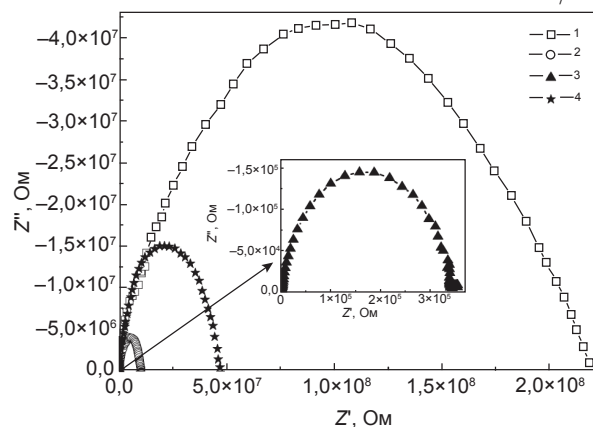


Рис. 5. Вплив відпалу на діаграми Найквіста отриманих в напрямку осі c легованих монокристалів $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$: 1 — чистий GaSe; 2 — легований зразок $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$; 3 — відпалений при $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$ $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$; 4 — відпалений при $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$ $\text{GaSe}\langle\text{VSe}_7\rangle$

Вид залежності дійсної та уявної частин імпедансу відповідає еквівалентній схемі аналогічній, що і для зразків $\text{GaSe}\langle\text{Co}\rangle$ (рис. 2). З рис. 5 видно, що діаграми зразків відрізняється тільки розмірами півкіл, діаметри яких визначаються значеннями імпедансу на рис. 4.

Крім досліджень легованих зразків GaSe, були також проведені дослідження легованих зразків моноселеніду індію. На рис. 6 показаний вплив термічного відпалу у вакуумі при $T = 400\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 4-ох годин на електричні властивості InSe легованого селенідом ванадію:

Як видно з рис. 6 термічна обробка призвела до значного зростання електроопору як для легованого так і нелегованого InSe. Опір нелегованого InSe зріс приблизно у 7—8 разів, а легованого селенідом ванадію — у приблизно 15—16 разів.

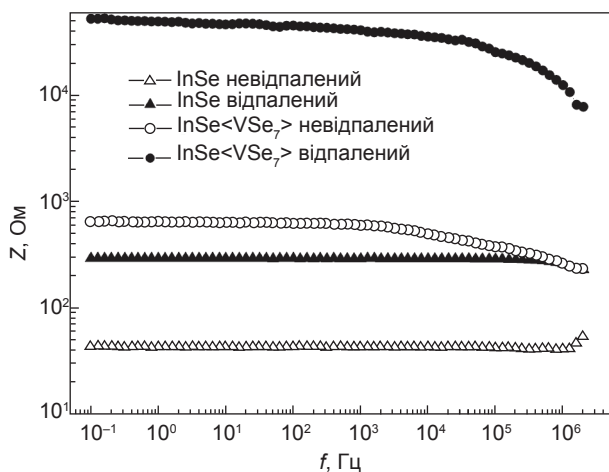


Рис. 6. Вплив термічної обробки на значення імпедансу вздовж осі c кристалу для нелегованого та легованого селенідом ванадію InSe

На рис. 7 зображена зміна діаграми Найквіста після відпалу легованого зразка InSe<VSe₇>, вид якої відповідає еквівалентній схемі з послідовного з'єднання опору зразка, який враховує опір кристалу, контактів і проводів, а також паралельного контуру шунтуючого опору та бар'єрної ємності, що виникає внаслідок наявності малих потенціальних бар'єрів між шарами кристалу.

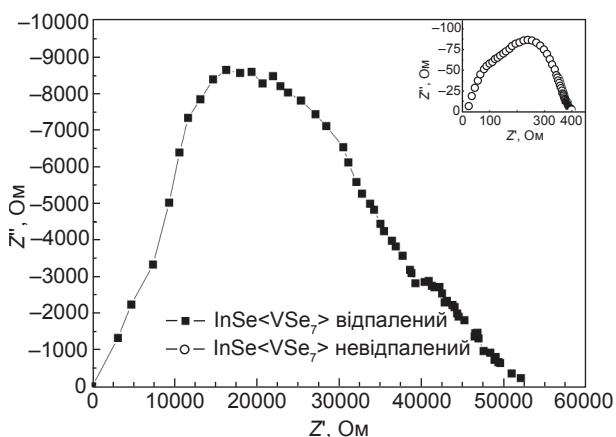


Рис. 7. Вплив відпалу на вигляд діаграм Найквіста для легованого зразка InSe<VSe₇> отриманих в напрямку вісі c кристала

З рис. 7 видно, що форма півкола, яка описує залежність між дійсною та уявною частинами імпедансу, зазнала змін. У

високочастотній області спостерігається стрімкіший ріст Z'' і більш плавний спад у низькочастотній області у порівнянні з ходом кривої залежності для невідпаленого зразка, а також значне зростання величини уявної і дійсної частин імпедансу.

В роботах [7, 10] при проведенні низькотемпературного відпалу кристалів моноселеніду галію та індію спостерігалось зменшення питомого електроопору зразків при температурах відпалу 150—250 °С. При вищих температурах відпалу n -InSe (350—450 °С) протягом трьох годин був помічений ріст концентрації носіїв заряду з ростом температури відпалу. При цьому надлишковий індій може займати як міжвузлові позиції, так і випадати у міжшаровий простір або зосереджуватись поблизу різного роду дефектів [11, 12].

В нашому випадку зростання електричного опору зразків після відпалу як для чистого, так і легованого InSe можна пояснити утворенням додаткових акцепторних рівнів в середині забороненої зони, які можуть бути пов'язані з існуванням дислокацій чи дефектами упаковки по аналогії з отриманими результатами для моноселеніду галію, відпаленому при $T = 600$ — 800 °С [13]. Значне зростання опору для легованого зразка у порівнянні з чистим може бути пояснене випаданням атомів ванадію у міжвузловий чи міжшаровий простір, де він може виступати у ролі акцептора і захоплювати частину електронів утворених донорними центрами індію.

ВИСНОВКИ

В результаті досліджень встановлено, що легування атомами кобальту кристалів моноселеніду галію дозволяє значно знизити електричний опір шаруватих кристалів у порівнянні з нелегованими кристалами, а завдяки відпалу при $T = 200$ °С можна підсилити цей ефект.

Діелектрична проникненість ϵ для зразків GaSe<Co> зменшується зі зростанням частоти змінного сигналу і носить монотонний характер для відпалених зразків та немонотонний характер для невідпалених кристалів GaSe<Co>. Немонотонне зменшення ϵ для

невідпалених зразків свідчить про існування двох релаксаційних процесів, що присутні на діаграмах Найквіста таких зразків.

Легування кристалів GaSe селенідом ванадію призводить до аналогічного зменшення електричного опору, як і в кристалах GaSe<Co>. Термообробка легованих кристалів GaSe<VSe₇> також сприяє значному зменшенню електроопору, яке в свою чергу залежить від температури відпалу: при $T = 500$ °C зменшення опору менше ніж при менших ($T = 400$ °C) температурах відпалу. Причиною цього можуть бути інтенсивні процеси дефектоутворення і політипні перетворення в об'ємі кристалу під дією вищих температур, а також утворення термічної сполуки Ga₂Se₃ *n*-типу провідності чи інших складних сполук складного хімічного складу, які погіршують електричну провідність кристалу.

У випадку легування селенідом ванадію кристалів InSe відбувається значне зростання електричного опору в порівнянні з нелегованими кристалами InSe. Зростання опору при термообробці ймовірно пов'язане з випаданням атомів ванадію у міжвузловий чи міжшаровий простір, де він може виступати у ролі акцептора і захоплювати частину електронів, утворених донорними центрами індію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Товстюк К. Д. Полупроводниковое материаловедение. — К.: «Наукова думка», 1984. — 264 с.
2. Медведева З. С. Халькогениды элементов III-B подгруппы периодической системы. — М.: «Наука», 1968 — 216 с.
3. Ковалюк З. Д., Политанская О. А., Литовченко П. Г., Ластовецкий В. Ф., Литовченко О. П., Дубовой В. К., Поливцев Л. А. Влияние нейтронного облучения на фотоэлектрические параметры структур *p-n-InSe* // Письма в ЖТФ. — 2007. — Т. 33, вып. 18. — С. 14—22.
4. Магнетизм наносистем на основе редкоземельных и *3d*-переходных металлов // Хрестоматия под ред. В. О. Васьковского — Екатеринбург, 2007. — 266 с.
5. Kuhn A., Chevy A., Chevalier R., Crystal structure and interatomic distance in GaSe // Phys. Stat. Sol. (b). — 1975. — Vol. 31, No. 2. — P. 469—473.

6. Демчина Л. А., Ковалюк З. Д., Минтянский И. В. Изготовление омических контактов к слоистым монокристаллам типа A³B⁶ // Приборы и техника эксперимента. — 1980. — № 2. — С. 219.
7. Ластивка Г. И. Влияние низкотемпературного отжига на спектры ЯКР и характеристики гетерофотодиодов на основе GaSe-InSe / Г. И. Ластивка, О. Н. Сидор, З. Д. Ковалюк, А. Г. Хандожко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2010. — Т. 10, № 4/5. — С.28—34.
8. Бахтинов А. П., Водопьянов В. Н., Ковалюк З. Д., Нетяга В. В., Литвин О. С. Электрические свойства гибридных структур (ферромагнитный металл)-(слоистый полупроводник) Ni/*p*-GaSe // ФТП. — 2010. — Т. 44, № 2. — С. 180—193.
9. Ковалюк З. Д., Боledзюк В. Б., Шевчик В. В., Камінський В. М., Шевченко А. Д. Виникнення ферромагнетизму в шаруватих напівпровідниках GaSe, інтеркальованих кобальтом // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2012. — Т. 56, № 2/5. — С. 12—15.
10. Ковалюк З. Д., Сидор О. Н., Ластивка Г. И., Хандожко А. Г. Влияние отжига на спектры ядерного квадрупольного резонанса селенидов галлия-индия и характеристики структур на их основе // ФТП. — 2012 — Т. 46, № 9. — С. 1168—1174.
11. Houdy P., Maurice J. L., Besson J. M., Lava J. Y. Two-dimensional defects in InSe, A. Chevy, Gorochov // J. Appl. Phys. — 1987. — Vol. 61, No. 12. — P. 5267—5271.
12. Kuroda N., Nishina Y. Interrelationship between bond ionicity and lattice instability of III-VI layer compounds // J. Phys. Soc. Jap. — 1981. — Vol. 50, No. 9. — P. 2969—2977.
13. Shigetomi S., Ikari T., and Nishimura N. Annealing Behavior of Layered Semiconductor *p*-GaSe Single Crystal / Phys. Stat. Sol. A. — 2001. — Vol. 185, No. 2, — P. 341—348.

LITERATURA

1. Tovstyuk K. D. Poluprovodnikovoe materialovedenie.—К.:«Naukovadumka»,1984.—264p.
2. Medvedeva Z. S. Hal'kogenidy elementov III-B podgruppy periodicheskoy sistemy. — М.: «Наука», 1968 — 216 p.
3. Kovalyuk Z. D., Politanskaya O. A., Litovchenko P. G., Lastoveckij V. F., Litovchenko O. P., Dubovoj V. K., Polivcev L. A. Vliyanie nejtronnogo oblucheniya na fotoelektricheskie

- parametry struktur *r-n*-InSe // Pis'ma v ZhTF. — 2007. — Vol. 33, vyp. 18. — P. 14—22.
4. Magnetizm nanosistem na osnovе redkozemel'nyh i 3*d*-perehodnyh metallov // Hrestomatiya pod red. V. O. Vas'kovskogo — Ekaterinburg, 2007. — 266 p.
 5. Kuhn A., Chevy A., Chevalier R., Crystal structure and interatomic distance in GaSe // Phys. Stat. Sol. (b). — 1975. — Vol. 31, No. 2, P. 469—473.
 6. Demchina L. A., Kovalyuk Z. D., Mintyanskiy I. V. Izgotovlenie omicheskikh kontaktov k sloistym monokristallam tipa A³V⁶ // Pribory i tehnika eksperimenta. — 1980. — No. 2. — P. 219.
 7. Lastivka G. I. Vliyanie nizkotemperaturnogo otzhiga na spektry YaKR i harakteristiki geterofotodiodov na osnovе GaSe-InSe / G. I. Lastivka, O. N. Sidor, Z. D. Kovalyuk, A. G. Handozhko // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. — 2010. — Vol. 10, No. 4/5. — P. 28—34.
 8. Bahtinov A. P., Vodop'yanov V. N., Kovalyuk Z. D., Netyaga V. V., Litvin O. S. Elektricheskie svoystva gibridnyh struktur (ferromagnitnyj metal)-(sloistyj poluprovodnik) Ni/*p*-GaSe // FTP. — 2010. — Vol. 44, No. 2. — P. 180—193.
 9. Kovalyuk Z. D., Boledzyuk V. B., Shevchik V. V., Kamins'kij V. M., Shevchenko A. D. Viniknennya feromagnetizmu v sharuvatih napivprovodnikah GaSe, interkal'ovanih kobal'tom // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. — 2012. — Vol. 56, No. 2/5. — P. 12—15.
 10. Kovalyuk Z. D., Sidor O. N., Lastivka G. I., Handozhko A. G. Vliyanie otzhiga na spektry yadernogo kvadropol'nogo rezonansa selenidov galliya-indiya i harakteristiki struktur na ih osnovе // FTP. — 2012 — Vol. 46, No. 9. — P. 1168—1174.
 11. Houdy P., Maurice J. L., Besson J. M., Lava J. Y. Two-dimensional defects in InSe, A. Chevy, Gorochov // J. Appl. Phys. — 1987. — Vol. 61, No. 12. — P. 5267—5271.
 12. Kuroda N., Nishina Y. Interrelationship between bond ionicity and lattice instability of III-VI layer compounds // J. Phys. Soc. Jap. — 1981. — Vol. 50, No. 9. — P. 2969—2977.
 13. Shigetomi S., Ikari T., and Nishimura N. Annealing Behavior of Layered Semiconductor *p*-GaSe Single Crystal / Phys. Stat. Sol. A. — 2001. — Vol. 185, No. 2, — P. 341—348.