

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДЕГРАДАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ КРИСТАЛІВ НАПІВІЗОЛЮЮЧОГО АРСЕНІДУ ГАЛІЮ, ЛЕГОВАНОГО ХРОМОМ АБО ТЕЛУРОМ

Ф. В. Фомовський

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: fill.fo@mail.ru

Досліджувались оптичні властивості кристалів напівізолюючого арсеніду галію в інфрачервоній області спектру. Кристали були отримані методом Чохральського з рідинною герметизацією. Особлива увага приділялась вивченню впливу типу компенсуючої домішки на деградаційну стійкість кристалів до дії височастотного електромагнітного опромінення. Показано, що плазмова обробка зразків напівізолюючого GaAs, компенсованих телуrom, так само, як й у випадку легування хромом, підвищує їх стійкість до дії ВЧ-обробок, але вихідні, необроблені зразки такого типу після ВЧ-обробки деградують суттєво менше порівняно зі зразками, легованими хромом. Це свідчить про суттєвий вплив типу компенсуючої домішки на деградаційну стійкість матеріалу. Запропоновано механізм, що пояснює відмінності у властивостях арсеніду галію, компенсованого хромом або телуrom. Зокрема, встановлено, що домішка з більшим ковалентним радіусом (телур) спричиняє появу більших внутрішніх механічних напружень у кристалі, проте ступінь їх релаксації під дією обробок є суттєво меншою, що й обумовлює більшу стійкість таких кристалів.

Ключові слова: арсенід галію, ІЧ-пропускання, плазмова обробка, деградаційна стійкість.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕГРАДАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КРИСТАЛЛОВ ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ХРОМОМ ИЛИ ТЕЛЛУРОМ

Ф. В. Фомовский

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: fill.fo@mail.ru

Исследовались оптические свойства кристаллов полуизолирующего арсенида галлия в инфракрасной области спектра. Кристаллы были получены методом Чохральского с жидкостной герметизацией. Особое внимание уделялось изучению влияния типа компенсирующей примеси на деградационную стойкость кристаллов к воздействию высокочастотного электромагнитного излучения. Показано, что плазменная обработка образцов полуизолирующего GaAs, компенсированных теллуrom, также как и в случае легирования хромом, повышает их стойкость к действию ВЧ-обработок, но исходные, необработанные образцы такого типа после ВЧ-обработки деградируют существенно меньше в сравнении с образцами, легированными хромом. Это свидетельствует о существенном влиянии типа компенсирующей примеси на деградационную стойкость материала. Предложен механизм, объясняющий отличия в свойствах арсенида галлия, компенсированного хромом или теллуrom. В частности, установлено, что примесь с большим ковалентным радиусом (теллур) вызывает появление больших механических напряжений в кристалле, однако степень их релаксации под действием обработок является существенно меньшей, что и обуславливает большую деградационную стойкость таких кристаллов.

Ключевые слова: арсенид галлия, ИК-пропускание, плазменная обработка, деградационная стойкость.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Арсенід галію (GaAs) є одним із базових матеріалів сучасної мікроелектроніки, напівпровідникової сонячної енергетики, НВЧ-електроніки та ІЧ-оптики [1–4].

Високі значення показника заломлення GaAs [5] роблять його перспективним у виробництві оптичних елементів для інфрачервоної (ІЧ) області спектру. В будь-якому разі, незалежно від сфер застосування приладів і структур на основі GaAs, дуже важливим є забезпечення стабільності характеристик матеріалу, тобто його деградаційної стійкості. Це, зокрема, стосується напівізолюючого GaAs, який зазвичай вирощується методом Чохральського з рідинною герметизацією [6]. Відомо, що для таких кристалів є характерною наявність значних внутрішніх, часто неоднорідно розподілених, механічних напружень [7, 8]. Ці напруження під час подальших обробок можуть релаксувати, суттєво змінюючи властивості кристалу. Найбільш поширеним методом модифікації властивостей напівпровідникових матеріалів є термічний відпал. У роботі [9] було встановлено, що швидкий термічний відпал (ШТВ) при 875 °С протягом 12 с призводить до зменшення опору на 2–4 порядки, а стандартний термічний від-

пал (800 °С, 30 хв. у потоці H₂) знижує опір ще більше. Оскільки при відпалі відбувається релаксація внутрішніх механічних напружень, це призводить до генерації додаткових дефектів. У [9] було показано, що концентрація глибоких центрів в арсеніді галію після звичайного відпалу на порядок перевищує їх концентрацію після ШТВ, ще меншою вона є після обробки електронним променем.

Мікрохвильове опромінення (МХО) є потужним методом, який дозволяє модифікувати властивості напівпровідникових матеріалів, наприклад, кремнію [10] і матеріалів A_{III}B_V [11–13]. МХО може розглядатись як альтернатива термічному відпалу в технологічних процесах. У результаті МХО арсеніду галію виявлено немотонні процеси структурної релаксації при малих часах опромінення і малій потужності МХО [11, 12], покращення властивостей контактів до GaAs після МХО [11–13]. Враховуючи малі часи обробок і невисоку потужність МХО, дані ефекти не можуть бути пояснені звичайним термічним розігрівом структур й інтерпретовані авторами [11–13] з точки зору резонансних взаємодій мікрохвиль з дефектними областями й їх локальним розігрівом. У [12] відзначається, що ШТВ стимулює

більш інтенсивні процеси структурного впорядкування в структурах TiB_2/GaAs , порівнянно з МХО, що може бути пов'язане з розігрівом металевого контакту, появою термічних градієнтів і, відповідно, стимульованими процесами дифузії. Відзначимо, що ШТВ таких систем призводить до релаксації в них внутрішніх механічних напружень, причому максимальна релаксація має місце при температурі 600°C [12].

Ефективним способом модифікації поверхні GaAs є плазмові обробки. Так, обробка в плазмі азоту при температурі підкладки 500°C на частоті $13,56\text{ МГц}$ призводила до заміщення атомів As азотом і до формування на поверхні широкозонних розчинів [14]. Обробка в плазмі $\text{H}_2\text{-N}_2$ (3 % у H_2) кристалу GaAs призводила до збільшення інтенсивності фотолюмінесценції, а на поверхні кристала формувалася тонкий ($\sim 1\text{ нм}$) шар нітриду галію [15]. У той же час, обробка в плазмі чистого азоту не забезпечувала ефективної пасивації, оскільки відбувалася сегрегація As і нітриду арсенікуму на границі розділу Ga-N/Ga-As [15]. Тривала експозиція GaAs у плазмі $\text{Ar}+5\% \text{H}_2$ або $\text{Ar}+20\% \text{H}_2$ викликала утворення поверхневого шару ($\sim 100\text{ нм}$) зі зменшеною концентрацією вільних носіїв заряду [16]. Більше того, виникав приповерхневий ізолюючий шар товщиною близько 10 нм [16]. Після обробки в водневій або дейтерієвій плазмі (або в суміші цих газів) у спектрах комбінаційного розсіювання світла з'являлись нові піки, зокрема пік, обумовлений H_2 в пустотах, що виникали внаслідок плазмової обробки [17]. Обробка в плазмі аргону зразків GaAs при малих потужностях розряду викликала формування оксиду на поверхні, що було обумовлено наявністю домішки іонізованого атомарного кисню в плазмі [18]. При більших потужностях розряду також формувалася оксид галію. Автори [18] виділяли два конкуруючих процеси під час плазмової обробки – формування оксиду й іонне розпилення.

У той же час, незважаючи на достатньо велику кількість робіт, присвячених дослідженню плазмових обробок кристалів GaAs, практично недослідженими залишились процеси релаксації механічних напружень внаслідок обробок.

Отримані в роботі [19] важливі результати щодо впливу водневої плазмової обробки на ефекти просвітлення кристалів напівізолюючого GaAs в ПЧ-області спектру і висловлені припущення щодо можливості впливу на оптичні властивості систем «камазоподібна вуглецева плівка–GaAs», що й обумовлює важливість продовження робіт у цьому напрямку.

Метою роботи є визначення впливу типу легуючої домішки на процеси релаксації механічних напружень в АГНІ, і, отже, на його деградаційну стійкість.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Кристали напівізолюючого GaAs (АГНІ) з орієнтацією (100), леговані хромом або телуrom із питомим опором $1\cdot 10^7\ \Omega\cdot\text{cm}$ були вирощені методом Чохральського з рідинною герметизацією [7].

Високочастотна обробка зразків виконувалась в плазмовому реакторі установки PE-CVD (plasma-enhanced chemical vapor deposition). Під час обробки,

для того щоб виключити вплив плазми на властивості кристалів, вони закривались немагнітною маскою. Оптичні властивості виготовлених зразків досліджувалися за допомогою Фур'є-спектрометра Infracam FT-801 у спектральному діапазоні $5\text{--}15\ \mu\text{m}$. Спектри комбінаційного розсіювання світла (КРС) вимірювались на автоматизованій установці на базі спектрометра ДФС-24. Усі дослідження виконувались при кімнатній температурі.

При зміні атомного номера легуючої домішки, змінюється її ковалентний радіус (118 пм для хрому і 136 пм для телуру), що може суттєво змінити рівень внутрішніх механічних напружень (ВМН) в АГНІ, а також вплинути на кінетику зміни ВМН при різних обробках. Це підтверджують результати вимірів спектрів КРС. Зокрема, було показано, що після обробки в плазмі водню протягом 15 хв. положення піка КРС LO фонона змінюється від $292,64\text{ см}^{-1}$ до $291,62\text{ см}^{-1}$ [20]. Якщо врахувати, що для ненапруженого кристала GaAs положення піку КРС LO фонона- $291,3\text{ см}^{-1}$ то стає цілком очевидним факт релаксації ВМН в АГНІ майже до ненапруженого стану. В той же час, для АГНІ, легованого телуrom положення піку LO фонона КРС вихідного, необробленого кристала, який досліджувався в даній роботі, знаходилось при $293,1\text{ см}^{-1}$. Це, в першу чергу, свідчить про суттєво вищий рівень ВМН, порівняно з АГНІ, легованого хромом, що є цілком зрозумілим, враховуючи суттєву різницю в ковалентних радіусах атомів легуючої домішки. Більше того, положення піку КРС кристалу, легованого телуrom не тільки після обробки в плазмі водню, а навіть після комплексної обробки, яка включала обробку в плазмі водню протягом 60 хв. + двостадійну ВЧ обробку загальною тривалістю 119 хв. + багатостадійну мікрохвильову обробку (на частоті $2,45\text{ ГГц}$) загальною тривалістю 10 хв. змінювалось слабо. Так, пік КРС, який знаходився при $293,1\text{ см}^{-1}$, після вказаної обробки змістився до $293,18\text{ см}^{-1}$. Отже в даному випадку релаксації ВМН не спостерігається. Даний результат, в свою чергу свідчить, що кристали АГНІ, леговані телуrom, є більш стійкими до обробок порівняно з кристалами, легованими хромом із точки зору релаксації в них ВМН. Розглянемо далі, як це вплине на оптичні властивості АГНІ в ПЧ області спектру.

На рис. 1,а показані спектри ПЧ-пропускання досліджуваних зразків GaAs, компенсованих хромом. З рис. 1,а видно, що обробка вихідного зразка (рис. 1,а, спектр 1) у ВЧ-електромагнітному полі призводить до значного (на $5\text{--}6\%$) зменшення пропускання в усьому спектральному діапазоні (рис 1,а, крива 2). Цей ефект пов'язаний з частковим розігрівом зразків ВЧ-опроміненням. У результаті має місце релаксація внутрішніх механічних напружень за рахунок генерації структурних дефектів і, як наслідок, падіння пропускання кристала.

Наявність такої релаксації, як відзначалось вище, підтверджується дослідженнями, виконаними методом КРС. Також було встановлено, що після обробки в плазмі водню пропускання трохи падало порівняно з вихідним зразком.

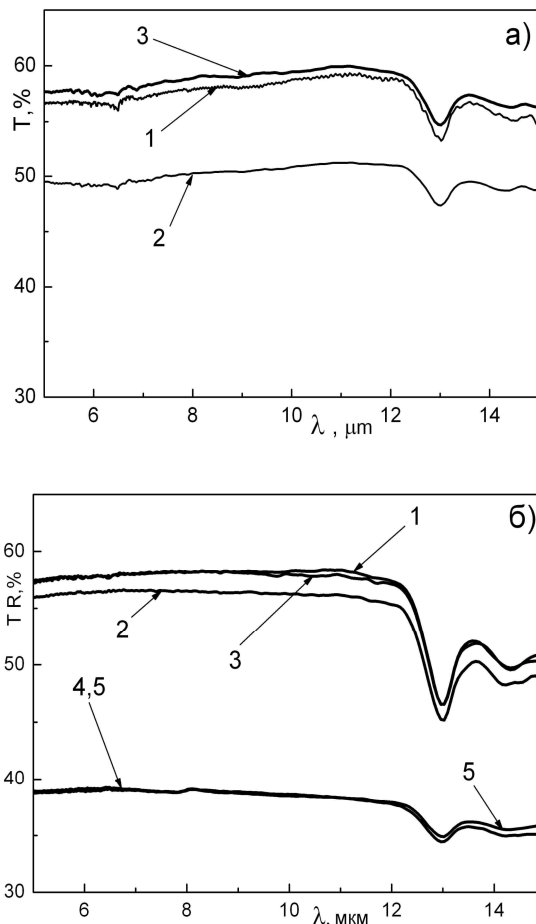


Рисунок 1 – Спектри ІЧ пропускання та відбивання:
 а) GaAs, легований Cr; б) GaAs, легований Te:
 1 – вихідний; 2 – після ВЧ-обробки протягом 62 хв.;
 3 – після обробки в плазмі водню протягом 15 хв.
 і ВЧ-обробки протягом 47 хв.; 4 – спектр відбивання
 вихідного зразка; 5 – спектр відбивання після ВЧ-
 обробки

Проте, найважливішим результатом є той факт, що подальша тривала обробка у ВЧ-електромагнітному полі зразка, що пройшов плазмову обробку не призводить до різкого погіршення пропускання кристалів, як це спостерігалось для необроблених зразків (рис. 1,а, спектр 2).

Більше того, після ВЧ-обробки пропускання кристала дещо зростає і стає навіть вищим ніж для вихідного (необробленого) зразків (рис. 1а, спектр 3), тобто плазмова обробка призводить до покращення деградаційної стійкості кристала [20]. Детально механізм цього ефекту обговорюється в [20]. На рис. 1,б наведено спектри пропускання і відбивання в ІЧ-області спектра кристалу АГНІ, легований Те, після аналогічних обробок. Спочатку кристал був підданий ВЧ-обробці під маскою, в режимі плазмового розряду, як описано вище, протягом 62 хв. Як видно з рис. 1,б, після ВЧ-обробки пропускання кристала падало в усьому дослідженому спектральному діапазоні на ~1,5 % (рис. 1,б, спектри 1, 2).

ВЧ-обробка кристалу, попередньо обробленого в плазмі водню, практично не вплинула на його пропускання (рис. 1,б, спектр 3), що є додатковим свід-

ченням підвищеної деградаційної стійкості АГНІ, легованого телуrom.

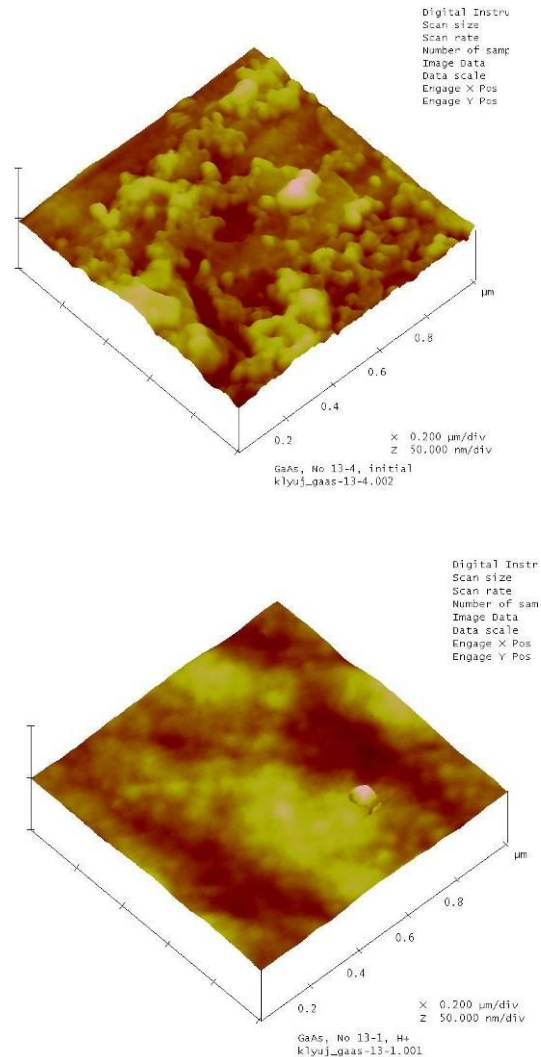


Рисунок 2 – Зображення поверхні вихідного зразка АГНІ, легованого телуrom (верхнє), та зразка, обробленого в плазмі водню (нижнє), отримані в атомно-силовому мікроскопі

Рис. 2 свідчить про те, що структурування поверхні зразків внаслідок плазмової обробки, що могло б призвести до зменшення відбивання, також не спостерігається. Дійсно, як видно з порівняння зображень поверхні вихідного зразка (рис. 2, верхнє зображення) і зразка після плазмової обробки – нижнє зображення, які були отримані в атомно-силовому мікроскопі (АСМ), обробка навіть дещо згладжує поверхню, внаслідок плазмового травлення. В результаті середня шорсткість поверхні після обробки зменшується з 1,567 до 1,090 нм (рис. 2). Це означає, що всі зміни пропускання обумовлені зміною властивостей об'єму кристала, внаслідок процесів релаксації внутрішніх механічних напружень у ньому під дією обробки.

ВИСНОВКИ. Показано, що плазмова обробка зразків напівізолюючого GaAs, компенсованих хромом або телуrom, підвищує їх стійкість до дії ВЧ- і мікрохвильових обробок. У той же час, навіть вихідні, необроблені зразки, леговані телуrom після ВЧ-

обробки деградує суттєво менше порівняно зі зразками, легованими хромом, що свідчить про суттєвий вплив типу компенсуючої домішки на деградаційну стійкість матеріалу. Запропоновано механізм, що пояснює відмінності у властивостях арсеніду галію, компенсованого хромом або телуrom. Зокрема, встановлено, що домішка із більшим ковалентним радіусом (телур) спричиняє появу більших внутрішніх механічних напружень у кристалі, проте ступінь їх релаксації під дією обробок є суттєво меншою, що й обумовлює більшу стійкість таких кристалів. Усі ефекти обумовлені зміною властивостей об'єму кристалу, а не його поверхні, про що свідчить незмінність коефіцієнту відбивання зразків до і після обробок.

Автор вдячний канд. фіз.-мат. наук П.М. Литвину за вимірювання методом АСМ і канд. фіз.-мат. наук А.І. Ліптузі за вимірювання спектрів ІЧ-пропускання та відбивання, а також докт. фіз.-мат. наук В.О. Юхимчуку за вимірювання спектрів КРС зразків GaAs.

ЛІТЕРАТУРА

1. Физика полупроводниковых приборов / Пер. с англ. под ред. Р.А. Суриса. – М.: Мир, 1984. – Т. 2. – 456 с.
2. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука и У. Уисмена. – М.: Мир, 1988. – 555 с.
3. Тонкопленочные солнечные элементы / К. Чопра, С. Дас; пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна. – М.: Мир, 1986. – 440 с.
4. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун. – М.: Наука, 1985. – 280 с.
5. Оптические свойства полупроводников / Гавриленко В.И., Грехов А.М., Корбутяк Д.В., Литовченко В.Г. – К.: Наукова думка, 1987. – 608 с.
6. LEC growth of large GaAs single crystals / M. Shibata, T. Suzuki, S. Kuma, T. Inada // J. Cryst. Growth. – 1993. – Vol. 128. – PP. 439–443.
7. Разработка процедуры определения температурных полей и термопластических напряжений в слитках GaAs, выращенных LEC / А.П. Оксанич, П.О. Хозя, С.Е. Притчин // Нові технології: науковий вісник КУЕІТУ. – 2008. – Т. 19, № 1. – С. 4–10.
8. Comparison of deep levels spectra and electrical properties of GaAs crystals grown by vertical Bridgeman and by liquid encapsulated Czochralski methods / A.V. Markov, A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov et al. // Solid-State Electronics. – 2002. – Vol. 46. – PP. 269–277.
9. Радиационное дефектообразование в электрических полях (арсенид галлия, фосфид индия) / В.Н. Брудный, В.В. Пешев, А.П. Суржиков. – Новосибирск: Наука, 2001. – 135 с.
10. Влияние отжига в поле СВЧ излучения на остаточную деформацию и примесный состав приповерхностных слоев кремния / В.И. Пашков, В.А. Перевощиков, В.Д. Скупов // Письма в ЖТФ. – 1994. – Т. 20, № 8. – С. 14.
11. Effect of microwave and laser radiations on the parameters of semiconductor structures / A.E. Belyaev, E.F. Venger, I.B. Ermolovich et al. – Kiev, 2002. – 168 p.
12. Effect of active actions on the properties of semiconductor materials and structures / E.D. Atanassova, A.E. Belyaev, R.V. Konakova et al. – Kharkiv, 2007. – 179 p.
13. Effect of microwave treatment on current flow mechanisms in Au-TiB_x-Al-Ti-n⁺-n⁺-GaN-Al₂O₃ ohmic contacts / A.E. Belyaev, N.S. Boltovets, S.A. Vitusevich et al. // Semiconductors. – Vol. 44, iss. 6. – PP. 745–751.
14. Оптоэлектронные явления в слоях, полученных нитрированием GaP и GaAs. / В.Ф. Агекян, В.И. Иванов-Омский, В.Н. Князевский и др. // ФТП. – 1998. – Т. 32, № 10. – С. 1203–1205.
15. Optical and electrical characterization of n-GaAs surfaces passivated by N₂-H₂ plasma / V. Augelli, T. Ligonzo, A. Minafra et al. // Journal of Luminescence. – 2003. – Vol. 102–103. – PP. 519–524.
16. Low-energy particle treatment of GaAs surface / E. Pincik, M. Jergel, C. Falcony et al. // Thin Solid Films. – 2003. – Vol. 433. – PP. 108–113.
17. Hydrogen molecules in GaAs / E.V. Lavrov, J. Weber // Physica B. – 2003. – Vol. 65. – PP. 340–342.
18. Surface compositional changes in GaAs subjected to argon plasma treatment / C.C. Surdu-Bob, J.L. Sullivan, S.O. Saied et al. // Applied Surface Science. – 2002. – Vol. 202. – PP. 183–198.
19. Application of Diamond Like Carbon Films to Increase Transmission of Semi-Insulating GaAs Crystals in the IR Spectral Range / N.I. Klyui, A.I. Liptuga, V.B. Lozinskii et al. // Technical Physics Letters. – 2012. – Vol. 38, № 7. – PP. 609–612.
20. Increasing the Degradation Resistance of Semi-Insulating Gallium Arsenide Crystals by Plasma Processing / N.I. Klyui, A.I. Liptuga, V.B. Lozinskii et al. // Technical Physics Letters. – 2012. – Vol. 38, № 11. – PP. 1016–1019.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DEGRADATION STABILITY FOR SEMI-INSULATING GALLIUM ARSENIDE CRYSTALS DOPED WITH CHROMIUM OR TELLURIUM

F. Fomovsky

Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: fill.fo@mail.ru

In the work, optical properties of semi-insulating gallium arsenide crystals were studied in the infrared spectral range. The crystals were grown by the liquid encapsulated Czochralski method. Special attention was paid to investigations of the compensating impurity effect on degradation stability of the crystals against action of high frequency electromagnetic irradiation. It is shown that plasma treatment of semi-insulating gallium arsenide crystals compensated with tellurium allows us to improve their degradation stability against action of RF and microwave treatments. However, untreated samples of such type degrade substantially lower if compared to the untreated samples compensated with chromium. It gives evidence of significant influence of the compensating impurity type on degradation stability of the material. The mechanism for explanation of differences between properties of the GaAs crystals compensated with

chromium or tellurium was proposed. In particular, it was established that impurity with larger covalent radius (tellurium) results in appearance higher internal mechanical strains in the crystal. However, the level of the strain relaxation in such crystals is less under action of treatments that is responsible for their higher degradation stability.

Key words: gallium arsenide, IR transmittance, plasma treatment, degradation stability.

REFERENCES

1. Zi, S. (1984), *Fizika poluprovodnikovih priborov* [Physics of Semiconductor Devices], Mir, Moscow, Russia.
2. (1988), *Arsenid galliya v mikroelektronike* [Gallium arsenide in microelectronics], Mir, Moscow, Russia.
3. Chopra, K. and Das, S. (1986), *Tonkoplennochniye solnechniye elementi* [Thin film solar cells], Mir, Moscow, Russia.
4. Koltun, M.M. (1985), *Optika i metrologiya solnechnih elementov* [Optics and metrology of solar cells], Nauka, Moscow, Russia.
5. Gavrilenko, V.I., Grekhov, A.M., Korbutyak, D.V. and Litovchenko V.G. (1987), *Opticheskie svoistva poluprovodnikov* [Optical properties of semiconductors: the handbook], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
6. Shibata, M., Suzuki, T., Kuma, S., and Inada, T. (1993), "LEC growth of large GaAs single crystals", *J. Cryst. Growth*, vol. 128, pp. 439–443.
7. Oksanich, A.P., Hozya, P.O., and Pritchyn, S.E. (2008), "The development of temperature fields and stresses determination procedure in thermoplastic GaAs bars grown by LEC", *Novi tehnologii. Naukovyi visnyk KUEITU*, Vol. 19, no. 1, pp. 4–10.
8. Markov, A.V., Polyakov, A.Y., Smirnov, N.B. et al. (2002), "Comparison of deep levels spectra and electrical properties of GaAs crystals grown by the vertical Bridgeman and by liquid encapsulated Czochralski methods", *Solid-State Electronics*, vol. 46, pp. 269–277.
9. Brudnii, V.N., Peshev, V.V., Surzhikov, A.P. (2001), *Radiatsionnoye defektoobrazovaniye v elektricheskikh polyah (arsenid galliya, fosfid indiya)* [Radiation defect formation in the electric fields (gallium arsenide, indium phosphide)], Nauka, Novosibirsk, Russia.
10. Pashkov, V.I., Perevoschikov, V.A., and Skupov, V.D. (1994), "Effect of annealing in the field UHF radiation for the residual deformation and impurity composition of the surface layers of silicon", *Pisma v JTF*, vol. 20, no. 8, p. 14.
11. Belyaev, A.E., Venger, E.F., Ermolovich, I.B. et al. (2002), *Effect of microwave and laser radiations on the parametrs of semiconductor structures*, Intas, Kyiv, Ukraine.
12. Atanassova, E.D., Belyaev, A.E., Konakova, R.V. et al. (2007), *Effect of active actions on the properties of semiconductor materials and structures*, Institute for single crystals, Kharkiv, Ukraine.
13. Belyaev, A.E., Boltovets, N.S., Vitusevich, S.A. et al. (2010), "Effect of microwave treatment on current flow mechanisms in Au-TiB_x-Al-Ti-n⁺-n⁺-GaN-Al₂O₃ ohmic contacts", *Semiconductors*, vol. 44, no. 6, pp. 745–751.
14. Agekyan, V.F., Ivanov-Omskii, V.I., Knyazevskii, V.N. et al. (1998), "Optoelectronic effects in layers obtained by nitration GaP and GaAs", *FTP*, vol. 32, no. 10, pp. 1203–1205.
15. Augelli, V., Ligonzo, T., Minafra, A. et al. (2003), "Optical and electrical characterization of n-GaAs surfaces passivated by N₂-H₂ plasma", *J. of Luminescence*, vol. 102–103, pp. 519–524.
16. Pincik, E., Jergel, M., Falcony, C. et al. (2003), "Low-energy particle treatment of GaAs surface", *Thin Solid Films*, vol. 433, pp. 108–113.
17. Lavrov, E.V. and Weber, J. (2002), "Hydrogen molecules in GaAs", *Physica B*, vol. 65, pp. 340–342.
18. Surdu-Bob, C.C., Sullivan, J.L., Saied, S.O. et al. (2002), "Surface compositional changes in GaAs subjected to argon plasma treatment", *Applied Surface Science*, vol. 202, pp. 183–198.
19. Klyui, N.I., Liptuga, A.I., Lozinskii, V.B. et al. (2012), "Application of Diamond Like Carbon Films to Increase Transmission of Semi Insulating GaAs Crystals in the IR Spectral Range", *Technical Physics Letters*, vol. 38, no. 7, pp. 609–612.
20. Klyui, N.I., Liptuga, A.I., Fomovskii, F.V. et al. (2012), "Increasing the Degradation Resistance of Semi_Insulating Gallium Arsenide Crystals by Plasma Processing", *Technical Physics Letters*, vol. 38, no. 11, pp. 1016–1019.

Стаття надійшла 30.05.2014.