ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій
(повне найменування факультету)

Кафедра фізики та астрономії
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

«Вплив довготривалої сульфідної обробки на спектри фотоструму p-n переходів на основі арсеніду галію»

«Effect of long sulphide treatment on the photocurrent spectra of gallium arsenide p-n junctions»

Виконав: здобувач денної форми навчання
спеціальності 105- Прикладна фізика та наноматеріали
(код, назва спеціальності)
Освітня програма Прикладна фізика та наноматеріали
(назва)
Єрьомін Олексій Володимирович
(прізвище, ім'я, по-батькові здобувача)
Керівник к.ф.-м.н., доцент Маслєєва Н.В. _____
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)
Рецензент к.ф.-м.н., доцент Загинайло І.М._____
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:
Протокол засідання кафедри
Фізики та астрономії
№ ___ від ____.____. 20___ р.

Завідувач кафедри
_____ Гоцульський Володимир
(підпис) (прізвище,ім'я)

Захищено на засіданні ЕК № _____
протокол № __від ____.____.20___ р.

Оцінка_____/_____/_____
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)
Голова ЕК
_____ Ваксман Юрій
(підпис) (прізвище, ім'я)

Одеса 2022

ЗМІСТ

1. ВСТУП

Мініатюризація напівпровідникових пристроїв збільшує вплив поверхневих явищ на їхні характеристики та деградаційну стійкість, що особливо відчутно для напівпровідників групи $A^{III}B^{V}$, таких як GaAs. Через це виникає необхідність усунення дефектів та оксидів з поверхні та її захисту від впливу зовнішніх чинників. Сульфідна обробка поверхні є одним із методів, який дозволяє в одному технологічному циклі виконати обидві операції. Сульфідна обробка має і інші переваги, зокрема, спостерігалося покращення характеристик *p–n* та МДН структур, сонячних елементів та напівпровідникових лазерів. Проте немає систематичних досліджень, які були б присвячені впливу різної тривалості обробки з сульфідних розчинів на зміну характеристик напівпровідникових приладів.

Мета даної роботи — дослідити механізми впливу сульфідної обробки поверхні з різною тривалістю на спектри фотоструму *p–n* переходів на основі GaAs і пояснити спостережувані відмінності.

Для досягнення поставленої мети було здійснено аналіз наявних експериментальних і теоретичних робіт для з'ясування природи процесів на поверхні під час пасивації, складу утворюваного сульфідного шару, можливості квантових явищ у цьому шарі, проведено сульфідну обробку поверхні *p–n* переходів на основі GaAs 30% водним розчином Na_2S з різною тривалістю та досліджено спектри фотоструму до та після обробки.

Показано, що в сульфідна обробка призводить до збільшення фоточутливості *p–n* переходів на основі GaAs в інфрачервоній області спектру, яка пов'язана із шириною забороненої зони GaAs. В ультрафіолетовій області спектру ідентифіковано новий максимум фотоструму, що належить сульфідному шару. Із використанням моделі нескінченної прямокутної потенціальної ями була ідентифікована сполука (β-Ga_2S_3), з якої цей шар складений, та розраховано товщину цього шару.

ВИСНОВКИ

1. Сульфідна обробка поверхні призводить до збільшення фоточутливості *p–n* переходів на основі GaAs в околі *E*=1,43 еВ, що пояснюється видаленням шару оксидів та зменшенням густини поверхневих станів і швидкості поверхневої рекомбінації.
2. Короткотривала обробка до 40 с суттєво посилює фотострум в інфрачервоній області спектру, у той час посилення від тривалішої обробки до 100 с є набагато меншим.
3. Зменшення ефекту підсилення фоточутливості при довготривалій обробці пов'язане з появою механічних напружень між GaAs та Ga_2S_3 при утворенні товстішого шару Ga_2S_3, що спричиняє збільшення густини поверхневих станів і швидкості поверхневої рекомбінації.
4. Отримані результати дозволяють оптимізувати тривалість сульфідної обробки поверхні *p–n* переходів на основі GaAs для максимального збільшення фотоструму в інфрачервоній області спектру.
5. Сульфідна обробка поверхні *p–n* переходів на основі GaAs призводить до появи максимума фотоструму в ультрафіолетовій області спектру, що пов'язано з утворенням нанорозмірного шару Ga_2S_3.
6. Динаміка зміщення максимума в ультрафіолетовій області від 3,0 еВ до 2,6 еВ при збільшенні часу обробки свідчить про утворення наношарів гексагональної модифікації β-Ga_2S_3 з шириною забороненої зони в макростані E_g=2,48 еВ.
7. На основі співставлення товщини наношару, який утворено сполукою Ga_2S_3, та довжини хвилі де Бройля вільного електрона в ньому доведено можливість застосування уявлень про нескінченну прямокутну квантову яму для опису динаміки процесів на поверхні GaAs під час сульфідної пасивації.

Підпис автора

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gupta K. M. Advanced Semiconducting Materials and Devices / K. M. Gupta, N. Gupta. — Springer International Publishing Switzerland, 2016.
2. Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices / S. M. Sze, Kwok K. Ng. — John Wiley & Sons, 2007.
3. Шалимова К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. — Лань, Санкт-Петербург, 2010.
4. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. — Высшая школа, Москва, 1987.
5. Shur M. Physics of Semiconductor Devices / M. Shur. — Prentice Hall, 1990.
6. Cheng. K. Y. III–V Compound Semiconductors and Devices / K. Y. Cheng. — Springer, 2020.
7. Dalapati P. Analysis of the Temperature Dependence of Diode Ideality Factor in InGaN-Based UV-A Light-Emitting Diode / P. Dalpati, N. B. Manik, A. N. Basu // Physics of Semiconductor Devices. — 2020. — Vol. 54 (10). — P. 1284–1289.
8. Malyutenko V. K. Current crowding effect on the ideality factor and efficiency droop in blue lateral InGaN/GaN light emitting diodes / V. K. Malyutenko, S. S. Bolgov, and A. D. Podoltsev // Applied Physics Letters. — 2010. — Vol. 97. — 251110.
9. Евстропов. В. В. Ток, обусловленный рекомбинацией через многоуровневый центр в слое объемного заряда *p–n* структуры / В. В. Евстропов, К. В. Киселев, И. Л. Петрович, Б. В. Царенко // Физика и техника полупроводников. — 1984. — Т. 18 (10). — 1852.
10. Xu J. Reduction in efficiency droop, forward voltage, ideality factor, and wavelength shift in polarization-matched GaInN/GaInN multi-quantum-

well light-emitting diodes / J. Xu, M. F. Schubert, A. N. Noemaun, D. Zhu, J. K. Kim, E. F. Schubert, M. H. Kim, H. J. Chung, S. Yoon, C. Sone, Y. Park // Applied Physics Letters. — 2009. — Vol. 94. — 011113.

11. Masui H. Technique to evaluate the diode ideality factor of light-emitting diodes / H. Masui, S. Nakamura, S. P. DenBaars // Applied Physics Letters. — 2010. — Vol. 96. — 073509. — P. 1—3.
12. Masui H. Diode ideality factor in modern light-emitting diodes / H. Masui // Semiconductor Science and Technology. — 2011. — Vol. 26. — 075011.
13. Птащенко А. А. Влияние туннельного захвата с испусканием фононов на примесную рекомбинацию носителей заряда в *p–n* переходах / А. А. Птащенко, Н. В. Мороз, Б. В. Цап // Украинский физический журнал. — 1984. — Т. 29 (4). — 575.
14. Prasad Sh. A deep-level LED / Sh. Prasad // Nature Materials. — 2003. — Vol. 2. — 359.
15. Шалимова К. В. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам / Под ред. К. В. Шалимовой // Москва, Высшая школа, 1968.
16. Бессолов В. Н. Халькогенидная пассивация поверхности полупроводников. Обзор / В. Н. Бессолов, М. В, Лебедев // Физика и техника полупроводников. — 1998. — Т. 32 (11). — 1281.
17. Лебедев М. В. Модификация атомной и электронной структуры поверхности полупроводников $A^{III}B^{V}$ на границе с растворами электролитов / М. В. Лебедев // Физика и техника полупроводников. — 2020. — Т. 54 (7). — 587.

18. Xu. Y. Effects on the Surface and Luminescence Properties of GaAs by SF_6 Plasma Passivation / Y. Xu, X. Gao, X. Zhang, Z. Qiao, J. Zhang, L. Zhou, B. Bo // Crystals. — 2018. — Vol. 8. — 339.
19. Матвєєва Л. О. Структурна досконаліcть і електронні параметри сульфідованої поверхні арсеніду галію / Л.О. Матвеєв, О. Ю. Колядіна, І. М. Матіюк, О.М. Міщук // Фізика і хімія твердого тіла. — 2006. — Т. 7 (3). — 461.
20. Tajik N. Sulfur passivation and contact methods for GaAs nanowire solar cells N. Tajik, Z. Peng, P. Kuyanov, R. R. LaPierre // Nanotechnology. — 2011. —Vol. 22. — 225402.
21. Tajik N. Improved conductivity and long-term stability of sulfur-passivated n-GaAs nanowires / N. Tajik, A. C. E. Chia, R. R. LaPierre // Applied Physics Letters. — 2012. — Vol. 100. — 203122.
22. Kim J.-G. Impact of sulfur passivation on carrier transport properties of $In_{0.7}Ga_{0.3}As$ quantum-well MOSFETs / Jun-Gyu Kim, Hyeon-Bhin Jo, In-Geun Lee, Tae-Woo Kim, Dae-Hyun Kim // Journal of Electron Devices Society. — 2021. — Vol. 9. — 209.
23. Yokoyama M. III-V-semiconductor-on-insulator n-channel metal-insulator-semiconductor field-effect transistors with buried Al_2O_3 layers and sulfur passivation: Reduction in carrier scattering at the bottom interface /M. Yokoyama, T. Yasuda, H. Takagi, N. Miyata, Y. Urabe, H. Ishii, H. Yamada, N. Fukuhara, M. Hata, M. Sugiyama, Y. Nakano, M. Takenaka, S. Takagi // Applied Physics Letters. — 2010. — Vol. 96. — 142106.
24. Alian A. Ammonium sulfide vapor passivation of $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ and InP surfaces / A. Alian, G. Brammertz, C. Merckling, A. Firrincieli, W.-E Wang, H. C Lin, M. Caymax, M. Meuris, K. De Meyer, M. Heyns // Aplied Physics Letters. — 2011. — Vol. 99. — 112114.

25. Zizeng L. The effect of nitridation and sulfur passivation for $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ surfaces on their $Al/Al_2O_3/InGaAs$ MOS capacitors properties / L. Zizeng, C. Mingmin; W. Shengkai, L. Qi, X. Gongli, G. Xi, L. Honggang, L. Haiou // Journal of Semiconductors. — 2016. — Vol. 37 (2). — 026002.
26. Lvova T. V. Chemical Passivation of InSb (100) Substrates in Aqueous Solutions of Sodium Sulfide / T. V. Lvova, M. S. Dunaevskii, M. V. Lebedev, A. L. Shakhmin, I. V. Sedov, S.V. Ivanov // Semiconductors. — 2013. — Vol. 47 (5). — 721.
27. Wu. J. Strong sulfur passivation effects on the gas sensitivity of an $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ surface quantum dots coupling structure / J. Wu, Y. Yang, Z. Liu, G. Wang // Journal of Crystal Growth. — 2021. — Vols. 560–561. — 126058.
28. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. — «Энергоатомиздат», Москва, 1983.
29. Ghita R. V. On the passivation of GaAs surface by sulfide compounds / R. V. Ghita, C. C. Negrila, C. Cotirlan, C. Logofatu // Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures. — 2013. — Vol. 8 (3). —1335.
30. Jastrzebski C. Synthesis and structural characterization of microcrystalline Ga_2S_3 layers on a GaP semiconductor substrate / C. Jastrzebski, D. J. Jastrzebski, V. Kozak, K. Pietak, M. Wierzbicki, W. Gebicki // Materials Science in Semiconductor Processing. — 2019. — Vol. 94. — 80.
31. Kokh K. A. Study of Ga_2S_3 crystals grown from melt and $PbCl_2$ flux / K.A. Kokh, Z.-M. Huang , J.-G. Huan , Y.-Q. Gao, B. Uralbekov, J. Panomarev, I.N. Lapin, V.A. Svetlichnyi, G.V. Lanskii, Yu. M. Andreev // Materials Research Bulletin. — 2016. — Vol. 84. — 462.

32. Ho C.-H. Optically decomposed near-band-edge structure and excitonic transitions in Ga_2S_3 / C.-H. Ho, H.-H. Chen // Nature: Scientific Reports. — 2014. — Vol. 4. — 6143.
33. Madelung O. Semiconductors Data Handbook / O. Madelung. — Springer, 2004.
34. Новоселова А. В. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник / А. В. Новослелова, В. Б. Лазарев, З. С. Медведева, Н. П. Лужная, А. А. Левин, А. А. Елисеев, В. П. Зломанов, В. Т. Калинников, В. Я. Шевченко, Я. Х. Гринберг, М. С. Миргаловская, И. С. Ковалева, О. А. Садовская. — «Наука», Москва, 1978.
35. Nagat A. T. Growth and Transport Properties of some Gallium Chalcogenides from the Group $M_2^{III}X_3^{VI}$ Semiconductor Compounds / A.T. Nagat, F.S. Bahabri, R.H. Orainy, M. Abou Zied, S.E. Al-Garni, W.S.Al-Ghamdi // Journal of King Abdula University: Science. — 2011. — Vol. 23 (2). — 31.
36. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда. — Техносфера, Москва, 2009.
37. Liu H. F. Synthesis and Phase Evolutions in Layered Structure of Ga_2S_3 Semiconductor Thin Films on Epiready GaAs (111) Substrates / H. F. Liu, K. K. Ansah Antwi, N. L. Yakovlev, H. R. Tan, L. T. Ong, S. J. Chua, D. Z. Chi // ACS Applied Materials and Interfaces. — 2014. — Vol. 6. — 3501.