

Міністерство освіти і науки України
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
Фізико-математичний факультет
Кафедра фізики

Дипломна робота (проект)

магістра

з теми: **«ДОСЛІДЖЕННЯ ЛЮМІНІСЦЕНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ШИРОКОЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ»**

Виконав:

Магістрант 2 курсу F1-M22 групи
спеціальності 014 Середня освіта
(Фізика)

Степаненко Артем

Керівник:

кандидат фізико-математичних наук,
доцент ***Оптасюк С.В.***

Кам'янець-Подільський – 2023 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ЛЮМІНІСЦЕНЦІЯ КРИСТАЛОФОСФОРІВ	6
1.1. Елементи теорії люмінесценції кристалофосфорів	6
1.2. Основні механізми електролюмінесценції.....	9
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ПОГЛИНАННЯ	14
2.1. Методика дослідження спектрів поглинання кристалофосфорів	14
2.2. Дослідження спектрів пропускання тонких плівок нелегованого ZnSe.....	18
РОЗДІЛ 3. ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК ZnSe	21
3.1. Фундаментальне поглинання світла плівками ZnSe	21
3.2. Визначення ширини забороненої зони напівпровідників по краю власного поглинання	29
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ПОГЛИНАННЯ	37
4.1. Поглинання світла в плівках ZnSe: Cr, ZnSe: Co	37
4.2. Поглинання світла в плівках ZnSe: Ni.....	45
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

ВСТУП

Кваліфікаційна робота на тему «Дослідження люмінесцентних характеристик полікристалічних широкозонних напівпровідників» є актуальною з багатьох причин. У сучасному світі, з розвитком технологій та наукових досліджень, вивчення властивостей напівпровідників набуває все більшого значення. Особливий інтерес представляють широкозонні напівпровідники, які мають унікальні електронні та оптичні властивості, що робить їх незамінними в багатьох галузях науки та техніки. Ці матеріали використовуються в різних областях, включаючи енергетику, електроніку, телекомунікації та медицину.

Однією з ключових характеристик широкозонних напівпровідників є їхня люмінесцентність, яка відіграє важливу роль у таких областях, як оптоелектроніка, фотоніка, біомедицина та інше. Люмінесцентні властивості цих матеріалів можуть бути використані для створення нових типів світлодіодів, лазерів, сенсорів та інших пристроїв. Широкозонні напівпровідники, такі як оксид цинку (ZnO), нітрид галію (GaN) та оксид індію-олова (ITO), використовуються в різних застосуваннях, включаючи світлодіоди, сонячні батареї, транзистори, лазери та багато іншого. Їх широкі зони заборони та висока стійкість до радіації роблять їх ідеальними для використання в суворих умовах, таких як космічні дослідження.

Вивчення люмінесцентних характеристик цих матеріалів може допомогти в розробці нових технологій та пристроїв, які можуть використовуватися в різних галузях. Наприклад, люмінесцентні властивості можуть бути використані для створення ефективних світлодіодів, які випромінюють світло при певній довжині хвилі. Це може бути особливо корисно в медицині для створення біомедичних сенсорів або для використання в оптоелектроніці для створення ефективних дисплеїв.

Таким чином, дана робота є важливим кроком у вивченні широкозонних напівпровідників та їх люмінесцентних властивостей, що може відкрити нові можливості для наукових досліджень та технологічних застосувань.

Мета роботи.

Метою цієї роботи є дослідження оптичного поглинання світла видимого діапазону полікристалічних широкозонних напівпровідників та дослідження впливу домішок на їх оптичні характеристики. Це включає в себе вивчення властивостей люмінесценції цинк селеніду, а також аналіз впливу різних факторів на ці властивості, як от легування.

Завдання.

- Огляд теорії люмінесцентних характеристик кристалофосфорів
- Вивчення сучасних методів дослідження люмінесцентних характеристик полікристалічних широкозонних напівпровідників.
- Дослідження спектрів поглинання люмінофорів.
- Дослідження спектрів пропускання тонких плівок нелегованого ZnSe.
- Дослідження фундаментального поглинання світла плівками ZnSe
- Синтез об'єкту дослідження, а саме цинк селеніду.
- Визначення ширини забороненої зони напівпровідників по краю власного поглинання.
- Дослідження оптичних властивостей тонких плівок ZnSe легованих 3d елементами.
- Порівняння люмінесцентних характеристик легованих та нелегованих люмінофорів ZnSe.

Об'єкт дослідження.

Леговані та нелеговані полікристалічні зразки ZnSe

Предмет дослідження.

Люмінесцентні характеристики та механізми поглинання світла в полікристалах та тонких плівках селеніду цинку.

Наукова новизна.

Результати, отримані при виконанні дипломних досліджень, можуть бути використані як у подальших дослідженнях лабораторії напівпровідників, так і у вивченні окремих питань курсів загальної і теоретичної фізики, фізики твердого

тіла та спецкурси «Фізичні основи мікроелектроніки». Також були отримані результати можуть сприяти подальшому розвитку технологій, пов'язаних з широкозонними напівпровідниками, та відкрити нові перспективи для їх застосування. Особистий внесок студента також полягає в відпрацюванні технологічних режимів синтезу сполук та вирощування кристалів, які забезпечують отримання зразків з відтворюваними параметрами, а також вивченні впливу цих режимів на оптичні властивості матеріалів, а також форму і властивості кристалів.

Апробація результатів досліджень.

Результати дослідження були представлені та обговорені з науковим керівником та деяких семінарах, що сприяло обміну знаннями та отриманню важливого зворотного зв'язку від спільноти. Деякі з методів, розроблених в ході цієї роботи, були успішно використані в інших дослідницьких проектах, що підтверджує їх практичну цінність. На основі отриманих результатів були розроблені рекомендації щодо використання широкозонних напівпровідників в різних галузях, включаючи оптоелектроніку, фотоніку та біомедицину.

Ці результати підтверджують важливість та актуальність проведених досліджень, а також показують, що вони можуть бути використані для подальшого розвитку технологій, пов'язаних з широкозонними напівпровідниками.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. В ході виконання магістерської роботи були отримані тонкі плівки ZnSe та дослідженні спектри пропускання даних плівок. Аналіз отриманих спектрів пропускання та поглинання дозволив визначити ширину забороненої зони селеніду цинку.
2. Дослідження спектрів оптичного поглинання кристалів ZnSe: Cr установили наявність характерних смуг в синьо-зеленій області спектра. Лінії поглинання в синій області інтерпретовані як результат електронних переходів з валентної зони на високі збуджені стани хрому 3T_2 . Лінія поглинання в зеленій області спектра пояснюється внутрішньоцентровими переходами $^5T_2 \rightarrow ^3T_2$, що відбуваються в межах іона Cr^{2+} .
3. Дослідження поглинання світла в широкому спектральному діапазоні в кристалах ZnSe:Co, виявили присутність однотипних спектральних ліній поглинання в цих кристалах. Спостережуване зміщення цих ліній обумовлено збільшенням іонного радіусу аніонів в послідовності S - Se - Te.
4. Представлені схеми електронних переходів у досліджуваних кристалах, що ілюструють процеси поглинання і фотопровідності. Визначено, що основний стан іонів кобальту і хрому в забороненій зоні досліджуваних кристалів поблизу валентної зони.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. QDs of Wide Band Gap II–VI Semiconductors Luminescent Properties and Photodetector Applications / M. Abdullah, Baqer O. Al-Nashy, Ghenadii Korotcenkov & Amin H. Al-Khursan // Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors pp – 2023 – p. 399–425, [QDs of Wide Band Gap II–VI Semiconductors Luminescent Properties and Photodetector Applications | SpringerLink](#)
2. Ultrawide-bandgap semiconductors: An overview / Man Hoi Wong, Oliver Bierwagen, Robert J. Kaplar & Hitoshi Umezawa // Journal of Materials Research – 2021, [Ultrawide-bandgap semiconductors: An overview | SpringerLink](#)
3. Wide Band Gap Semiconductor Devices for Power Electronic Converters / S. M. Sajjad Hossain Rafin, Roni Ahmed, Osama A. Mohammed // Institute of Electrical and Electronics Engineers – 2023 – p. 10-15, [Wide Band Gap Semiconductor Devices for Power Electronic Converters | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)
4. Features of pore formation of semiconductors by example zinc selenide and indium phosphide / V.V. Kidalov, O.V. Marakhovskiy // Berdyansk State Pedagogical University – 2012 – p. 13-17, [\(PDF\) Features of pore formation of semiconductors by example zinc selenide and indium phosphide \(researchgate.net\)](#)
5. An Introduction to Luminescence of Solids / Leverenz H. W. // New York - 1980.
6. Photoluminescence of liquid and solid substances / Levshin V.L. // Gostekhizdat, - 1971.
7. Some questions of the theory of luminescence of crystals / Adirovich E.I./ Gostekhizdat - 1991.
8. Lushchik Ch. B., Proceedings of the Institute of Physics and Astronomy of the Academy of Sciences of the ESSR, vol. 3, 1955, p. 3. 12. Scintillator crystals and ionizing radiation detectors based on them / [L.V. Atroshchenko, S.F. Burachas, L.P. Galchinetsky, B.V. Grinev, etc.] - Kyiv. “Naukova Dumka”, 1998. - 310 p.

9. Ryzhikov V.D. Development of new scintillation materials based on A2B6 compounds with an isovalent activator / Ryzhikov V.D., Chaikovsky E.F. - Izvestiya AN USSR. Ser. physical 1979, vol. 43, no. 6, pp. 1150–1154.
10. Scintillator crystals and ionizing radiation detectors based on them / [L.V. Atroshchenko, S.F. Burachas, L.P. Galchinetsky, B.V. Grinev, etc.] - Kyiv. "Naukova Dumka", 1998. - 310 p.
11. Ioffe A.F. Physics of semiconductors / Ioffe A.F. – M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1957. – 315 p.
12. Huerth C. Physics of Solid State / Huerth Ch., Thomson R. – M.: Mir, 1969. – 298 p.
13. Kazannin O.N. Inorganic phosphors / Kazannin O.N., Morkovsky L.Ya., Mironov I.A., - L.: Chemistry, 1975 – 301 p.
14. Gurvich A.M. Introduction to the chemical physics of crystal phosphors / Gurvich A.M. [textbook for universities] - M.: Higher. school, 1982. – 376 p.
15. Levshin V.L. Photoluminescence of liquid and solid bodies. / Levshin V.L. – M. – L. Gostekh. published, 1951. – 205 p.
16. Fok M.V. Physics of Solid State / Fock M.V., 1963, issue. 5.,- 1489 p.
17. Taft E.A. J. Phys. Chem Zink Selen/ Taft E.A, Philipp H.R. J. 1957, v.3, p.1.
18. Watkins. J. Point defects in TV. bodies / Watkins. J. - M.: "Mir", 1979. - P. 221–242.
19. Guvchich A.M. X-ray phosphors and X-ray screens / Guvchich A.M. – M. Atomizdat, 1976. – 319 p.
20. Nye J. Physical properties of crystals / Nye J. Mir, - M., 1967. - 385 p.
21. Serdyuk V.V. Luminescence of semiconductors / Serdyuk V.V., Vaksman Yu.F. – Kyiv–Odessa: Vishcha School, 1988. - 300 p.
22. Vaksman Yu.F. Self-active luminescence of zinc selenide single crystals: dis. ... Doctor of Phys.-Math. Sciences: 01.03.77/ Vaksman Yuriy Fedorovich - Odessa, 2001. - 251 p.
23. Optical measurements / [Borbat A.M., Gorban I.S., Okhrimenko B.A. and others] - K., Tekhnika, 1967. - 420 p.

24. Agekyan V.F. Intracenter transitions of iron group ions in semiconductor matrices of the A₂B₆ type (Review) / Agekyan V.F. // Phys. TV bodies. – 2002. – T. 44, No. 11. – S. 1921-1939.
25. Vallin J. T. Infrared absorption in some II-VI compounds doped with Cr/ Vallin J. T., Slack G. A., Roberts S. // Phys. Rev. – 1970. – V. B2. – P. 4313-4333.
26. W.-T. Kim, M.-S. Jin, S. Hyeon. Optical absorption of ZnGa₂Se₄:Cr²⁺ single crystals // Sol. St. Com. – 1990 – V. 74, No. 2. – P. 123.
27. Fistul V.I. Atoms of doping impurities in semiconductors (state and behavior) / V.I. Fistul - Fizmatlit., M., 2004. - 432 p.
28. Champert P. A. Efficient lasing of Cr²⁺:ZnSe at 2.2 μm pumped by all-format seeded Raman source/ Champert P. A., Popov S. V., Taylor J. R. // Electronic Let. – 2002. – V. 38, No. 10. – P. 448-449.
29. Efficient laser lasing on a Cr²⁺:ZnSe crystal grown from the vapor phase / [Kozlovsky V.I., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Podmarkov Yu.P., Frolov M.P.] - Quantum. electronics. – 2003. – T. 33, No. 5. – P. 408-410.
30. Quantum. electronics. Study of nonlinear transmission of ZnSe:Co²⁺ crystals at a wavelength of 1.54 μm / [Ilyichev N. N., Shapkin P. V., Mosaleva S. E., Nasibov A. S.] – 2004. – T. 34, No. 12 . – pp. 1169-1172.
31. Optical absorption and diffusion of chromium in ZnSe single crystals / [Vaksman Yu. F., Pavlov V. V., Nitsuk Yu. A., Purtov Yu. N., et al.] - Phys. and tech. semiconductors. – 2005. – T.39, No. 4. – P. 401-404.
32. Preparation and optical properties of ZnSe single crystals doped with cobalt / Vaksman Yu. F., Pavlov V. V., Nitsuk Yu. A., Purtov Yu. N., Nasibov A. S., Shapkin P. V. // Phys. . and tech. semiconductors. – 2006. – T.40, No. 7. – P. 815-818.
33. Mak C.L. Optical transitions in Zn_{1-x}Co_xSe and Zn_{1-x}Fe_xSe: Strong concentration-dependent effective p-d exchange/ Mak C.L., Sooryakumar R., Steiner M.M. // Phys. Rev. B. – 1993. – V. B48. – P. 11743-11747.

34. Energy states of cobalt in zinc selenide and sulfide / [Sokolov V.I., Mamedov A.N., Surkova T.P., Chukichev M.V., et al.] // Opt. and spectrum. – 1987. – T. 62, No. 4. – P. 805-811.
35. Radlinski A. P. Properties of Co impurities in Zinc Selenide crystals (II)/ Radlinski A. P. // Phys. Stat. Sol.(b). 1978. – V. 86. – P. 41-46.
36. Kalinkin I.P. Epitaxial films of A₂B₆ compounds/ Kalinkin I.P. Aleskovsky V.B., Simashkevich A.V. – Leningrad: 1978. – 311 p.
37. Gribkovsky V.P. Theory of absorption and emission of light in semiconductors. Science and technology / Gribkovsky V.P. - Minsk, 1975. - 464 p.
38. Quantum electronics / [Akimov V.A., Voronov A.A., Kozlovsky V.I., Korostelin Yu.V. and others] - M.: “Mir” - 2006. - 299p.
39. Physics and technology of semiconductors / [Vaksman Yu.F., Pavlov V.V., Nitsuk Yu.A., Purtov Yu.N. etc.] – Chernivtsi, 2005. - 401c.
40. Physics and technology of semiconductors / [Vaksman Yu.F., Pavlov V.V., Nitsuk Yu.A., Purtov Yu.N. and others] - Chernivtsi, 2006. – 815c.
41. Makhniy V.P. Analysis of the behavior of isovalent houses in zinc selenide / Makhniy V.P., Stets O.V., Tkachenko I.V. // Science newsletter of ChNU: Physics. Electronics, 2002. – 133c.
42. Physics and technology of semiconductors / [Vaksman Yu.F., Pavlov V.V., Nitsuk Yu.A., Shapkin P.V. and others], Chernivtsi, 2001. – 219 p.
43. Kazansky S.A. Solid state physics / Kazansky S.A., Ryskin A.I., Khilko G.I. – M., Nauka, 1968. – 315 p.
44. Madelung. O. Solid state physics. Localized states/ Madelung. O. -M., Nauka, 1985. – 375 p.
45. A. Zunger. Sol. St. Phys./ A. Zunger., 39, 1986- p.276
46. Dmitriev Yu.N. Thermodynamics of isovalent doping of crystals of semiconductor compounds A₂B₆/ Dmitriev Yu.N., Ryzhikov V.D., Galchinetsky L.P. - Kharkiv, 1990. - 139 p.