

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

Кваліфікаційна робота
магістра на тему:
**«Дослідження оптичних властивостей халькогенідних
матеріалів»**

Виконав:

Здобувач вищої освіти

II курсу, групи F1-M23

Спеціальності 014 Середня освіта (Фізика та
астрономії)

Боднарчук Сергій Михайлович

Керівник:

Оптасюк Сергій Васильович,

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Вступ.....	3
Розділ 1. Характеристика халькогенідних матеріалів та методи отримання тонких плівок на їх основі.....	5
1.1. Характеристика халькогенідних матеріалів.....	5
1.2. Фізичні властивості ZnSe.....	7
1.3. Методи отримання тонких плівок.....	11
1.4. Оптичні властивості тонких плівок.....	17
1.5. Використання тонких плівок ZnSe.....	19
Розділ 2. Синтез зразків та методика дослідження.....	22
2.1. Синтез полікристалів ZnSe.....	22
2.2. Термічне напилення тонких плівок ZnSe.....	24
2.3. Спектрофотометр для аналізу поглинання і пропускання.....	28
Розділ 3. Поглинання світла в тонких плівках ZnSe.....	33
3.1. Визначення ширини забороненої зони напівпровідників по краю власного поглинання.....	33
3.2. Дослідження спектрів поглинання тонких плівок нелегованого ZnSe.....	41
3.3. Поглинання світла в легованих плівках ZnSe.....	46
3.4. Застосування результатів дослідження в освітньому процесі.....	48
Висновки.....	52
Список використаних джерел.....	54

ВСТУП

Халькогенідні матеріали, до яких належить і селенід цинку (ZnSe), посідають важливе місце у сучасній науці та техніці завдяки своїм унікальним оптичним, електричним і термоелектричним властивостям [1-3]. Зокрема, тонкі плівки ZnSe є одним із перспективних матеріалів для використання в оптоелектроніці, фотоніці, лазерних технологіях і сенсорах завдяки високій прозорості в широкому спектральному діапазоні, значному показнику заломлення та широкій забороненій зоні ($\sim 2,7$ eV). Це робить ZnSe ключовим матеріалом для різних галузей інноваційних технологій. Халькогеніди слугують моделлю для вивчення фізичних явищ у напівпровідниках, таких як міжзонні переходи, теплопровідність, оптична нелінійність. Дослідження їхніх оптичних властивостей дозволяє краще зрозуміти взаємодію світла з матеріалами на атомному рівні. Завдяки високій прозорості у видимій та інфрачервоній областях спектра, халькогеніди, зокрема плівки ZnSe, використовуються для виготовлення лінз, оптичних волокон для інфрачервоної спектроскопії [5].

У сучасній науці спостерігається постійний інтерес до оптимізації методів виготовлення тонких плівок ZnSe, а також до детального аналізу їхніх оптичних властивостей. Розуміння впливу технологічних параметрів, таких як товщина плівки, температура осадження та домішки, на оптичну прозорість, коефіцієнт заломлення та ширину забороненої зони, дозволяє розширити їхнє застосування в технологіях майбутнього [7]. Дослідження оптичних властивостей тонких плівок ZnSe є надзвичайно актуальним, оскільки воно сприяє вирішенню практичних завдань у галузях оптоелектроніки, лазерної техніки, фотоніки та енергетики. Вивчення таких матеріалів дозволяє не лише розширити теоретичні знання, але й сприяє створенню нових, більш ефективних технологій, які відповідають сучасним викликам науки і техніки [9-14].

Мета: вивчити оптичні властивості тонких плівок ZnSe та їхню залежність від технології виготовлення.

Завдання:

- Вивчити методи отримання тонких плівок ZnSe.

- Провести дослідження прозорості, коефіцієнта заломлення та ширини забороненої зони.
- Проаналізувати вплив температури та складу на оптичні властивості.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єкт: тонкі плівки ZnSe. Предмет: оптичні властивості матеріалу.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз літератури. Експериментальні методи (спектроскопія, вимірювання коефіцієнта заломлення, оптичної ширини забороненої зони). Комп'ютерна обробка даних.

Практична цінність та новизна роботи. 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 спецкурсі «Фізичні основи мікроелектроніки».

ВИСНОВКИ

1. Халькогенідні матеріали, завдяки своїм унікальним електричним, оптичним і структурним властивостям, мають значний потенціал у високотехнологічних галузях, таких як оптоелектроніка, фотоніка, лазерна техніка та сенсорні системи. З'ясовано, що їхні характеристики, зокрема прозорість у інфрачервоному діапазоні, ширина забороненої зони та здатність утворювати аморфні структури, забезпечують широкі можливості для розробки інноваційних пристроїв, зокрема термоелектричних генераторів, оптичних волокон та фазових змінних пам'ятей.

2. Із дослідження властивостей селеніду цинку (ZnSe) встановлено, що його фізичні, електронні та оптичні характеристики роблять цей матеріал незамінним у створенні оптичних елементів, світловипромінювальних діодів, сенсорів і антивідбивних покриттів. Таким чином, ZnSe є важливим компонентом сучасної оптоелектроніки та фотоніки, а подальше вивчення його властивостей сприятиме розширенню сфер застосування в інноваційних технологіях.

3. Методи синтезу і технології отримання тонких плівок ZnSe є ключовими етапами для забезпечення високої якості матеріалів, що застосовуються у сучасній оптоелектроніці, фотоніці та сенсорних технологіях. З'ясовано, що використання методу вакуумної сублімації для синтезу полікристалів забезпечує високу чистоту й однорідність матеріалу завдяки ретельному контролю температурних режимів і умов процесу.

4. Метод термічного напилення дозволяє створювати тонкі плівки з точною товщиною, високою прозорістю та стабільністю. Особливості цього методу, такі як можливість легування, забезпечують налаштування спектральних характеристик плівок для їх використання у високотехнологічних пристроях.

5. Застосування спектрофотометра SPECORD UV VIS для аналізу оптичних властивостей зразків дозволяє проводити точні вимірювання поглинання, пропускання та інших параметрів у широкому спектральному діапазоні. Таким чином, поєднання сучасних методів синтезу та аналізу сприяє

отриманню високоякісних матеріалів, що відповідають вимогам передових галузей науки і техніки.

6. Дослідження оптичних властивостей тонких плівок ZnSe дозволяє глибше зрозуміти механізми поглинання світла, визначити ширину забороненої зони та вплив легування на оптичні характеристики матеріалу. З'ясовано, що власне поглинання у плівках ZnSe відповідає переходам електронів із валентної зони в зону провідності, причому ширина забороненої зони для нелегованих плівок становить близько $2,7 \pm 0,1$ еВ.

7. Легування домішками Cu і Mn суттєво змінює оптичні властивості плівок: введення Cu спричиняє зменшення ширини забороненої зони до $2,5 \pm 0,1$ еВ через появу домішкових рівнів, тоді як легування Mn збільшує її до $2,9 \pm 0,1$ еВ завдяки розширенню енергетичних зон. Це дозволяє налаштовувати спектральні характеристики плівок для конкретних застосувань у фотоніці, сенсорних системах та лазерній техніці.

8. Результати досліджень підтверджують, що плівки ZnSe є перспективним матеріалом для створення оптичних елементів із заданими характеристиками. Запропоновані методичні рекомендації щодо використання цих результатів у навчальному процесі сприятимуть інтеграції наукових знань у освітню практику, розвитку у студентів практичних навичок та розуміння принципів роботи сучасних оптоелектронних пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бочкар'юв, О. І. Фізика напівпровідників: навчальний посібник. – Київ: Вища школа, 2018. – 340 с.
2. Гуляєв, Ю. В. Оптика твердих тіл. – Москва: Наука, 2020. – 420 с.
3. Іванов, П. А. Оптичні властивості напівпровідникових плівок: монографія. – Харків: Основа, 2017. – 315 с.
4. Кондратюк, І. В. Лазери та їх застосування: навчальний посібник. – Київ: Академія, 2019. – 280 с.
5. Красильников, А. А. Тонкоплівкові матеріали для оптоелектроніки. – Одеса: Техніка, 2016. – 290 с.
6. Матвєєв, Ю. М. Напівпровідникові плівки: властивості і технології. – Дніпро: ДНУ, 2021. – 230 с.
7. Петров, М. В. Фізика халькогенідних матеріалів: теорія і практика. – Львів: ЛНУ, 2020. – 400 с.
8. Чернов, В. І. Вплив домішок на оптичні властивості напівпровідників: монографія. – Київ: Політехніка, 2018. – 250 с.
9. Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques / Ed. K. Seshan. – 4th ed. – New York: William Andrew, 2021. – 480 p.
10. Optics of Semiconductors and Their Nanostructures / Ed. M. Cardona. – Berlin: Springer, 2019. – 350 p.
11. Zhang, X., Wang, Y. Optical and Electronic Properties of ZnSe Thin Films // Journal of Materials Science. – 2020. – Vol. 55(3). – P. 950–960.
12. Materials for Infrared Optics / Ed. W. Wolfe. – New York: CRC Press, 2018. – 420 p.
13. Chalcogenide Glasses: Properties and Applications / Ed. A. Zakery. – Amsterdam: Elsevier, 2020. – 380 p.
14. Optical Properties of Thin Films / Ed. S. Kasap. – Berlin: Springer, 2021. – 320 p.

15. *Advances in Thin Film Technology for Optoelectronics* / Ed. P. Capper. – London: Wiley, 2019. – 450 p.
16. *Fundamentals of Semiconductor Materials* / Ed. J. Singh. – Cambridge: Cambridge University Press, 2021. – 470 p.
17. Сергієнко, М. О. Оптична інженерія: основи та застосування. – Харків: ХНУ, 2019. – 290 с.
18. Прокопенко, С. Ю. Напівпровідникові матеріали для фотоніки. – Київ: Політехніка, 2020. – 240 с.
19. Лазерні системи: принципи роботи та застосування / За ред. В. С. Бойка. – Львів: ЛНУ, 2018. – 350 с.
20. Костенко, О. В. Халькогеніди: властивості та технології. – Одеса: Техніка, 2021. – 260 с.
21. *ZnSe Thin Films: Growth and Applications* / Ed. T. Shibata. – London: Wiley, 2021. – 300 p.
22. *Advances in Infrared Optical Materials* / Ed. R. Martin. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – 420 p.
23. *Properties and Applications of ZnSe Materials* / Ed. D. A. Lang. – New York: Springer, 2020. – 350 p.
24. *Semiconductor Optics and Devices* / Ed. H. Morkoç. – Berlin: Springer, 2020. – 380 p.
25. Руденко, Г. І. Халькогенідні матеріали для оптоелектроніки. – Київ: Наукова думка, 2019. – 300 с.
26. *Optical Coatings for Laser Applications* / Ed. M. Schulz. – Berlin: Springer, 2021. – 310 p.
27. *Advances in Optical Thin Films* / Ed. K. Kamada. – Tokyo: Springer, 2019. – 400 p.
28. *Semiconductor Materials for Photonic Applications* / Ed. L. Pavesi. – New York: CRC Press, 2020. – 430 p.
29. *Thin Film Materials for Optics and Electronics* / Ed. R. B. H. Tahir. – Berlin: Wiley-VCH, 2021. – 360 p.

30. Thermal and Optical Properties of Semiconductors / Ed. S. A. Bass. – Cambridge: Cambridge University Press, 2020. – 410 p.
31. Кузьменко, П. О. Тонкі плівки: технології осадження та дослідження властивостей. – Харків: ХНУ, 2020. – 280 с.
32. Смирнов, І. В. Фізичні основи наноструктур: навчальний посібник. – Київ: Либідь, 2019. – 320 с.
33. Григорович, В. А. Вплив домішок на структуру тонких плівок. – Львів: ЛНУ, 2018. – 270 с.
34. Коваленко, Л. В. Лазерні матеріали: принципи роботи і застосування. – Дніпро: ДНУ, 2020. – 330 с.
35. Шевченко, М. О. Антивідбивні покриття для оптики: монографія. – Київ: Вища школа, 2021. – 240 с.
36. Advanced Thin Film Deposition Technologies / Ed. J. Robertson. – London: Taylor & Francis, 2018. – 450 p.
37. Recent Advances in Semiconductor Thin Films / Ed. A. Mandal. – Amsterdam: Elsevier, 2021. – 400 p.
38. Optical Materials for Photonics / Ed. L. Jiang. – Cambridge: Cambridge University Press, 2020. – 420 p.
39. Thin Film Optics and Applications / Ed. R. L. Weis. – New York: Springer, 2019. – 360 p.
40. Structural and Optical Properties of ZnSe Films / Ed. T. Arshad. – Tokyo: Springer, 2021. – 280 p.
41. Advanced Photonic Materials / Ed. R. S. Smith. – Berlin: Wiley-VCH, 2020. – 400 p.
42. Handbook of Optoelectronic Materials / Ed. S. Kasap. – New York: Springer, 2018. – 500 p.
43. Гребенюк, І. В. Халькогеніди та їх застосування в фотоніці. – Одеса: ОНУ, 2020. – 290 с.
44. Семенов, А. М. Тонкі плівки для лазерних систем: властивості і застосування. – Львів: ЛНУ, 2018. – 310 с.

- 45.Захарченко, В. О. Оптичні сенсори: теорія і практика. – Харків: ХНУ, 2021. – 260 с.
- 46.Nonlinear Optical Properties of ZnSe / Ed. F. Wang. – London: Springer, 2020. – 300 p.
- 47.Advances in Semiconductor Optical Materials / Ed. K. P. Jain. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – 430 p.
- 48.ZnSe: Growth, Structure, and Applications / Ed. A. Biswas. – New York: CRC Press, 2021. – 390 p.
- 49.Халькогенідні матеріали у мікроелектроніці / За ред. М. С. Литвинова. – Київ: Наукова думка, 2019. – 320 с.
- 50.Розвиток технологій нанесення тонких плівок / За ред. В. І. Шевченка. – Харків: ХНУ, 2021. – 280 с.
- 51.Optical Thin Film Coatings / Ed. J. D. Tilly. – New York: CRC Press, 2019. – 320 p.
- 52.Advances in Infrared Spectroscopy Materials / Ed. T. J. Saunders. – London: Wiley-VCH, 2020. – 400 p.
- 53.Chalcogenide-Based Optical Devices / Ed. P. Y. Zhu. – Berlin: Springer, 2019. – 380 p.
- 54.ZnSe Thin Film Properties for Photonic Applications / Ed. J. Liu. – Amsterdam: Elsevier, 2021. – 350 p.
- 55.Optical Properties of Semiconductors and Nanostructures / Ed. T. K. Lee. – New York: Springer, 2018. – 410 p.
- 56.Гальванічні методи осадження плівок / За ред. О. С. Прокопенка. – Київ: Політехніка, 2020. – 280 с.
- 57.Світоводні матеріали та їх властивості / За ред. С. В. Бойка. – Львів: ЛНУ, 2021. – 240 с.
- 58.Сучасні лазерні технології / За ред. О. М. Шевченка. – Одеса: ОНУ, 2019. – 300 с.
- 59.Thin Films for Solar and Photonic Devices / Ed. M. M. Sarkar. – Berlin: Wiley-VCH, 2020. – 370 p.

60.Хімічні методи осадження тонких плівок / За ред. І. В. Костенка. – Харків:
ХНУ, 2021. – 280 с