

The background is a dark, almost black, space filled with vibrant green light. On the left side, there are several glowing, concentric circles and arcs, resembling light trails or perhaps the lens of a microscope. On the right side, there is a complex network of glowing green lines that form a grid-like structure, with some lines intersecting at points that look like nodes or data points. The overall effect is one of high-tech, scientific, or digital imagery.

**В. А. Одарич**

**ПРИКЛАДНА  
ФОТОМЕТРИЧНА  
ЕЛІПСОМЕТРІЯ**

В. А. Одарич

**ПРИКЛАДНА  
ФОТОМЕТРИЧНА  
ЕЛІПСОМЕТРІЯ**

Київ  
Університетське видавництво  
ПУЛЬСАРИ  
2017

УДК 535.52:531.24

ББК 22.343

0-40

У книзі розглянуто основні питання відбивальної еліпсометрії, зокрема зв'язок характеристик відбивальної системи із поляризаційними параметрами відбитої від системи електромагнітної хвилі для різних моделей відбивальної системи — одношарової, двошарової та анізотропних середовищ. Розглянуто основи методу фотометричної еліпсометрії, алгоритми розрахунку параметрів системи за виміряними значеннями еліпсометричних параметрів, наведено тексти автоматизованих програм обробки еліпсометричних даних, а також викладено основи еліпсометричних методів контролю оптичних деталей, підданих різним способам обробки поверхні. Наведено результати еліпсометричних досліджень діелектричних покриттів, йонно імплантованих напівпровідників, процесів взаємодії атмосферного повітря із поверхнею тощо. Призначено для наукових працівників та інженерів, які використовують еліпсометричні прилади у своїх дослідженнях, викладачів і студентів вищих навчальних закладів.

Рецензенти:

д-р фіз.мат. наук, проф., член-кореспондент НАН України *Ф. Ф. Сизов*,

д-р фіз.-мат. наук, проф. *В. З. Лозовський*

*Рекомендовано до друку кафедрою оптики Київського національного університету імені Тараса Шевченка (протокол № 9 від 2.02.2017 року)*

**ISBN 978-617-615-072-5**

© В. А. Одарич, 2017

## Зміст

<b>Передмова</b> .....	3
<b>1. Основи відбивальної еліпсометрії</b> .....	6
1.1. Еліпсометричні параметри відбитого світла.....	6
1.2. Відбивання світла від напівнескінченного середовища.....	9
1.3. Відбивання світла від одношарової системи.....	13
1.4. Однорідний тонкий шар.....	15
1.4.1. Тонкий шар на прозорій підкладинці.....	18
1.4.2. Тонкий шар на поглинаючій підкладинці.....	24
1.5. Рівняння еліпсометрії для двохшарової системи.....	30
1.6. Формули Френеля для анізотропних середовищ.....	32
1.6.1. X-напрямок оптичної вісі.....	36
1.6.2. Z-напрямок оптичної вісі.....	38
1.6.3. Y-напрямок оптичної вісі.....	40
1.7. Рівняння еліпсометрії для анізотропних середовищ.....	41
1.7.1. X-напрямок оптичної вісі.....	42
1.7.2. Y-орієнтація оптичної вісі.....	43
1.7.3. Z-орієнтація оптичної вісі.....	44
Література.....	45
<b>2. Вимірювання еліпсометричних параметрів</b> .....	48
2.1. Робота фотометричного еліпсометра.....	48
2.2. Похибки вимірювання еліпсометричних параметрів.....	51
2.3. Застосування фотометричної еліпсометрії до напів- провідників.....	56
2.4. Налаштування фотометричного еліпсометра.....	64
Література.....	70
<b>3. Знаходження параметрів системи</b> .....	71
3.1. Методи розв'язання оберненої задачі еліпсометрії.....	71
3.2. Знаходження показника заломлення діелектриків.....	74
3.3. Метод діаграм.....	80
3.4. Ітераційний метод визначення параметрів відбивної системи.....	89
3.5. Метод обрахунку параметрів поглинаючих плівок.....	92
Література.....	97
<b>4. Визначення оптичних сталих речовини</b> .....	99
4.1. Залізо-ітрієвий гранат.....	99

4.1.1.	Оптичні сталі залізо-ітрієвого гранату.....	100
4.1.2.	Про природу смуги інтенсивного поглинання.....	105
Література.....		111
4.2.	Оптичні сталі карбиду кремнію.....	112
Література.....		121
4.3.	Оптичні сталі телуриду ртуті.....	122
4.3.1.	Визначення параметрів поверхневого шару.....	123
4.3.2.	Спектр діелектричної проникності телуриду ртуті.....	126
Література.....		128
4.4.	Оптичні сталі телуриду кадмію.....	129
4.4.1.	Визначення параметрів окисного шару.....	130
4.4.2.	Інтерпретація спектрів телуриду кадмію.....	136
Література.....		138
4.5.	Оптичні сталі арсеніду галію з реальною поверхнею.....	138
4.5.1.	Аналіз можливостей багатокутової еліпсометрії.....	140
4.5.2.	Параметри плівки на поверхні арсеніду галію.....	142
4.5.3.	Оптичні сталі полірованого арсеніду галію.....	143
4.5.4.	Обговорення результатів.....	146
Література.....		149
4.6.	Епітаксійні плівки германію на поверхні арсеніду галію.....	151
4.6.1.	Аморфні германієві плівки.....	153
4.6.2.	Монокристалічні германієві плівки.....	157
4.6.3.	Обговорення результатів.....	160
Література.....		163
<b>5.</b>	<b>Дослідження шарів, утворених механічною обробкою.....</b>	<b>164</b>
5.1.	Стан проблеми полірованих шарів.....	164
5.2.	Характеристики і будова поверхневої області ситалу.....	166
5.3.	Еліпсометричні дослідження оптичних стекел.....	169
5.4.	Полірований шар на поверхні кварцового скла.....	175
5.5.	Полірований шар на поверхні скла К8.....	177
Література.....		186
<b>6.</b>	<b>Визначення параметрів діелектричних плівок.....</b>	<b>188</b>
6.1.	Діелектричні плівки $\text{HfO}_2$ на склі К8.....	188
6.2.	Структура плівок $\text{HfO}_2$ на кварцовому склі.....	201
Література.....		209
<b>7.</b>	<b>Дослідження плівок телуриду кадмію.....</b>	<b>211</b>
7.1.	Виготовлення зразків та деталі експерименту.....	212
7.2.	Плівки телуриду кадмію на кремнії.....	214
7.2.1.	Еліпсометричні виміри на фіксованому куті падіння.....	214

7.2.2. Багатокутові виміри (неоднорідність плівок).....	222
7.2.3. Обговорення одержаних даних.....	226
7.3. Плівки CdTe на CdHgTe.....	227
7.3.1. Об'єкти дослідження та деталі експерименту .....	228
7.3.2. Оптичні сталі підкладки CdHgTe.....	229
7.3.3. Вимірювання на фіксованому куті падіння.....	232
7.3.4. Спектральні вимірювання.....	234
7.4. Плівки CdTe з великим часом напилення .....	239
7.4.1. Досліджені плівки та умови експерименту.....	240
7.4.2. Плівки CdTe на монокристалічному кремнії.....	240
7.4.3. Плівки CdTe на CdHgTe.....	246
7.5. Плівки CdTe: модель ефективного середовища.....	251
7.6. Застосування двошарової моделі до плівок CdTe.....	256
7.6.1. Вступні міркування.....	256
7.6.2. Модельні дослідження.....	258
7.6.3. Параметри поверхневого шару плівок.....	264
7.6.4. Обговорення оптичних властивостей плівок CdTe.....	267
7.7. Підсумкові міркування про властивості плівок CdTe.....	271
Література.....	272
<b>8. Взаємодія поверхні напівпровідників з повітрям .....</b>	<b>274</b>
8.1. Особливості окислення грані росту селеніду цинку.....	274
8.1.1. Деталі експерименту та одержані результати .....	274
8.1.2. Модельні обчислення діаграм $\Phi$ - $\eta$ .....	277
8.1.3. Аналіз експериментальних результатів .....	279
8.2. Окислення природного сколу селеніду цинку.....	283
8.2.1. Виготовлення зразків та деталі експерименту.....	284
8.2.2. Одержані результати.....	285
8.2.3. Обговорення результатів.....	287
8.2.4. Зауваження про формування окисних шарів.....	294
8.3. Формування окисної плівки на сколах телуриду кадмію.....	296
8.3.1. Вступні зауваження.....	296
8.3.2. Деталі експерименту .....	296
8.3.3. Одержані результати та їх обговорення.....	297
8.4. Природна плівка на поверхні телуриду кадмію.....	302
8.4.1. Деталі експерименту.....	303
8.4.2. Експериментальні результати.....	304
8.4.3. Обговорення результатів.....	308
8.5. Окислення сколів дифосфіду кадмію.....	312
8.5.1. Одержання зразків та допоміжні процедури.....	313
8.5.2. Результати вимірів.....	315

8.5.3. Обговорення результатів.....	323
Література.....	326
<b>9. Структура шарів поруватого кремнію.....</b>	<b>329</b>
9.1. Одержання поруватого кремнію та його структура.....	329
9.2. Параметри шарів ПК в одношаровій моделі .....	332
9.2.1. Результати вимірів на зразку № 10.....	334
9.2.2. Результати вимірів на зразку № 65 .....	338
9.2.3. Результати вимірів на зразку № 29.....	340
9.2.4. Будова поверхневої області поруватого кремнію.....	342
9.3. Структура зовнішнього шару поруватого кремнію.....	345
9.3.1. Інтерпретація результатів в одношаровій моделі.....	345
9.3.2. Інтерпретація результатів у двошаровій моделі .....	348
Література.....	353
<b>10. Застосування фотометричної еліпсометрії.....</b>	<b>355</b>
10.1. Контроль якості полірування оптичних деталей.....	355
10.2. Контроль обробки поверхні напівпровідників.....	356
10.2.1. Вплив йонної імплантації та лазерного відпалу на оптичні сталі кремнію.....	356
10.2.2. Спосіб керованого лазерного відпалу імплантованих напівпровідників.....	359
10.2.3. Спосіб керування йонною імплантацією напівпровідників.....	360
10.3. Контроль процесу напилення плівок.....	363
10.3.1. Методи контролю товщини.....	363
10.3.2. Спосіб контролю товщини діелектричного покриття.....	364
10.4. Контроль однорідності напівпровідникових плівок.....	367
10.4.1. Еліпсометричний прилад для дослідження плівкових структур.....	367
10.4.2. Загальні характеристики приладу.....	371
10.4.3. Програмне забезпечення.....	373
Література.....	375
<b>Післямова .....</b>	<b>376</b>
<b>Додатки.....</b>	<b>377</b>
<b>Д 1. Паке́т автоматизованих програм</b>	
<b>“Еліпсометричний калькулятор”.....</b>	<b>377</b>
Д 1.1. Загальні відомості.....	377
Д 1.2. Програми на алгоритмічній мові Бейсик.....	379

Д 1.3. Програми на алгоритмічній мові Фортран.....	384
Д 1.3.1. Програма Еліпсометрична функція.....	384
Д 1.3.2. Програма Головний кут.....	386
Д 1.3.3. Програма Верхня плівка.....	388
Д 1.3.4. Програма Підкладинка.....	391
Д 1.3.5. Програма Поглинаюча плівка.....	394
<b>Д 2. Еліпсометрія у Київському національному</b>	
<b>    університеті імені Тараса Шевченка .....</b>	<b>397</b>
Д 2.1. Становлення фотометричної еліпсометрії у Київському	
національному університеті імені Тараса Шевченка.	
Професор <i>Шайкевич І. А.</i> .....	397
Д 2.2. Мій шлях в еліпсометрії. Професор <i>Стащук В. С.</i> .....	398
Д 2.3. Наукова школа "Металооптика та спектроеліпсометрія	
поверхні. Професор <i>Поперенко Л. В.</i> .....	407