

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ Факултет по електронна техника и технологии Катедра Микроелектроника

Маг. инж. Ради Несторов Несторов

## ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗИРАНО ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА ТЪНКИ СЛОЕВЕ ОТ ИНТЕРФЕРЕНЧНИЯ ИМ СПЕКТЪР НА ПРОПУСКАНЕ И НА ОТРАЖЕНИЕ

## ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен

## "ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Микроелектроника

Научни ръководители: доц. д-р Георги Ангелов и доц. дн Дориан Минков

СОФИЯ, 2020 г. Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра "Микроелектроника" към Факултет по електронна техника и технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 12.10.2020 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 04.02.2021 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със Заповед № ОЖ-5.2-106/19.10.2020 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Валентин Видеков – председател

2. доц. д-р инж. Георги Ангелов – научен секретар

3. проф. д-р инж. Анатолий Александров

4. проф. д-р инж. Петко Витанов

5. проф. дтн инж. Тихомир Таков

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Валентин Видеков

2. проф. дтн инж. Тихомир Таков

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на кат. Микроелектроника, Факултет по електронна техника и технологии на ТУ-София, блок №1, кабинет №.

Дисертантът е редовен докторант към катедра Микроелектроника на Факултет по електронна техника и технологии. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Ради Несторов Несторов

Заглавие: Изследване и оптимизирано характеризиране на тънки слоеве от интерференчния им спектър на пропускане и на отражение

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

## **І. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

## Актуалност на проблема

Тънък слой от даден полупроводников или диелектричен материал може да бъде произведен посредством различни технологии и технологични режими. Освен това нараства приложимостта на такива слоеве, съдържащи няколко химични елемента, което изисква определяне и характеризиране на оптимален състав на слоя за конкретното му приложение. От друга страна, оптичните и електричните характеристики на слоевете зависят от състава на слоя, технологията на изготвяне и технологичния режим. Отчитайки взаимовръзките между оптични и електрични параметри и широкото използване на такива тънки слоеве, тези фактори обуславят необходимостта от постигане на максимална точност на оптично характеризиране на тънки слоеве.

Най-използваният подход за точно оптично характеризиране на тънък светопропускащ слой се основава на измерване на само един спектър на пропускане на образец, състоящ се от тънък светопропускащ слой нанесен върху светопропускаща подложка

Другият широко използван подход се основава на измерване на само един спектър на отражение на тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка. Гореописаните факти показват нуждата от максимално точно характеризиране на тънък полупроводников или диелектричен слой от тънкия слой, нанесен върху светопропускаща подложка от един спектър на пропускане или на отражение на образеца.

# Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на настоящия труд е да се определи и оптимизира алгоритъм за най-точно характеризиране на един тънък полупроводников или диелектричен слой от тънкия слой, нанесен върху светопропускаща подложка, с използване на само един спектър на пропускане на тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка, на базата на съществуващите методи за изследване.

### Основни задачи

- Да бъде определен най-точния съществуващ алгоритъм за характеризиране на тънък аморфен слой върху светопропускаща подложка с използване на спектъра на пропускане. Аморфните полупроводникови материали са особено подходящи за тази задача, тъй като обичайно се приема, че техните зонни диаграми съдържат Урбахова опашка.
- 2. Да бъде създаден оптимизиран алгоритъм с повишена точност спрямо съществуващия най-точен алгоритъм за характеризиране, определен в основната задача 1, с използване на същите тънки аморфни слоеве от тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка
- Да бъде проверена точността на оптимизирания алгоритъм, описан в основната задача 2, за слоеве от друг аморфен материал върху светопропускащи подложки.
- 4. Да бъде създаден и валидиран оптимизиран алгоритъм за характеризиране на тънък полупроводников или диелектричен слой от тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка с използване на спектъра на отражение, по подобие на оптимизирания алгоритъм, с използване на спектъра на пропускане, описан в основната задача 2.

#### Използвани методи за изследване

- Метод на обвивките за спектъра на пропускане на тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка
- 2. Графичния метод на обвивките за спектъра на пропускане на тънък светопропускащ слой нанесен върху светопропускаща подложка
- 3. Дисперсионен метод основан на модела на Лоренц и Урбахова опашка.
- 4. Дисперсионен метод основан на модела на Коди и Урбахова опашка.
- 5. Интерполационен метод за пресмятане на обвивките на интерференчни спектри.
- 6. Метод на сигнално-потоковите графи.

### Научна новост

- Показано е, че използване на усъвършенствания алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на обвивките води до най-точно характеризиране на тънки слоеве a-Si от тънкия слой, нанесен върху светопропускаща подложка, измежду четири съществуващи алгоритъма, подбрани като най-подходящи за точно характеризиране на тънък аморфен слой от тънкия слой, нанесен върху светопропускаща подложка, въз основа на спектъра на пропускане.
- 2. Предложен е оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на пропускане и е показано, че използването му резултира в повишаване на точността на характеризиране на гореспоменатите слоеве a-Si от тънкия слой, нанесен върху светопропускаща подложка, в сравнение с усъвършенствания алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на пропускане
- Представени са формули за спектъра на отражение на тънкия слой, нанесен върху светопропускаща подложка и неговите обвивки, с отчитане на поглъщането в подложката.
- 4. Изведени са по-точни формули за обвивките на спектъра на пропускане на тънкия слой, нанесен върху светопропускаща подложка.

### Практическа приложимост

В дисертацията е предложен оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на пропускане и е показано че използването му води до най-точно характеризиране на тънки аморфни слоеве а-Si от тънкия слой, нанесен върху светопропускаща подложка, в сравнение със съществуващите алгоритми за характеризиране на тънък слой от тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка, въз основа на спектъра на пропускане. Оптимизираният алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на пропускане е използван за характеризиране и на тънки аморфни слоеве As<sub>x</sub>Te<sub>100-x</sub>, като е постигнато още по-точно характеризиране в сравнение със слоевете a-Si. Тези резултати показват, че оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на обвивките за спектъра на пропускане за

характеризиране на произволен аморфен слой от тънък светопропускащ слой нанесен върху светопропускаща подложка само от спектъра на пропускане, в спектралната област с интерференчна картина в спектъра на пропускане.

## Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в четири научни статии, от които една е самостоятелна. Три от тези публикации са в международни списания с висок импакт фактор > 1.92 и индексирани в Скопус.

## Апробация

Всяка от гореспоменатите три публикации е индексирана в Скопус. Новият оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на пропускане, който използва спектъра на пропускане, се основава на публикации на метода на обвивките на Сванепул с 4400 цитирания и на Маркез и Минков с 69 цитирания. Новият оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на отражение, който използва спектъра на отражение, се основава на публикация на Минков със 140 цитирания.

## Структура и обем на дисертацията

Дисертацията е в обем от 133 страници, които включват увод, 6 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на използвана литература, списък на основните приноси и списък на публикациите по дисертацията. Цитирани са общо 144 литературни източници, като 135 са на латиница, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 60 фигури и 7 таблици.

## **II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### ГЛАВА 1

Преглед на подходите за оптично характеризиране на тънки слоеве в спектралната област от ултравиолетова до близкаинфрачервена

Оптично характеризиране на тънък полупроводников или диелектричен слой от тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка най-често се извършва посредством измерване на само един спектър на

пропускане T(λ) на тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка, с нормално падаща светлина. Оптично характеризиране на такъв тънък слой може да се извърши и посредством измерване на само един спектър на отражение R(λ) на тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка, с квази-нормално падаща светлина.

Болшинството методи за оптично характеризиране тънък на полупроводников или диелектричен слой от тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка, се класифицират като дисперсионни методи или интерференчни методи. Дисперсионните методи се основават на приближени дисперсионни формули за стойностите или съотношенията на показателя на пречупване  $n(\lambda)$  и показателя на затихване  $k(\lambda)$  на слоя. Интерференчните методи не използват дисперсионни формули и се основават на анализ на тънкослойната интерференция на падащата светлина в слоя, която се проявява в наличие на интерференчна картина в спектъра на пропускане $T(\lambda)$  и спектъра на отражение **R**(λ).

Методът на обвивките е интерференчен метод в който се конструират и използват двете обвивки на интерференчната картина в измерения спектър на пропускане или спектър на отражение на тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка. Метода на обвивките пресмята средната дебелина  $\overline{d}$ , показателя на пречупване n( $\lambda$ ),показателя на затихване k( $\lambda$ ) на слоя, а когато е възможно и неговата неравномерност  $\Delta d$  в областта на светлинното петно.

В тази глава са разгледани подходите за оптично характеризиране на тънки слоеве в спектралната област от ултравиолетова до близка-инфрачервена, като е направена и класифициране на основните спектрофотометрични методи и алгоритми за характеризиране на тънък слой от тънкия слой, нанесен върху светопропускаща подложка, което е показано на фигура 1.14.

7



Фиг. 1.14. Класифициране на основните спектрофотометрични методи и алгоритми за характеризиране на тънкия слой от тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка

## ГЛАВА 2

Сравняване на точността на характеризиране от спектъра на пропускане на тънки слоеве аморфен силиции a-Si от тънък светопропускащ, слой нанесен върху светопропускаща подложка посредством два метода на обвивките и два дисперсионни метода.

В настоящата ,глава е направено характеризирането на тънките слоеве аморфен силиции a-Si посредством различни спектрофотометрични алгоритми, два алгоритъма на метода на обвивките и два дисперсионни алгоритъма, които са алгоритъм, съответстващ на модела на Таук- Лоренц- Урбах (АМТЛУ), алгоритъм, съответстващ на модела на Коди-Лоренц-Урбах (АМКЛУ), усъвършенстван алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на пропускане (УАМОТ) и усъвършенстван алгоритъм на графичния метод на обвивките за спектъра на пропускане (УАГМОТ), като са разгледани два образеца А038 и А041, като резултатите са показани в таблица 2.1 и таблица 2.2

Пресметнатият посредством всеки един от тези алгоритми най-нисък порядък на интерференция е  $m_{1c} = 2$  за слоя A038.При това е отчетено, че найдълговълновия екстремум на загладения спектър  $T_{sm}(\lambda)$  е максимум, на който съответства целочислен  $m_{1c}$ , съобразно с (1.58). Освен това, от данните от тъмносивата област от Табл. 2.1 се заключава, че пресметнатите стойности на средната дебелина и нееднородността на слоя A038 са  $\overline{d_c} = 785$  nm и  $\Delta d_c = 23.5$ nm. Резултати от характеризирането на тънкия слой а-Si от образеца A038. УАМОТ и УАГМОТ пресмятат  $m_{1c} = 2$ ,  $\overline{d_c}$ ,  $\Delta d_c$ ,  $n_c(\lambda_t)$ ; и  $k_c(\lambda_t)$  се изчислява от горната обвивка на  $T(\lambda)$ . Пресметнатите данни за двата най-малки ОПГ са в тъмносивата и светлосивата области.

Табл.	2.1

Алгоритьм	АМТЛУ	АМКЛУ	YAI	мот	<b>YAI</b>	ГМОТ
Особености на Τ(λ)	$T(\lambda)$		обвивките $T_{+0}(\lambda)$ и $T_{-0}(\lambda)$			
и обвивките му	не е кориг	иран	са пресметнати както в [129]			
Показател на			$RMSD/N_2$	$\sigma/N_2$	$RMSD/N_2$	$\sigma/N_2$
грешката (ПГ)						
$\overline{d_{c}}(nm)$	769	775	779.5	781.3	787.9	788.8
$\Delta d_{c} (nm)$	25	23.3	25.8	25.3	29.9	29.2
$\min(\Pi\Gamma)$			1.83×10-3	0.459 nm	1.62×10-3	0.438 nm
ОПГ за	4.50	6.58	5.42	5.24	6.90	6.91
$\lambda = [\lambda_t(1), \lambda_t(9)]$	×10-3	×10-3	×10-3	×10-3	×10-3	×10-3
Особености на Τ(λ)	Т(λ) е к	оригиран		обвивките	Т+(λ) и Т.(λ	)
и обвивките му	за оста	тъчен газ	са кор	игирани за	остатъчен	газ и x <sub>s</sub>
ПГ			$RMSD/N_2$	$\sigma/N_2$	$RMSD/N_2$	$\sigma/N_2$
$\overline{d_c}$ (nm)	769	783.5	785.0	785.7	789.1	789.5
$\Delta d_{c} (nm)$	25	24.3	23.5	23.1	29.5	29.2
$\min(\Pi\Gamma)$			1.23×10-3	0.341 nm	9.74×10-4	0.259 nm
ОПГ за	4.50	4.30	2.63	2.64	2.90	2.91
$\lambda = [\lambda_t(1), \lambda_t(9)]$	×10-3	×10-3	×10-3	×10-3	×10-3	×10-3

Данните за общ показател на грешката (ОПГ) от Табл. 2.1 показват, че коригирането на  $T(\lambda)$  за остатъчен газ и за  $x_s(\lambda)$  повишава или запазва точността на характеризиране на слоя A038, за всеки от използваните алгоритми. Тези данни за ОПГ показват също, че най-точно характеризиране на слоя A038 е постигнато с използване на УАМОТ, а най-неточни са характеризиранията му посредством АМТЛУ и АМКЛУ.

Относно слоя от образеца A041, опитите за приемливо точно характеризиране посредством АМТЛУ и АМКЛУ бяха неуспешни. Отбелязваме, че дебелината на слоя A041 е относително голяма, което се проявява в четирикратно по-големия брой интерференчни екстремуми на  $T(\lambda)$  за образеца A041 ,в сравнение с образеца A038, съобразно с Фиг. 2.2 (а), Фиг. 2.4 и (1.60). Възможно е неспособността на AMTЛУ и AMKЛУ за точно характеризиране на слоя A041 да е свързана с относително голямата дебелина на този слой и големия брой регулируеми параметри в AMTЛУ и AMKЛУ.

Цифрови резултати от характеризирането на слоя a-Si от образеца A041, чрез алгоритмите УАМОТ и УАГМОТ, са представени в Табл. 2.2. За всяка двойка от използваните обвивки на  $T(\lambda)$  на образеца A041 в Табл 2.2 са показани данни само за този ПГ от (1,66) и (1.67), за който е пресметнат по-малък ОПГ.

Пресметнатият посредством всеки един от тези алгоритми най-нисък порядък на интерференция е  $m_{1c} = 12$  за слоя A041. При това е отчетено, че найдълговълновия екстремум на  $T_{sm}(\lambda)$  е максимум, на който съответства целочислен  $m_{1c}$ . Освен това, от данните от тъмносивата област от Табл. 2.2 се заключава, че пресметнатите стойности на средната дебелина и нееднородността на слоя A041 са  $\overline{d_c} = 3921.7$  nm и  $\Delta d_c = 55.0$  nm.

Алгоритъм	УАМОТ	УАГМОТ		
Особености	обвивките $T_{+0}(\lambda)$ и $T_{-0}(\lambda)$			
на обвивките	са пресметнати			
	както в [129]			
ПГ	$\sigma/N_2$	$RMSD/N_2$		
$\overline{d_c}$ (nm)	3921.7	3896.9		
$\Delta d_{c} (nm)$	55.0	52.6		
$\min(\Pi\Gamma)$	0.581 nm	1.60×10 <sup>-3</sup>		
ОПГ за	7.74	8.17		
$\lambda = [\lambda_t(1), \lambda_t(35)]$	×10 <sup>-3</sup>	×10 <sup>-3</sup>		
Особености	обвивките	е $T_+(\lambda)$ и $T(\lambda)$		
на обвивките	са кориг	тирани за <i>x</i> s		
ПГ	$\sigma/N_2$	$\sigma/N_2$		
$\overline{d_{c}}$ (nm)	3918.6	3857.7		
$\Delta d_{c} (nm)$	55.1	50.7		
$\min(\Pi\Gamma)$	0.617 nm	0.419 nm		
ОПГ за	7.75	9.01		
$\lambda = [\lambda_t(1), \lambda_t(35)]$	×10 <sup>-3</sup>	×10 <sup>-3</sup>		

Табл. 2.2

Резултати от характеризирането на тънкия слой a-Si от образеца A041. УАМОТ и УАГМОТ пресмятат  $m_{1c} = 12$ ,  $\overline{d_c}$ ,  $\Delta d_c$ ,  $n_c(\lambda_t)$ ; и  $k_c(\lambda_t)$  се изчислява от горната обвивка на  $T(\lambda)$ .

Пресметнатите данни за двата най-малки ОПГ са в тъмносивата и светлосивата области.

Данните за ОПГ от Табл. 2.1 показват, че коригирането на  $T(\lambda)$  за  $x_s(\lambda)$  не повишава точността на характеризиране на слоя A041. Тези данни за ОПГ показват също, че най-точно характеризиране на слоя A041 е постигнато с използване на УАМОТ.

#### Заключения:

Следните заключения могат да бъдат направени въз основа на сравняване на пресметнатите резултати от Табл. 2.1 и Табл. 2.2 за слоевете А038 и А041:

- 1. Най-точно характеризиране на тези два слоя е постигнато посредством УАМОТ. Второ по точност характеризиране на тези слоеве е постигнато посредством УАГМОТ.
- 2. Слоят A038 е относително тънък, със средна дебелина  $\overline{d_c} = 785$  nm и неравномерност  $\Delta d_c = 23.5$  nm. Слоят A041 е относително дебел, с  $\overline{d_c} = 3921.7$  nm и  $\Delta d_c = 55.0$  nm. Съответно, слоят A041 е около 5 пъти по-дебел от слоя A038, като неравномерността на слоя A041 е около 2.3 пъти по-голяма от тази на слоя A038.
- 3. Характеризирането на слоя А038 е най-неточно при използване на АМТЛУ и АМКЛУ. Освен това, тези алгоритми не пресмятат точно m<sub>1c</sub> на по-дебелия слой A041, и съответно не позволяват характеризиране с приемлива точност на този слой. Това индикира, че използваните дисперсионни модели в АМТЛУ и АМКЛУ не са достатъчно точни за тези слоеве от a-Si.

## ГЛАВА 3

Подбор на показател на грешките за характеризирането на тънък слой от тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка, посредством усъвършенстван алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на пропускане В Раздел 2.5 е показано, че най-точно характеризиране на тънките слоеве а-Si от ТССВСП А038 и А041 е постигнато посредством УАМОТ от [92], в сравнение с УАГМОТ, АМТЛУ и АМКЛУ. При това, в УАМОТ от [92] и Раздел 2.5 са използвани само показателите на грешките (ПГ) *RMSD/N*<sub>2</sub> от (1.66) и  $\sigma/N_2$ от (1.67), без да е проведено систематично изследване на избора на ПГ. Съответно е възможно друг ПГ да позволява по-точно характеризиране на тънкия слой от ТССВСП и не е ясно кой от горепосочените два ПГ води до по-точно характеризиране на тънкия слой посредством УАМОТ. Поради това, в настоящата Глава е проведено систематично изследване на подбора на ПГ.

За представяне на широк набор от тънки слоеве са разгледани четири модела на **ТССВСП**, състоящи се от моделен тънък слой върху модел на стъклената подложка Corning7059 с дебелина 0,9 mm от образеца А038, с известни  $n_s(\lambda)$  и  $k_s(\lambda)$ . Всеки от четирите модела на ТССВСП съдържа модел на слой с показател на пречупване  $n(\lambda[nm]) = 3 \times 10^5 / \lambda^2 + 2.6$ , средна дебелина  $\overline{d} = 1000$  nm, и  $k_1(\lambda[nm]) = [\lambda/(4\pi)] \times 10^{(1.5 \times 10^6 / \lambda^2) - 8}$  се използва за въвеждане на показателя на затихване на слоя. Тези  $n(\lambda)$  и  $k_1(\lambda)$  са типични за слоеве a-Si:H [97] и са идентични с показаните в (1.63).

Показателят на затихване  $k_1(\lambda)$  и неравномерността на дебелината  $\Delta d$  на моделния слой от всеки от разглежданите Модел 1 до Модел 4 на ТССВСП са: - Модел 1:  $k(\lambda) = k_1(\lambda)$  и  $\Delta d = 3$  nm. Тези характеристики представляват типичен квази-равномерен слой с широка спектрална област на квази-прозрачност.

- Модел 2:  $k(\lambda) = k_1(\lambda)$  и  $\Delta d = 30$  nm. Тези характеристики представляват типичен неравномерен слой с широка спектрална област на квази-прозрачност.

- Модел 3:  $k(\lambda) = k_1(\lambda) + 0.01$  и  $\Delta d = 3$  nm. Тези характеристики представят типичен квази-равномерен слой без спектрална област на квази-прозрачност.

- Модел 4:  $k(\lambda) = k_1(\lambda) + 0.01$  и  $\Delta d = 30$  nm. Тези характеристики представят типичен неравномерен слой без спектрална област на квази-прозрачност. (3.1)

Спектърът на пропускане  $T(\lambda)$  на ТССВСП се пресмята с добавяне на 0,1% бял шум към спектъра на пропускане  $T_0(\lambda)$ , изчислен от уравнение (1.55), за всеки от гореописаните четири модела на ТССВСП. Такъв шум е типичен за измерване на коефициента на пропускане през материал с висок показател на пречупване [78,79]. Обвивките  $T_{+}(\lambda)$  и  $T_{-}(\lambda)$  на типично загладения спектър  $T_{sm}(\lambda)$  се изчисляват посредством алгоритъма от [129], отчитащ поглъщането в подложката, който е бил използван в [92].  $T(\lambda)$ ,  $T_{+}(\lambda)$ ,  $T_{-}(\lambda)$  и  $x_{s}(\lambda)$  на четирите модел на ТССВСП са показани на фиг. 3.1



Фиг. 3.1. Пресметнати спектър на пропускане от T(λ) и обвивките му T<sub>+</sub>(λ) и T. (λ) за четирите модела на TCCBCП, и коефициента на прозрачност на подложката x<sub>s</sub>(λ). (a) за моделите 1 и 2 със слой с широка област на квазипрозрачност; (б) за моделите 3 и 4 със слой без област на квази-прозрачност.

От фиг. 3.1 се вижда, че интерференчната картина на  $T(\lambda)$  изглежда различна за четирите модела на ТССВСП от (3.1). Съответно е възможно да се класифицира определен слой в един от четирите класа, представени посредством моделните слоеве от 1 до 4, само чрез наблюдение на особеностите на интерференчната картина на  $T(\lambda)$ .

За подбора на ПГ са използвани седем различни ПГ, идентифицирани като използваеми на стъпка Б11 от УАМОТ от Фиг. 1.16. За по-добро разбиране на съответствието с УАМОТ от Фиг. 1.16, и подобие на изразите, са използвани следните формули за седемте ПГ:

$$RE(d_{1a}, d_{2a}) = \frac{d_{1a} - d_{2a}}{d_{2a}} \qquad \text{3a III c homep } j=1,$$

$$RMSE(m_{i}, m_{a}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{2}} \left\{ m_{i} [\lambda_{i}(i)] - m_{a} [\lambda_{i}(i)] \right\}^{2}} \qquad \text{3a III c homep } j=2,$$

$$\frac{RMSE(m_{i}, m_{a})}{N_{2}} = RMSD(m, m_{a}) / N_{2} \text{ or}(1.66) \qquad \text{3a III c homep } j=3,$$

$$SD(d_{2}, d_{2a}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{2}} \left\{ d_{2} [\lambda_{i}(i)] - d_{2a} \right\}^{2}} \qquad \text{3a III c homep } j=4,$$

$$\frac{SD(d_{2}, d_{2a})}{N_{2}} \equiv \sigma(d_{2}) / N_{2} \text{ or}(1.67) \qquad \text{3a III c homep } j=5,$$

$$TRRSE_{+}(m_{i}, m_{a}, d_{2}, d_{2a}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{2}} \left\{ m_{i} [\lambda_{i}(i)] - m_{a} [\lambda_{i}(i)] \right\}^{2}} + \sum_{i=1}^{N_{2}} \left\{ d_{2} [\lambda_{i}(i)] - d_{2a} \right\}^{2}} \qquad \text{3a III c homep } j=6$$

$$TRRSE_{-}(m_{i}, m_{a}, d_{2}, d_{2a}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{2}} \left\{ m_{i} [\lambda_{i}(i)] - m_{a} [\lambda_{i}(i)] \right\}^{2}} - \sum_{i=1}^{N_{2}} \left\{ d_{2} [\lambda_{i}(i)] - d_{2a} \right\}^{2}} \qquad \text{3a III c homep } j=7$$

където  $m_{ia} = \left(\sum_{i=1}^{N_2} m_a [\lambda_t(i)]\right) / N_2$ . В символите, използвани за означаване на различните ПГ, в лявата страна на уравненията от (3.2), '*RE*' означава относителна грешка, '*RMSE*' – средноквадратична грешка, '*SD*' – стандартно отклонение, и '*TRRSE*' – обща относителна квадратична грешка. Всеки ПГ се номерира с ј от 1 до 7 в (3.2).

Посредством изпълнение на стъпките Б1 до Б14 от УАМОТ се намират пресметнатите  $\overline{d}_c$ ,  $\Delta d_c$ , и  $m_{1c}$ , докато техните истински стойности са  $\overline{d}$ ,  $\Delta d$ , и  $m_1$ . Това се извършва чрез намиране на глобалния минимум на използвания ПГ, измежду всички допустими тройки ( $\Delta d, N_1, N_2$ ) параметри на УАМОТ [92].

Съобразно с това, седем различни набори от  $\overline{d}_c$ ,  $\Delta d_c$ ,  $m_{1c}$ , съответстващи на седемте различни ПГ от (3.2), могат да бъдат пресметнати в резултат на само едно характеризиране посредством УАМОТ. Пресметнатите стойности на показателя на пречупване на слоя  $n_c(\lambda_t)$  са получени от (1.58), на стъпка В1 от УАМОТ, съобразно с Фиг. 1.15. Пресметнатите стойности на показателя на затихване на

слоя  $k_c(\lambda_t)$  са определени чрез решаване на (1.61), на стъпка В1 от УАМОТ от Фиг. 1.15.

Въз основа на описанието от предния параграф и от първия параграф от Раздел 2.3, по-малко отклонение на  $\overline{d}_c$  спрямо  $\overline{d}$ , и/или на  $\Delta d_c$  спрямо  $\Delta d$ съответства на по-точното характеризиране на слоя. Във връзка с това, следните четири *показатели на грешки относно дебелината на слоя (ПГД)* представляват стандартните отклонения на  $\overline{d}_c$  спрямо  $\overline{d}$ , и/или на  $\Delta d_c$  спрямо  $\Delta d$ :

за променлив брой N<sub>h</sub> характеризирания на слоя посредством УАМОТ, като всяка от тези четири величини се отнася само за един ПГ от (3.2). В (3,3), 'TSD' означава тотално стандартно отклонение; и 'RMSD' представлява средното отклонение на  $\overline{d}_c$  за ПГ с номер ј спрямо съответната  $\overline{d}_c$  за ПГ с номер 5, т.е. спрямо  $\overline{d}_c$  за  $SD(d_2,d_{2a})/N_2$ . Отбелязваме, че всички ПГД от (3.3) се измерват в нанометри (nm). Съобразно с последните четири параграфа, ПГ от (3.2) съответстващ на най-малки стойности на величините от лявата страна на (3.3) представлява подбран ПГ за най-точно характеризиране посредством УАМОТ на тънкия слой от ТССВСП.

### Изводи:

След направено изследване на показателите на грешка е стигнато до извода, че най-малка грешка се получава за ПГ с номер 5 и той е използван за понататъчни изчисления в дисертацията.

## ГЛАВА 4

Създаване и използване на оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на пропускане за характеризиране на тънък слой от тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка

4.1. Недостатъци на УАМОТ

В Глава 2 е показано, че използване на УАМОТ води до по-точно характеризиране на слоевете a-Si от образците A038 и A041, в сравнение с УАГМОТ, АМТЛУ и АМКЛУ. Въпреки това, анализ на УАМОТ от Фиг. 1.16 показва, че той има следните недостатъци, изброени по реда на проявяването им в алгоритъма:

- УАМОТ не отчита възможното разсейване на светлината. В действителност, светлината може да бъде разсейвана, най-вече на повърхността въздух-слой и в обема на слоя, вследствие неравности на повърхността или нехомогенност на слоя. Разсейването на светлината води до промяна на фазовата разлика за част от интерфериращите вълни в тънкия слой [1,2]; и съответно до неголямо свиване на интерференчната картина в *T*(λ), съобразно с Раздели 1.4 и 1.9.
- 2. Обвивките на  $T(\lambda)$  са пресметнати без използване на итерации и изискването за гладкост на обвивките, коригирани за  $x_s(\lambda)$ , т.е. за непрекъснатост на техните първи производни, не е стриктно изпълнено. Вместо итерации, обвивките са пресмятани посредством сложна двустъпкова процедура. Освен това, гладкостта на  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  [1,2,104-111] и непрекъснатостта на  $T(\lambda)$  от [1.55] обуславят изискването за гладкост на пресметнатите обвивки на  $T(\lambda)$ .
- 3.  $k_c(\lambda_t)$  се пресмята от приблизителната формула (1.61) за горната обвивка  $T_+(\lambda)$ , при това използвайки  $T_+(\lambda)$ , която може да бъде определена неточно.
- Обичайно съществуват неравности в n<sub>c</sub>(λ) и k<sub>c</sub>(λ), видни напр. от Фиг. 2.5 и Фиг.
   в следствие на пресмятането им с използване само на УКЕП интерполацията относно λ<sub>t</sub>, обсъдена в Раздел 2.4. От друга страна, n(λ) и k(λ) не бива да съдържат такива неравности [1,2,104-111].

#### **4.3.** Представяне на оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за $T(\lambda)$

Въз основа на съображенията за премахване на недостатъците на УАМОТ, представени в Раздел 4.3, е предложен оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за  $T(\lambda)$ , който наричаме ОАМОТ. ОАМОТ може да бъде използван за характеризиране на неравномерен или равномерен тънък слой върху светопропускаща подложка с  $x_s(\lambda) \le 1$ . ОАМОТ се основава на УАМОТ от [92] и е представен на Фиг. 4.2. Изпълнението на ОАМОТ може да бъде разделено на два етапа, като елементите на ОАМОТ различаващи се от тези на УАМОТ са записани с дебели и подчертани букви на Фиг. 4.2.





Фиг. 4.2. Оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за T(λ) (OAMOT) за характеризиране на неравномерен или равномерен тънък слой върху светопропускаща подложка с x<sub>s</sub>(λ) ≤ 1. Елементите от OAMOT, които се различават от тези на УАМОТ, са записани с дебели и подчертани букви.

# 4.4. Характеризиране на слоевете a-Si от образците A038 и A041 посредством OAMOT

С цел сравняване на точността на ОАМОТ и УАМОТ, слоевете a-Si от образците A038 и A041 са характеризирани посредством ОАМОТ [134].

Първият етап от ОАМОТ е изпълнен за всеки от слоевете А038 и А041, за двата случая, когато точките  $T_+(\lambda_{t_-})$  и  $T_-(\lambda_{t_+})$  съответно са коригирани и не са коригирани в областта  $x_s(\lambda) < 1$ . Получените резултати са представени в Табл. 4.1. Резултати от първия етап на характеризирането на слоевете А038 и А041 посредством ОАМОТ от Фиг. 4.2. Данните за  $\overline{d}_c$ ,  $\Delta d_c$  и  $m_{1c}$ , съответстващи на наймалките стойности на ПГ  $\sigma/N_2$ , представляват изчислените стойности на тези параметри и са показани в тъмносивите области. Съответните най-точни резултати, получени посредством УАМОТ и представени в Табл. 2.1 и 2.2, са означени с \* и показани в светлосивите области.

Първи етап от характеризиране на слоевете A038 и A041 посредством ОАМОТ от Фиг. 4.2						
Символно означение (C)	$T_{+}(\lambda_{t_{-}}) \& T_{-}(\lambda_{t_{+}})$	Стойност на ПГ: σ/N <sub>2</sub> (nm) or <i>RSMD</i> /N <sub>2</sub>	Резултати: $\overline{d}_{c}$ (nm), $\Delta d_{c}$ (nm), $m_{1c}$			
	c	лоя А041				
C41a	са коригирани	σ/N <sub>2</sub> = <b>0.567 nm</b>	<u>3929.9 nm,</u> 53.5 nm, 12			
C416	в областта <i>x</i> s(λ)<1	RSMD/N <sub>2</sub> = 2.11×10 <sup>-3</sup>	3932.6 nm, 53.4 nm, 12			

Табл. 4.1

С41в	не са коригирани	$\sigma/N_2 = 0.592 \text{ nm}$	3949.8 nm, 52.8 nm, 12
C41r	в областта <i>x</i> ₅(λ)<1	$RSMD/N_2 = 2.45 \times 10^{-3}$	3953.0 nm, 52.7 nm, 12
*	най-точен резултат от	σ/N <sub>2</sub> = 0.581 nm	3921.7 nm, 55.0 nm, 12
		лоя А038	
C38a	са коригирани	σ/N <sub>2</sub> = 0.318 nm	774.6 nm, 26.7 nm, 2
C386	в областта <i>x</i> ₅(λ)<1	RSMD/N <sub>2</sub> = 1.42×10 <sup>-3</sup>	773.8 nm, 26.9 nm, 2
С38в	не са коригирани	σ/N <sub>2</sub> = 0.453 nm	783.1 nm, 24.4 nm, 2
C38r	в областта <i>x</i> ₅(λ)<1	RSMD/N <sub>2</sub> = 1.77×10 <sup>-3</sup>	781.9 nm, 24.7 nm, 2
*	най-точен резултат от Табл. 2.1	σ/N <sub>2</sub> = 0.341 nm	785.7 nm, 23.1 nm, 2

Резултати от втория етап от ОАМОТ са показани в таблица 4.2. Резултати от втория етап на характеризирането на слоевете A038 и A041 посредством ОАМОТ от Фиг. 4.2. Общите показатели на грешката ОПГ<sub>1</sub> до ОПГ<sub>4</sub> се пресмятат от (2.7), като  $T_c(\lambda)$  се изчислява от (1.55). Най-малките стойности на ОПГ са подчертани в тъмносивите области. Съответните най-точни данни, получени посредством УАМОТ и представени в Табл. 2.1 и 2.2, са показани в светлосивите области.

Табл. 4.2

Втог	Втори етап от характеризиране на слоевете А038 и А041 посредством ОАМОТ от Фиг. 4.2								
Входни данни от:	Символ (С)	Особености	$O\Pi\Gamma_1$ 3a $k_c=k_a+\Delta k$	$ \begin{array}{c} \text{O}\Pi\Gamma_2\\\text{3a}\\k_c=k_a \end{array} $	$O\Pi\Gamma_3$ 3a $k_c(T_+)$	OIII $_{4}$ 3a $k_{c}(\lambda < \lambda_{b}) = k_{a} + \Delta k,$ $k_{c}[T_{+}(\lambda \ge \lambda_{b})]$			
слой А041									
C41a	C41aa	$n_{c}\{\Lambda\}, k_{a}\{\Lambda\}$ са напасвани чрез полиноми с оптимизирани степени 5 и 8. ОПГ <sub>3</sub> използва $k_{c}$ пресметнат от $T_{+}$ от (4.8).	<u>5.71×10-3</u>	7.39×10 <sup>-3</sup>	7.78×10-3				
C41a	C41aõ	$n_{c}\{A\}$ е напасван чрез полином от 4-та степен, и $k_{a}\{A\}$ - чрез 2 'двучленни експоненти'. ОПГ <sub>3</sub> използва $k_{c}$ получено от (4.8).	5.75×10-3	7.36×10-3	7.78×10-3				
C41a	С41ав	$n_{c}\{A\}, k_{a}\{A\}$ са напасвани чрез полиноми с оптимизирани степени 5 и 8. ОПГ <sub>3</sub> използва $k_{c}$ пресметнат от $T_{+}$ от (1.61).	5.71×10-3	7.39×10 <sup>-3</sup>	7.78×10-3				

Най- точни данни от Табл. 2.2.	C41ar	$\overline{d}$ =3921.7nm, $\Delta d$ =55.0nm, $m_1$ =12. Съществуват неравности в $n_c(\lambda)$ и $k_a(\lambda)$ пресметнати единствено чрез УКЕП интерполации.		7.74×10 <sup>-3</sup>		
		сло	й А038			
C38a	C38aa	$n_{c}\{A\}$ и $k_{a}\{A\}$ са напасвани чрез 1 и 2 'двучленни експоненти'. ОПГ <sub>3</sub> използва $k_{c}$ пресметнат от $T_{+}$ от (4.8).	3.03×10-3	2.17×10-3	2.08×10-3	<u>1.89×10<sup>-3</sup> 3a</u> <u>λ<sub>b</sub>≈ 1600 nm</u>
C38a	С38аб	$n_{c}{\Lambda}$ е напасван чрез полином от 5-та степен, и $k_{a}{\Lambda}$ - чрез 2 'двучленни експоненти'. ОПГ <sub>3</sub> използва $k_{c}$ получено от (4.8).	Напасвано полином о степен е н неравност	е на $n_{c}(\lambda_{t})$ чу от оптимизи еточно, и и ти в $k_{a}\{A\}$ .	рез ирана 1ма	
C38a	С38ав	$n_{c}{A_{f}}$ и $k_{a}{A_{f}}$ са напасвани чрез 1 и 2 'двучленни експоненти'. ОПГ <sub>3</sub> използва $k_{c}$ пресметнат от $T_{+}$ от (1.61).	3.03×10-3	2.17×10-3	2.07×10-3	
Най- точни данни от Табл. 2.1.	C38ar	$\overline{d}$ =785.0 nm, $\Delta d$ =23.5 nm, $m_1$ =2. Съществуват неравности в $n_c(\lambda)$ и $k_a(\lambda)$ пресметнати единствено чрез УКЕП интерполации.		2.63×10-3		

Изводи:

От Табл. 4.1. се вижда, че ПГ  $\sigma/N_2$  има по-малка стойност при характеризиране на всеки от слоевете A038 и A041 посредством OAMOT, в сравнение с VAMOT; отчитайки резултата от Глава 3, че  $\sigma/N_2$  е най-точния ПГ за VAMOT. Това показва, че характеризирането на тези слоеве на първия етап от OAMOT е по-точно, отколкото на първи етап от YAMOT.

Данните от тъмносивите и светлосивите области показват, че по-точно характеризиране на слоевете A038 и A041 е постигнато посредством OAMOT в сравнение с УАМОТ.

### ГЛАВА 5

Характеризиране на тънки слоеве As<sub>x</sub>Te<sub>100-x</sub> от тънък светопропускащ слой нанесен върху светопропускаща подложка въз основа на оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на пропускане

5.2. Особености на характеризиране на слоевете As<sub>x</sub>Te<sub>100-x</sub> основано на ОАМОТ

Трите слоя As<sub>x</sub>Te<sub>100-x</sub>, описани в Раздел 5.1, са характеризирани въз основа на ОАМОТ от Фиг. 4.2 и обяснени в Глава 4. При това са използвани няколко нововъведения, които са обяснени по-долу.

# 5.2.1. Двойно преобразуване относно T(λ) с отчитане на поглъщането в подложката

Въпреки че УВ/ВИС/НИР спектрофотометрите осигуряват светлина с  $\lambda \approx$  3000 nm [78,79], доколкото ни е известно няма публикувани литературни данни за МО характеризиране на тънък слой върху стъклена подложка за  $\lambda > 2500$  nm. Това се дължи най-вече на относително силното поглъщане на светлина с  $\lambda > 2500$  nm в стъклото, което обичайно води до голямо изкривяване на спектъра на пропускане  $T(\lambda > 2500$  nm) на ТССВСП [112,140]. За характеризиране на тънък слой върху стъклена подложка, включващо областта  $\lambda > 2500$  nm, предлагаме използване на двойно преобразуване на спектрите на пропускане. Това преобразуване може да се използва при наличие на спектрална област от  $T(\lambda)$  с поглъщане в подложката, в която  $x_s(\lambda_t) < 1$ , и се състои от право преобразуване и обратно преобразуване.

Във връзка с гореописаното отбелязваме, че  $T_{sm}(\lambda)$  от (1.55), неговите обвивки  $T_{+}(\lambda)$  и  $T_{-}(\lambda)$  от (1.61), както и  $T_{s}(\lambda)$  от (1.42) са пропорционални на първата степен на коефициента на прозрачност на подложката  $0 < x_s(\lambda) \le 1$ . Освен това,  $x_s(\lambda)$  и  $T_s(\lambda)$  на стъклена подложка обичайно имат значително по-малки стойности в областта  $\lambda$  > 2500 nm [112,140]. Съответно, предложеното преобразуване включва изчисляване на функцията  $T(\lambda)' = T(\lambda)/x_s(\lambda)$  и нейното заглаждане, с което се пресмята величината  $T_{\rm sm}(\lambda)$ , представляваща приближение на коефициента на пропускане на ТССВСП, чиято подложка е заменена с прозрачна. Обвивките  $T_{+}(\lambda)$ 'и  $T_{-}(\lambda)$ ' на  $T_{sm}(\lambda)$ ' се изчисляват въз основа на описанието от Раздел 4.2, с използване на  $x_s(\lambda)'=x_s(\lambda)/x_s(\lambda)=1$ , и се определят всичките им допирателни дължини на вълната  $\lambda_t(i)$  с  $T_{sm}(\lambda)'$ , завършвайки правото преобразуване. След това се изпълнява първия етап от ОАМОТ посредством използване на точките  $T_{+}(\lambda_{t})$ 'и  $T_{-}(\lambda_{t})$ ', при което  $x_{s}(\lambda)' = 1$ , и се изключват найдълговълновите  $\lambda_t$ , за които  $x_s(\lambda_t) \ll 1$ , тъй като  $x_s(\lambda)$  присъства не само в числителя на (1.42,1.55,1.61). В края на такъв първи етап от ОАМОТ се изчисляват  $\overline{\mathbf{d}}_{c}$ ,  $\Delta \mathbf{d}_{c}$  и  $m_{1c}$ , както е показано в Разделите 4.2 до 4.4.

При обратното преобразуване се изчисляват загладеният спектър  $T_{\rm sm}(\lambda) = T_{\rm sm}(\lambda)'x_{\rm s}(\lambda)$  и неговите обвивки  $T_{+}(\lambda) = T_{+}(\lambda)'x_{\rm s}(\lambda)$  и  $T_{-}(\lambda) = T_{-}(\lambda)x_{\rm s}(\lambda)$ . Отбелязваме, че допирателните дължини на вълната за  $T_{\rm sm}(\lambda)$  са същите, като вече определените  $\lambda_t(i)$ , тъй като  $T_{\rm sm}$ ,  $T_{+}$  и  $T_{-}$  са представени чрез умножаване на съответните им  $T_{\rm sm}'$ ,  $T_{+}' \ge T_{\rm sm}'$  и  $T_{-}' \le T_{\rm sm}'$  с едно и също число  $x_{\rm s} > 0$ , за всяка  $\lambda$ . След изчисляването на  $T_{\rm sm}(\lambda)$ ,  $T_{+}(\lambda)$ ,  $T_{+}(\lambda)$ , и всичките  $\lambda_t(i)$ , вторият етап от ОАМОТ може да бъде изпълнен, както е показано в Разделите 4.2 до 4.4, като се вземе предвид поглъщането на светлина в подложката, посредством използване на  $x_{\rm s}(\lambda) \le 1$ .

# 5.2.2. Определяне на долна граница на пресметнатия показател на пречупване на слоя n<sub>c</sub>(λ)

Приблизителен израз за пресметнатия показател на пречупване  $n_{\rm c}(\lambda)$  на ТССВСП е зададен от (1.72), който се записва по следния начин за областта с интерференчна картина в  $T(\lambda)$ :  $n_{\rm c}(\lambda) \cong \sqrt{M_2 + \sqrt{M_2^2 - n_{\rm s}^2}}$  (5.1) където  $M_2(\lambda) = 8n_{\rm s}^2 \frac{\frac{T_{\rm u0+} - T_{\rm u0-}}{T_{\rm u0+} T_{\rm u0-}}}{\frac{(n_{\rm s} + 1)^2}{r} - (n_{\rm s} - 1)^2 x_{\rm s}} + \frac{n_{\rm s}^2 + 1}{2}$ , като  $T_{\rm u+}(\lambda)$  и  $T_{\rm u+}(\lambda)$ 

ca

горната и долната обвивки на загладения спектър на пропускане на съответния ТССВСП с равномерен слой [113].

Във връзка с това, следните неравенства са валидни за ТССВСП със същите характеристики, с изключение на това, че слоят със същия  $\overline{d}$  е неравномерен:

$$T_{+}(\lambda) \leq T_{\mathrm{u}+}(\lambda), T_{-}(\lambda) \geq T_{\mathrm{u}-}(\lambda), (5.2)$$

където  $T_+(\lambda)$  и  $T_-(\lambda)$  са горната и долната обвивка на загладения спектър на пропускане  $T_{sm}(\lambda)$  на този ТССВСП с неравномерен слой [113,119]. Освен това, разглеждаме величината:

$$n_{1}(\lambda) \cong \sqrt{M_{3} + \sqrt{M_{3}^{2} - n_{s}^{2}}}, \text{ (bd} m_{3}(\lambda) = 8n_{s}^{2} \frac{\frac{T_{u+} - T_{u-}}{T_{u+} T_{u-}}}{\frac{\left(n_{s} + 1\right)^{2}}{x_{s}} - \left(n_{s} - 1\right)^{2} x_{s}} + \frac{n_{s}^{2} + 1}{2}$$

(5.3)

Въз основа на (5.1) до (5.3) се показва, че:

 $n_{\rm c}(\lambda) \geq n_{\rm l}(\lambda)$ , (5.4)

което показва, че  $n_l(\lambda)$  представлява долна граница на  $n_c(\lambda)$ .

#### 5.2.3. Алтернативен подход за пресмятане на k<sub>c</sub>(λ) на слоя

Сьобразно с описанието в Раздел 4.2, в алгоритмите основани на МО,  $k_c(\lambda)$  се изчислява от уравнение за  $T_+(\lambda)$  или за  $T_{\rm sm}(\lambda)$ , като тези две уравнения са изведени приемайки, че светлината, преминаваща през слоя, е кохерентна. Също там беше обяснено, че  $T_{\rm sm}(\lambda)$  и особено  $T_+(\lambda)$  могат да бъдат повлияни от частичната кохерентност на светлината, вследствие на разсейването на светлината в слоя. Във връзка с това, в [95,97] е било показано, че величината:  $T_i(\lambda) \cong \sqrt{T_+(\lambda) T_-(\lambda)}$ , (5.5)

представлява коефициент на пропускане на изследваната ТССВСП при пренебрегване на тънкослойната интерференция. Следователно  $T_i(\lambda)$  не зависи от това дали светлината, преминаваща през слоя е кохерентна или частично кохерентна. Освен това, точността на пресмятане на  $T_i(\lambda)$  обичайно е по-голяма от тази на  $T_+(\lambda)$  и  $T_-(\lambda)$ ; тъй като техните грешки са с противоположни знаци поради частичната кохерентност на светлината ,преминаваща през слоя и факта че  $T_i(\lambda)$  е значително по-гладка функция от  $T_{sm}(\lambda)$ .

В случай на използване на двойното преобразуване при съществуване на област с  $x_{s}(\lambda_{t}) < 1$ , описано в Раздел 5.2.1, преобразуваният  $T_{i}(\lambda)^{'} \cong \sqrt{T_{+}(\lambda)^{'} T_{-}(\lambda)^{'}}$  съобразно с (5.5); и от обратното му преобразуване се получава  $T_{i}(\lambda) = T_{i}(\lambda)^{'} x_{s}(\lambda)$ .

В допълнение към извода на точната формула (4.8) за  $T_+(\lambda)$ , точна формула за  $T_-(\lambda)$  може да бъде изведена с използване на съотношението:  $\varphi = 4\pi n \left[ \overline{d} + \left( d - \overline{d} \right) \right] / \lambda = 4\pi n (\overline{d} + \delta d) / \lambda \xrightarrow[\text{от (1.58)}]{} = 2\pi . \text{полу} - цяло число + 4\pi n \delta d / \lambda$ 

. Заместване на това съотношение в (1.55) води до:

$$T_{-}(\lambda) = \frac{1}{\varphi_{2_{-}} - \varphi_{1_{-}}} \int_{\varphi_{1_{-}}}^{\varphi_{2_{-}}} T_{u}(\varphi_{-}) d\varphi_{-} = \frac{\left(\tau_{a,f} \tau_{f,s} \tau_{s,a}\right)^{2} x_{s}}{\varphi_{2_{-}} - \varphi_{1_{-}}} \int_{\varphi_{1_{-}}}^{\varphi_{2_{-}}} \frac{x d\varphi_{-}}{a_{1} - b_{1} \cos(\varphi_{-}) + c_{1} \sin(\varphi_{-})}$$
, (5.6)  
където  $\varphi_{-} = 4\pi n (\delta d) / \lambda + \pi, \varphi_{1_{-}} = -4\pi n \Delta d / \lambda + \pi, \varphi_{2_{-}} = 4\pi n \Delta d / \lambda + \pi$ . В израза (5.6) за  
 $T_{-}(\lambda), k(\lambda)$  и  $k_{s}(\lambda)$  участват в амплитудните коефициенти на пропускане и

отражение на границите на ТССВСП (1.32); за разлика от приблизителния израз (1.61) за  $T_{-}(\lambda)$ , където  $k(\lambda)$  и  $k_{s}(\lambda)$  не участват в тези амплитудни коефициенти. Съответно, (5.6) представлява по-точна формула за долната обвивка  $T_{-}(\lambda)$  на  $T(\lambda)$  на ТССВСП, в сравнение с (1.61).

Като се вземат предвид досегашните коментари от Раздел 5.2.3, неизвестното  $k_c[T_i(\lambda)]$  може да бъде изчислено за всяка  $\lambda$ , чрез решаване на (5.5) в което са заместени вече известните  $T_+(\lambda)$ ,  $T_-(\lambda)$ ,  $\overline{d}_c,\Delta d_c$  и  $n_c(\lambda)$ . При характеризирането на слоя въз основа на ОАМОТ, тъй като се изчисляват различни  $k_c(\lambda)$ , напр. от  $T_{sm}(\lambda)$  и (1.55),  $T_+(\lambda)$  и (4.8), и  $T_i(\lambda)$  и (5.5), пресметнатият показател на затихване на слоя е избран да бъде  $k_c(\lambda)$ , съответстващ на най-малкия ОПГ от (2.7) [134].

# 5.3. Резултати от характеризиране на слоевете As<sub>x</sub>Te<sub>100-x</sub> основано на ОАМОТ

### 5.3.1. Характеризиране на слоя As40Te60 върху подложка от сапфир

Тъй като сапфирът е квази-прозрачен в използвания интервал от  $\lambda$  [139],  $x_s(\lambda) \cong 1, T_s(\lambda) \sim x_s(\lambda) \cong$  константа [112] и ОАМОТ от Фиг. 4.2 се изпълнява както е описано в Раздели 4.2 до 4.4, с изключение на отсъствие на корекция на обвивките  $T_+(\lambda)$  и  $T_-(\lambda)$  за  $x_s(\lambda) < 1$ . Данните и резултатите от характеризирането на слоя As<sub>40</sub>Te<sub>60</sub> посредством ОАМОТ са показани на Фиг. 5.3. Пресметнатите стойности на  $\overline{d}_c$ ,  $\Delta d_c$  и  $m_{1c}$ , получени в края на първия етап от ОАМОТ, са записани във Фиг. 5.3 (б).

От Фиг. 5.3 (б) се вижда, че показателят на пречупване на слоя  $n(\lambda)$  намалява с увеличаване на  $\lambda$ , т.е. слоят има нормална дисперсия в изследвания спектрален диапазон; и  $n_c(\lambda)$  е по-голям от долната граница  $n_l(\lambda)$ , в съответствие с (5.4). Освен това, Фиг. 5.3 (в,г,д) показват, че слоят има широка спектрална област на квазипрозрачност, т.е. област с пренебрежимо малък показател на затихване  $k(\lambda)$ .



Фиг. 5.3. Входни данни и пресметнати резултати от характеризирането на слоя  $A_{S40}Te_{60}$  посредством ОАМОТ. (a)  $T_s(\lambda)$ ,  $T(\lambda)$ ,  $T_{sm}(\lambda)$ , обвивките му  $T_+(\lambda)$  и T. ( $\lambda$ ), точките  $T_+(\lambda_l)$  и T. $(\lambda_l)$ , представени с кръгове, и  $T_i(\lambda)$ ; (б)  $n_c(\lambda)$  получено чрез напасване на крива към  $n_0(\Lambda)$ , визуализирано чрез кръгове, и долната му граница  $n_l(\lambda)$ ; (в)  $k_0(\lambda)$  пресметнато от (1.55) и кривата  $k_a(\lambda)$  напасвана към  $k_0(\Lambda)$ ; (г) определяне на некохерентната корекция  $\Delta k(\lambda) > 0$ ; (д)  $k_c = k_a + \Delta k u k_c(T_+)$ изчислено от (4.8); (е) разлика между  $T(\lambda)$  и  $T_c(\lambda)$ , изчислена съответно за

 $k_c(T_+) \ u \ k_c = k_a + \varDelta k.$ 

### 5.3.2. Характеризиране на слоя АѕувТе2 върху стъклена подложка

Слоят As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub> е бил отложен за петнадесет минути върху стъклена подложка, описана в предпоследния параграф от Раздел 5.1. Такива стъклени

подложки поглъщат относително силно светлина с  $\lambda > 2500$  nm, което се вижда от значително по-ниските стойности на  $T_s(\lambda > 2500$  nm) от Фиг. 5.4 (а). Съответно се използва двойното преобразуване относно  $T_{sm}(\lambda)$ , описано в Раздел 5.2.1. Първият етап от ОАМОТ се изпълнява с изключване само на най-дълговълновата  $\lambda_t(1)$ , тъй като само тя е в областта на значително по-ниски стойности на  $T_s(\lambda)$ . Данните и резултатите от характеризирането на слоя As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub> посредством ОАМОТ са показани на Фиг. 5.4.



Фиг. 5.4. Входни данни и пресметнати резултати от характеризирането на слоя As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub> посредством OAMOT. (a) T<sub>s</sub>(λ), T(λ), T<sub>sm</sub>(λ) ', обвивките му T<sub>+</sub>(λ)' и T<sub>-</sub>(λ)', точките T<sub>+</sub>(λ<sub>t</sub>)' и T<sub>-</sub>(λ<sub>t</sub>)', представени с кръгове, и T<sub>i</sub>(λ)'; (б) n<sub>0</sub>(Λ) показан с кръгове, n<sub>c</sub>(λ) и долната му граница n<sub>l</sub>(λ); (в) k<sub>0</sub>(λ) и кривата k<sub>a</sub>(λ) напасвана към

 $k_0(\Lambda)$ ; (г) определяне на некохерентната корекция  $\Delta k(\lambda)$ ; (д)  $k_c = k_a + \Delta k \, u \, k_c(T_+)$ изчислено от (4.8); (е) разлика между  $T(\lambda) \, u \, T_c(\lambda)$ , изчислена съответно за

$$k_c(T_+) \ u \ k_c = k_a + \varDelta k.$$

От Фиг. 5.4 се вижда, че  $T_{sm}(\lambda)'$ ,  $T_+(\lambda)'$  и  $T_-(\lambda)'$ , получени чрез правото преобразуване от Раздел 5.2.1, нямат значително по-малки стойности в областта  $\lambda > 2500$ nm на относително силно поглъщане в подложката, за разлика от  $T_s(\lambda)$  и  $T(\lambda)$ . Това позволява точно изчисляване на  $T_{sm}(\lambda)'$ ,  $T_+(\lambda)'$ ,  $T_-(\lambda)'$ ,  $T_i(\lambda)'$  и  $\lambda_t(i)$ ; последвано от точно пресмятане на  $T_{sm}(\lambda)$ ,  $T_+(\lambda)$ ,  $T_-(\lambda)$  и  $T_i(\lambda)$  чрез обратното преобразуване. Фиг. 5.4 (б) показва също, че  $n(\lambda)$  има нормална дисперсия в целия изследван спектрален диапазон, като  $n_c(\lambda) > n_i(\lambda)$ . Освен това, слоят има широка спектрална област на квази-прозрачност – Фиг. 5.4 (в), (д). Отбелязваме, че разликата между пресметнатата средна дебелина на слоя  $\overline{d}_c = 1983,8$  nm, показана на Фиг. 5.4 (б) и  $\overline{d} = 1988$  nm от СЕМ изображението от Фиг. 5.2 (б) е 0,24%.

Положителната некохерентна корекция  $\Delta k(\lambda) \approx 2 \times 10^{-4}$  за слоя As<sub>40</sub>Te<sub>60</sub>, видна от Фиг. 5.3 (г), се дължи на разсейването на светлината в този относително дебел слой, което води до свиване на интерференчната картина в  $T(\lambda)$  [134]. Положителната или отрицателна  $\Delta k(\lambda)$  за слоя As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub> от Фиг. 5.4 (г) се дължи на по-малкото разсейване на светлината в този по-тънък слой, което до голяма степен е компенсирано чрез външното заглаждане на  $T(\lambda)$ .

#### 5.3.3. Характеризиране на слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub> върху стъклена подложка

Слоят As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub> е бил отложен за тридесет минути върху стъклена подложка, описана в предпоследния параграф от Раздел 5.1. Използва се двойното преобразуване относно  $T_{sm}(\lambda)$ , описано в Раздел 5.2.1. Първия етап от OAMOT се изпълнява с изключване на четирите най-дълговълнови  $\lambda_t(i)$ , тъй като те са в областта на значително по-ниски стойности на  $T_s(\lambda)$  от Фиг. 5.5 (а). Данните и резултатите от характеризирането на слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub> посредством OAMOT са показани на Фиг. 5.5, като оптимизираният брой на  $\lambda_t(i)$ , участващи в първия етап на характеризирането, е  $N_2 = 22$ . Зависимостта  $n_e(\lambda)$  от Фиг. 5.5 (б) се определя посредством заместване на вече изчислените  $T_+(\lambda)$ ,  $T_-(\lambda)$ ,  $\overline{d}_c$ ,  $\Delta d_c$  и  $m_{1c}$  в уравненията (4.8) и (5.6) на обвивките. Решаване на тези две уравнения води до пресмятане на двете неизвестни компоненти  $n_e$  и  $k_e$  на комплексния показател на пречупване на слоя за всяка  $\lambda$ . Най-голямата  $\lambda$  ,за която  $n_c(\lambda)$  пресича  $n_e(\lambda)$  е



Фиг. 5.5. Входни данни и пресметнати резултати от характеризирането на слоя  $As_{80}Te_{20}$  посредством OAMOT. (a)  $T_s(\lambda)$ ,  $T(\lambda)$ ,  $T_{sm}(\lambda)'$  и обвивките му  $T_+(\lambda)'$  и  $T_-(\lambda)'$ ; (б)  $n_0(\Lambda)$ ,  $n_c(\lambda)$ ,  $n_l(\lambda)$  и  $n_e(\lambda)$ ; (в)  $k_0(\lambda)$  и кривата  $k_a(\lambda)$  напасвана към  $k_0(\Lambda)$ ; (г)  $k_c(T_+)$  изчислено от (4.8),  $k_c(T_i)$  изчислено от (5.5),  $k_c = k_a + \Delta k$  и  $k_c = k_a$ ; (д)  $T(\lambda)$  и пресметнатия спектър  $T_c(\lambda)$  изчислен за  $k_c = k_a$ ; (е) разлика между  $T(\lambda)$  и  $T_c(\lambda)$  за  $k_c = k_a$ ,  $k_c(T_+)$  и  $k_c(T_i)$ .

Сравнението на  $T(\lambda)$  от Фигури 5.3 (а), 5.4 (а) и 5.5 (а) показва, че слоят As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub> има доста различни оптични характеристики в сравнение със слоевете As<sub>40</sub>Te<sub>60</sub> и As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub>. Например, много по-тясната интерференчна картина в  $T(\lambda)$  от

Фиг. 5.5 (а) демонстрира, че показателят на пречупване  $n(\lambda)$  на слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub> е значително по-малък от този на слоевете As<sub>40</sub>Te<sub>60</sub> и As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub>, както е обяснено в [20]. От друга страна, над двойно по-големия брой N<sub>t</sub> на екстремумите на  $T_{\rm sm}(\lambda)$  от Фиг. 5.5 (а) показва, че произведението  $n(\lambda)\overline{d}$  за слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub> е поне два пъти по-голямо от това за слоевете As<sub>40</sub>Te<sub>60</sub> и As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub>, съобразно с (1.58). Горните данни от този параграф показват, че средната дебелина на слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub> е значително по-голяма от 2 $\overline{d}_c$  = 6613,8 nm на слоя As<sub>40</sub>Te<sub>60</sub>.

Освен това, разликата  $T_s(\lambda) - T_+(\lambda)$  е много по-голяма в областта на интерференчната картина от Фиг. 5.5 (а), отколкото за слоевете As<sub>40</sub>Te<sub>60</sub> и As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub>, което показва значително по-силно поглъщане и по-голямо  $k(\lambda)$  на слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub>. Нещо повече,  $T_i(\lambda)$  от Фиг. 5.5 (а) намалява с увеличаване на  $\lambda$  над 2300 nm, което индикира нарастващо поглъщане в слоя и може да бъде обяснено с аномална дисперсия в тази област. В допълнение, разликата  $T_+(\lambda)$  -  $T_-(\lambda)$  от Фиг. 5.3 (а) и 5.4 (а) няма очевиден минимум в областта на интерференчната картина. От друга страна,  $T_+(\lambda)$  -  $T_-(\lambda)$  от Фиг. 5.5 (а) нараства с увеличаване на  $\lambda$  над неин очевиден минимум при  $\lambda \approx 2100$  nm, което показва увеличаване на  $n(\lambda)$  за  $\lambda > 2100$ nm, потвърждавайки наличието на аномална дисперсия в изследваната спектрална област на слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub>.

В допълнение към гореописаното, данните от Фиг. 5.5 (б) показват, че съответното характеризиране на слоя  $As_{80}Te_{20}$  посредством ОАМОТ не идентифицира коментираното по-горе наличие на аномална дисперсия за слоя. От Фиг. 5.5 (б) се вижда също, че разликата  $n_1[max(\lambda)] - n_c[max(\lambda)]$  е твърде голяма, като  $n_c(\lambda > \lambda_b) < n_e(\lambda > \lambda_b) \approx n_1(\lambda > \lambda_b)$  въпреки че  $n_1(\lambda)$  трябва да бъде долна граница на  $n_c(\lambda)$  съгласно (5.4). Освен това, разликата  $|T(\lambda > 2600 \text{ nm}) - T_c(\lambda > 2600 \text{ nm})|$  достига твърде големи стойности на Фиг. 5.5 (е) в сравнение с Фиг. 5.3 (е) и 5.4 (е). Тези факти показват, че представеното на Фиг. 5.5 характеризиране на слоя  $As_{80}Te_{20}$  от ОАМОТ е неточно в областта на аномална дисперсия за слоя. Основна причина за това е изключването на четирите най-дълговълнови  $\lambda_t(i)$  от изпълнението на първия етап от ОАМОТ, съответстващ на Фиг. 5.5; тъй като тези  $\lambda_t(i)$  принадлежат към областта на аномалната дисперсия, където  $T_+(\lambda)$  -  $T_-(\lambda)$  нараства значително с увеличаване на  $\lambda$ .

Отбелязваме, че точно характеризиране на слой посредством МО изисква точно определяне на най-ниския порядък на интерференция  $m_{1c}$ , който има цяла или полу-цяла стойност, тъй като това стеснява интервала от възможни стойности на средната дебелина на слоя  $\overline{d}_c$ , съобразно с (1.58). Съответно, неуспехът на характеризирането посредством ОАМОТ да идентифицира наличието на аномална дисперсия за слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub>, с резултати показани на Фиг. 5.5, се дължи на неточно определяне на  $m_{1c}$ .

С цел определяне на точния  $m_{1c}$  се използва опростен ОАМОТ с фиксиране на  $m_{1c}$  към всяка възможна стойност от (1.55), и на броят на използваните екстремуми  $N_2 = N_v$  на  $T_{sm}(\lambda)$  при изпълнение на първия етап на ОАМОТ. При това,  $N_v$  е равен на  $N_t$ +1 минус броя на изключваните най-дълговълнови  $\lambda_t$ (i) при изпълнение на първия етап на ОАМОТ, съобразно с (4.9). На втория етап от съответните опростени характеризирания на слоя се използва  $k_c(T_i)$  пресметнат от (5.5), както е описано в Раздел 5.3.2. Основните резултати от тези изчисления са представени в Табл. 5.1.

От Табл. 5.1 се вижда, че най-малките ПГ  $\sigma/N_2 = \sigma(d_2)/N_2$  и ОПГ съответстват на един и същ  $m_{1c}$ , за всеки един от слоевете As<sub>40</sub>Te<sub>60</sub> и As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub>; което потвърждава точността на техните характеристики представени на Фиг. 5.3 и 5.4. Това оправдава и концепцията на УАМОТ и ОАМОТ, че пресмятане на  $\overline{d}_c$ ,  $\Delta d_c$  и  $m_{1c}$  за най-малкия възможен  $\sigma/N_2$  представлява основа за точно пресмятане на  $n(\lambda)$ и  $k(\lambda)$  на характеризирания тънък слой от ТССВСП.

Най-малкият  $\sigma/N_2$  и най-малкият ОПГ от Табл. 5.1 обаче отговарят на различни стойности на  $m_{1c}$  за значително по-дебелия слой  $As_{80}Te_{20}$ . Тъй като характеризирането на слоя трябва да осигури пресметнат спектър на пропускане  $T_c(\lambda)$ , възможно най-близък до  $T_+(\lambda)$ , се извършва друго характеризиране на слоя  $As_{80}Te_{20}$ . Това характеризиране е основано на използването на ОАМОТ със стойностите  $\overline{d}_c$ ,  $\Delta d_c$  и  $m_{1c}$ , показани в тъмносивите области в Табл. 1; като данните и резултатите от това характеризиране са показани на Фиг. 5.6. . Основните

резултати от характеризирането на трите слоя  $As_xTe_{100-x}$  с използване на опростения ОАМОТ с фиксирани стойности на  $m_{1c}$  и  $N_2 = N_v$ . Данните, съответстващи на най-малкия ОПГ[k<sub>c</sub>(T<sub>i</sub>)] са показани в тъмносивите области; докато данните относно най-малкия  $\sigma/N_2 = \sigma(d_2)/N_2$  са в светлосива област, когато съответстват на различен  $m_{1c}$ .

слой $As_{40}Te_{50}$ , $m_{1c}$ е фиксиран, $N_2 = N_v = 22$							
$\sigma/N_2$ (nm)	$m_{1c}$	∆d <sub>c</sub> (nm)	$\overline{\mathrm{d}}_{\mathrm{c}}$ (nm)	ОПГ			
3.63	6	47	2676.5	0.0178			
1.89	7	44	2994.7	0.00982			
<u>0.85</u>	8	<u>38</u>	<u>3349.2</u>	0.00500			
1.20	9	25	3748.3	0.00560			
2.36	10	1	4114.8	0.01048			
слой Аs <sub>98</sub> Te <sub>2</sub> , <i>m</i> 1c е фиксиран, <i>N</i> 2 = Nv = 22							
$\sigma/N_2$ (nm)	$m_{1c}$	∆d <sub>c</sub> (nm)	$\overline{d}_{c}$ (nm)	ОПГ			
4.50	2.5	40	1355.7	0.0461			
2.13	3.5	32	1671.3	0.0210			
<u>0.520</u>	<u>4.5</u>	<u>23</u>	<u>1981.1</u>	0.00512			
2.59	5.5	0	2286.9	0.0188			
6.29	65	0	2523.6	0.0447			
0.25	0.5	0	2525.0	0.0447			
слой Аз	<sub>80</sub> Te <sub>20</sub> ,	т <sub>1с</sub> е фикси	иран, N <sub>2</sub> =	N <sub>v</sub> = 47			
слой As σ/N₂ (nm)	0.5 <sub>80</sub> Te <sub>20</sub> , л т <sub>1с</sub>	<del>т<sub>1с</sub> е фикси</del> Δd <sub>c</sub> (nm)	иран, N <sub>2</sub> = d <sub>c</sub> (nm)	0.0447 N <sub>v</sub> = 47 ОПГ			
слой As <i>G/N</i> <sub>2</sub> (nm) 19.83	0.5 m <sub>1c</sub> 4.5	о m <sub>1c</sub> е фикси Δd <sub>c</sub> (nm) 95	иран, N <sub>2</sub> = d <sub>c</sub> (nm) 4945.4	0.0447 N <sub>v</sub> = 47 ΟΠΓ 0.02441			
слой As <i>G/N</i> <sub>2</sub> (nm) 19.83 18.03	6.5 m <sub>1c</sub> 4.5 5.5	о m <sub>1c</sub> е фикси Δd <sub>c</sub> (nm) 95 95	аран, $N_2 = \overline{d}_c$ (nm) 4945.4 5425.2	0.0447 N <sub>v</sub> = 47 ΟΠΓ 0.02441 0.02265			
слой As <i>O/N</i> <sub>2</sub> (nm) 19.83 18.03 16.43	6.5 m <sub>1c</sub> 4.5 5.5 6.5	о m <sub>1c</sub> е фикси Δd <sub>c</sub> (nm) 95 95 95	аран, $N_2 = \overline{d}_c$ (nm) 4945.4 5425.2 5808.8	0.0447 N <sub>v</sub> = 47 ΟΠΓ 0.02441 0.02265 0.01909			
слой As <i>G/N</i> <sub>2</sub> (nm) 19.83 18.03 16.43 15.11	6.5 m <sub>1c</sub> 4.5 5.5 6.5 7.5	т <sub>1с</sub> е фикси Δd <sub>c</sub> (nm) 95 95 95 95	аран, $N_2 = \overline{d}_c$ (nm) 4945.4 5425.2 5808.8 5947.2	0.0447 N <sub>v</sub> = 47 ΟΠΓ 0.02441 0.02265 0.01909 0.01544			
слой As <i>G/N</i> <sub>2</sub> (nm) 19.83 18.03 16.43 15.11 13.83	m1c       4.5       5.5       6.5       7.5       8.5	0 m <sub>1c</sub> е фикси Δd <sub>c</sub> (nm) 95 95 95 95 94	аран, $N_2 = \overline{d}_c$ (nm) 4945.4 5425.2 5808.8 5947.2 6496.4	0.0447         Nv = 47         ΟΠΓ         0.02441         0.02265         0.01909         0.01544         0.01398			
слой As <i>O</i> / <i>N</i> ₂ (nm) 19.83 18.03 16.43 15.11 13.83 12.79	m1c       4.5       5.5       6.5       7.5       8.5       9.5	0 m <sub>1c</sub> е фикси 95 95 95 95 95 94 93	аран, $N_2 = \overline{d}_c$ (nm) 4945.4 5425.2 5808.8 5947.2 6496.4 6914.5	0.0447         Nv = 47         ΟΠΓ         0.02441         0.02265         0.01909         0.01544         0.01398         0.01243			
слой As <i>G/N</i> <sub>2</sub> (nm) 19.83 18.03 16.43 15.11 13.83 12.79 12.10	0.0       m1c       4.5       5.5       6.5       7.5       8.5       9.5       10.5	0 m <sub>1c</sub> е фикси Δd <sub>c</sub> (nm) 95 95 95 95 94 93 92	аран, $N_2 =$ $\overline{d}_c$ (nm) 4945.4 5425.2 5808.8 5947.2 6496.4 6914.5 7325.7	0.0447         Nv = 47         ΟΠΓ         0.02441         0.02265         0.01909         0.01544         0.01398         0.01243         0.01130			
слой As <i>G/N</i> <sub>2</sub> (nm) 19.83 18.03 16.43 15.11 13.83 12.79 12.10 11.80	m1c       4.5       5.5       6.5       7.5       8.5       9.5       10.5       11.5	0 m <sub>1c</sub> е фикси Δd <sub>c</sub> (nm) 95 95 95 95 94 93 92 92	$I_{2}$ (nm) 4945.4 5425.2 5808.8 5947.2 6496.4 6914.5 7325.7 7847.5	0.0447         Nv = 47         ΟΠΓ         0.02441         0.02265         0.01909         0.01544         0.01398         0.01243         0.01130         0.01035			
слой As	0.0       m1c       4.5       5.5       6.5       7.5       8.5       9.5       10.5       11.5       12.5	0 m <sub>1c</sub> е фикси 95 95 95 95 95 95 94 93 92 92 90	$I_2$ (nm) 4945.4 5425.2 5808.8 5947.2 6496.4 6914.5 7325.7 7847.5 8302.6	0.0447         Nv = 47         ΟΠΓ         0.02441         0.02265         0.01909         0.01544         0.01398         0.01243         0.01130         0.01035         0.00981			
слой As <i>G/N</i> <sub>2</sub> (nm) 19.83 18.03 16.43 15.11 13.83 12.79 12.10 11.80 11.92 12.27	0.0         m1c         4.5         5.5         6.5         7.5         8.5         9.5         10.5         11.5         12.5         13.5	0 m <sub>1c</sub> е фикси Δd <sub>c</sub> (nm) 95 95 95 95 95 94 93 92 92 92 90 79	$_{1}$ ран, $N_2$ = $\overline{d}_c$ (nm) 4945.4 5425.2 5808.8 5947.2 6496.4 6914.5 7325.7 7847.5 8302.6 9064.3	0.0447         Nv = 47         ΟΠΓ         0.02441         0.02265         0.01909         0.01544         0.01398         0.01243         0.01130         0.01035         0.00981         0.00937			
слой As <i>G/N</i> <sub>2</sub> (nm) 19.83 18.03 16.43 15.11 13.83 12.79 12.10 11.80 11.92 12.27 12.14	0.0         m1c         4.5         5.5         6.5         7.5         8.5         9.5         10.5         11.5         13.5         14.5	m <sub>1c</sub> е фикси         Δd <sub>c</sub> (nm)         95         95         95         95         95         95         95         95         95         95         95         95         94         93         92         90         79         74	$I_{2}$ (nm) 4945.4 5425.2 5808.8 5947.2 6496.4 6914.5 7325.7 7847.5 8302.6 9064.3 9586.0	0.0447         Nv = 47         ΟΠΓ         0.02441         0.02265         0.01909         0.01544         0.01398         0.01243         0.01130         0.01035         0.00981         0.00937         0.00898			

Табл. 5.1

12.07	16.5	45	10916	0.00878
<u>11.94</u>	<u>17.5</u>	<u>0</u>	<u>11446</u>	<u>0.00859</u>
12.10	18.5	0	11867	0.00889
12.63	19.5	0	12288	0.00931

От Фиг. 5.6 (б) се вижда, че съответното характеризиране идентифицира наличието на аномална дисперсия за слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub>, тъй като разликата  $n_1[\max(\lambda)]$ –  $n_c[\max(\lambda)])$  е значително по-малка, отколкото за характеризирането от Фиг. 5.5. Описанието от последните два параграфа представлява процедурата за основано на OAMOT характеризиране на слоеве с дебелина над 5000 nm, чрез избор на  $m_{1c}$ съответстващ на min {OIIГ[ $m_{1c}, k_c(T_i)$ ]}, илюстрирана от Табл. 5.1 за слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub>.



Фиг. 5.6. Входни данни и изчислени резултати от характеризирането на слоя  $As_{80}Te_{20}$  въз основа на OAMOT с  $\overline{d}_{c,\Delta}d$  и  $m_{1c}$ , показани в съответната

тъмносива област от Табл. 5.1. (а)  $T_s(\lambda)$ ,  $T(\lambda)$ ,  $T_i(\lambda)$ ,  $T_{sm}(\lambda)$  и обвивките му  $T_+(\lambda)$ 

и  $T_{-}(\lambda)$ ; (б)  $n_{c}(\lambda)$  и  $n_{l}(\lambda)$ ; в)  $k_{0}(\lambda)$  и кривата  $k_{a}(\lambda)$ , напасвана към  $k_{0}(\Lambda)$ ; (г)  $k_{c}(T_{+})$ 

изчислено от (4.8),  $k_c(T_i)$  изчислено от (5.5), и  $k_c = k_a + \Delta k$ ; (д)  $T(\lambda)$  и  $T_c(\lambda)$  за  $k_c = k_a + \Delta k$ ; (е) разлика между  $T(\lambda)$  и  $T_c(\lambda)$  за  $k_c(T_i)$ ,  $k_c(T_+)$  и  $k_c = k_a + \Delta k$ .

Допълнителни данни за характеризирането на трите изследвани слоя въз основа на ОАМОТ са представени в Табл. 5.2, като данните за слоевете As<sub>40</sub>Te<sub>60</sub> и As<sub>98</sub>Te<sub>2</sub> са за характеризиранията, представени на Фиг. 5.3 и 5.4. Данните относно слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub> означени като " $m_{1c} = 11,5$ , НД" и " $m_{1c} = 17,5$ , АД" се отнасят до характеризиранията, представени съответно на Фиг. 5.5 и 5.6, като "НД" означава нормална дисперсия и "АД" - аномална дисперсия. Както беше посочено,  $n_c(\lambda)$  от Фиг. 5.5 (б) не идентифицира аномална дисперсия и съответното  $n_{l}[\max(\lambda)] - n_{c}[\max(\lambda)])$  е доста голямо. Поради това се извършва още едно характеризиране на слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub>, като се използват данните за слоя ,записани във Фиг. 5.5 (б) и  $n_c(\lambda \le \lambda_b)$  от Фиг. 5.5 (б), но се предполага че  $n_c(\lambda > \lambda_b)$  $= n_{\rm e}(\lambda > \lambda_{\rm b})$ . Като се има предвид, че това характеризиране идентифицира наличието на аномална дисперсия, то се означава като " $m_{1c} = 11,5, AД$ ". Данните на ОПГ от Табл. 5.2 обаче показват, че това характеризиране е най-неточно измежду трите представени там характеризирания на слоя As<sub>80</sub>Te<sub>20</sub>. Допълнителни данни за характеризирането на слоевете As<sub>x</sub>Te<sub>100-x</sub> въз основа на OAMOT, където  $p_0$  е оптимизираната степен на полинома, представляващ  $n_c(\lambda)$ съобразно с (4.9). Най-малкият ОПГ за даден слой е подчертан в тъмносива област, а най-малкият ОПГ за всяко от останалите характеризирания на слоя As80Te20 е показан в светлосива област. Пресметнатият показател на затихване  $k_c(\lambda)$  на всеки от трите слоя се избира да съответства на стойността на ОПГ от тъмносива област.

Табл. 5.2

слой	<b>σ/N₂ (</b> nm)	$p_0$	ОПГ [ <i>k</i> <sub>c</sub> ( <i>T</i> <sub>+</sub> )]	ОПГ [ <i>k</i> <sub>c</sub> ( <i>T</i> <sub>i</sub> )]	ONF $[k_a(\lambda)]$	ΟΠΓ [ $k_a(\lambda)+\Delta k(\lambda)$ ]
As40Te60	0.335	15	$8.23 \times 10^{-3}$	$7.29 \times 10^{-3}$	$7.25 \times 10^{-3}$	$5.94 \times 10^{-3}$
As <sub>98</sub> Te <sub>2</sub>	0.220	9	$3.96 \times 10^{-3}$	$3.74 \times 10^{-3}$	$4.36  imes 10^{-3}$	4.26 × 10 <sup>-3</sup>
Аѕ <sub>80</sub> Те <sub>20</sub> <i>m</i> 1c = 11.5, НД	6.89	6	1.57 × 10 <sup>-2</sup>	1.04 × 10 <sup>-2</sup>	1.16 × 10 <sup>-2</sup>	1.23 × 10 <sup>-2</sup>

Аѕ <sub>80</sub> Те <sub>20</sub> , <i>m</i> <sub>1c</sub> = 11.5, АД	6.89	6	1.96 × 10 <sup>-2</sup>	1.92 × 10 <sup>-2</sup>	3.39 × 10 <sup>-2</sup>	1.90 × 10 <sup>-2</sup>
Аѕ <sub>80</sub> Те <sub>20</sub> <i>m</i> <sub>1c</sub> = 17.5, АД	11.94	7	1.04 × 10 <sup>-2</sup>	8.59 × 10 <sup>-3</sup>	9.42 × 10 <sup>-3</sup>	$\underline{8.23\times10^{-3}}$

Отбелязваме, че сравняване на данните от четвъртата и петата колона на Табл. 5.2 показва, че показателят на затихване на слоя се изчислява по-точно от  $T_i(\lambda)$  и (5.5), а не от  $T_+(\lambda)$  и (4.8); за всичките пет характеризирания на слоя основани на ОАМОТ. Това се дължи главно на независимостта на  $T_i(\lambda)$  от възможната частична кохерентност на светлината, преминаваща през слоя вследствие на разсейването на светлината в слоя, което е обсъдено в първия параграф на Раздел 5.2.3.

### Глава 6

Създаване на оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за спектъра на отражение *R*(λ) за характеризиране на тънък слой от тънък светопропускащ слой, нанесен върху светопропускаща подложка в случая *n* > *n*<sub>s</sub> > 1

## 6.1. Формулиране на $R(\lambda)$ и неговите обвивки за неравномерен тънък слой върху светопропускаща подложка

В съответствие с третия параграф от Раздел 1.5, в настоящата Глава се разглежда характеризиране на тънък слой от ТССВСП, само от един интерференчен спектър на отражение  $R(\lambda)$  на ТССВСП измерен при квази-нормално падане на светлината. Съобразно с шестия параграф от Раздел 1.10 и коментара след Фиг. 1.19, е разгледано характеризиране, основано на метода на обвивките (МО), само за случая  $n > n_s > 1$ , който се среща най-често в практиката.

Анализ на Фиг. 1.15 показва два факта. Първо:  $R(\lambda)$  на ТССВСП съдържа екстремуми в областта на силно поглъщане в слоя, за разлика от съответния му  $T(\lambda)$ . Това дава възможност за по-точно МО характеризиране на тънкия слой в тази област от  $R(\lambda)$ , включително за по-точно пресмятане на забранената зона  $E_g$ . Второ:  $T(\lambda)+R(\lambda)\approx 1$  в областите на квази-прозрачност и силно поглъщане в ТССВСП, които са области с наличие на интерференчна картина, вследствие на закона за запазване на енергията. Това индикира, че алгоритъм на МО за  $R(\lambda)$  за характеризиране на тънкия слой от ТССВСП може да бъде разработен въз основа на съответния алгоритъм на МО за  $T(\lambda)$ .

Анализ на литературните данни, представени в Раздели 1.8 до 1.10 показва, че съществуват два основни проблема, които намаляват точността на МО за  $R(\lambda)$ . По реда на проявяването им в съответните алгоритми, първият проблем е, че се разглежда само случаят  $x_s(\lambda) = 1$ , т.е. се предполага, че подложката е прозрачна. Вторият проблем е, че в най-точния съществуващ алгоритъм на МО за  $R(\lambda)$  (AMOP) от Фиг. 1.20, се използват три субективно избрани параметри: неравномерността  $\Delta d_c$  стъпка Б2,  $N_1$  от стъпка Б5 и  $N_2$  от стъпка Б9.

С цел премахване на първия проблем, (1.54) е решено аналитично, с отчитане на  $x_{s}(\lambda)$ . Полученият резултат за спектъра на отражение  $R_{u}(\lambda)$  на ТССВСП, състоящ се от равномерен тънък слой върху светопропускаща подложка е:

$$R_{\rm u}(\lambda) = \left[a_2 - b_2 \cos(\varphi) + c_2 \sin(\varphi) + \left(\frac{P_{\rm s}^2 + Q_{\rm s}^2}{\cos^2 \Phi}\right) \frac{\left(\tau_{\rm a,f}^2 \tau_{\rm f,s}^2 \rho_{\rm s,a} x x_{\rm s}\right)^2}{a_1 - b_1 \cos(\varphi) + c_1 \sin(\varphi)}\right] \times \frac{1}{a_3 - b_3 \cos(\varphi) + c_3 \sin(\varphi)} = \left\{B_{02} + \frac{B_{03}}{B_{04}}\right\} \times B_{01} = R_{\rm u1} + R_{\rm u2}.$$
(6.1)

където:  $\varphi = 4\pi nd / \lambda$ ,  $x = \exp(-4\pi kd / \lambda)$ ,

$$\begin{split} x_{\rm S} &= \exp(-4\pi k_{\rm S} {\rm d}_{\rm S} \,/\, \lambda), \ a_{\rm I} &= 1 - (\rho_{\rm a,f} \rho_{{\rm S},{\rm a}} x x_{\rm S})^2 + \rho_{{\rm f},{\rm S}}^2 \Big[ \left( \rho_{{\rm a,f}} x \right)^2 - \left( \rho_{{\rm S},{\rm a}} x_{\rm S} \right)^2 \Big], \\ b_{\rm I} &= 2\rho_{{\rm a,f}} \rho_{{\rm f},{\rm S}} \rho_{{\rm S},{\rm a}} x \left[ \rho_{{\rm S},{\rm a}}^{-1} \cos \Delta_{\rm I} - \rho_{{\rm S},{\rm a}} x_{\rm S}^2 \cos \Delta_{\rm 2} \right], \ c_{\rm I} &= 2\rho_{{\rm a,f}} \rho_{{\rm f},{\rm S}} \rho_{{\rm S},{\rm a}} x \left[ \rho_{{\rm S},{\rm a}}^{-1} \sin \Delta_{\rm I} - \rho_{{\rm S},{\rm a}} x_{\rm S}^2 \sin \Delta_{\rm 2} \right], \\ a_{\rm 2} &= \rho_{{\rm a,f}}^2 + \left( \rho_{{\rm f},{\rm s}} x \right)^2, \ b_{\rm 2} &= 2\rho_{{\rm a,f}} \rho_{{\rm f},{\rm S}} x \cos \Delta_{\rm 2}, \ c_{\rm 2} &= -2\rho_{{\rm a,f}} \rho_{{\rm f},{\rm S}} x \sin \Delta_{\rm 2}, \\ a_{\rm 3} &= 1 + \left( \rho_{{\rm a,f}} \rho_{{\rm f},{\rm S}} x \right)^2, \ b_{\rm 3} &= 2\rho_{{\rm a,f}} \rho_{{\rm f},{\rm S}} x \cos \Delta_{\rm 1}, \ c_{\rm 3} &= 2\rho_{{\rm a,f}} \rho_{{\rm f},{\rm S}} x \sin \Delta_{\rm 1}, \\ \tau_{{\rm a,f}} &= \frac{2}{\sqrt{(n+1)^2 + k^2}}, \ \tau_{{\rm f},{\rm S}} &= 2\sqrt{\frac{n^2 + k^2}{(n+n_{\rm S})^2 + (k+k_{\rm S})^2}}, \ \tau_{{\rm s},{\rm a}} &= 2\sqrt{\frac{n_{\rm S}^2 + k_{\rm S}^2}{(n_{\rm S} + 1)^2 + k_{\rm S}^2}}, \\ \rho_{{\rm a,f}} &= \sqrt{\frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}}, \ \rho_{{\rm f},{\rm S}} &= \sqrt{\frac{(n-n_{\rm S})^2 + (k-k_{\rm S})^2}{(n+n_{\rm S})^2 + (k+k_{\rm S})^2}}, \ \rho_{{\rm s},{\rm a}} &= \sqrt{\frac{(n_{\rm S} - 1)^2 + k_{\rm S}^2}{(n_{\rm S} + 1)^2 + k_{\rm S}^2}}, \\ \Delta_{\rm 1} &= \tan^{-1}\left(\frac{2k}{n^2 + k^2 - 1}\right) + \tan^{-1}\left[\frac{2(kn_{\rm S} - k_{\rm S}n)}{(n^2 - n_{\rm S}^2 + k^2 - k_{\rm S}^2}}\right], \ \Delta_{\rm a,f} &= \tan^{-1}\left(\frac{2k}{n^2 + k^2 - 1}\right), \\ \Delta_{\rm 2} &= \tan^{-1}\left(\frac{2k}{n^2 + k^2 - 1}\right) - \tan^{-1}\left[\frac{2(kn_{\rm S} - k_{\rm S}n)}{n^2 - n_{\rm S}^2 + k^2 - k_{\rm S}^2}}\right]. \end{split}$$

35

Въз основа на (1.56), за спектъра на отражение  $R(\lambda)$  на ТССВСП, състоящ се от неравномерен тънък слой върху светопропускаща подложка, се изразява като:

$$R(\lambda) = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} R_u(\varphi) d\varphi , \text{ където } \varphi_1 = 4\pi n (\overline{d} - \Delta d) / \lambda, \varphi_2 = 4\pi n (\overline{d} + \Delta d) / \lambda,$$
(6.2)

Заместване на (6.1) в (6.2) води до следната формула за  $R(\lambda)$  на ТССВСП, състоящ се от неравномерен тънък слой върху светопропускаща подложка:

$$R(\lambda) = \frac{1}{4\theta} \int_{\varphi_{1}}^{\varphi_{2}} \frac{a_{2} - b_{2}\cos(\varphi) + c_{2}\sin(\varphi)}{a_{3} - b_{3}\cos(\varphi) + c_{3}\sin(\varphi)} d\varphi + \frac{1}{4\theta} \left(\frac{P_{s}^{2} + Q_{s}^{2}}{\cos^{2}\Phi}\right) \left(\tau_{a,f}^{2} \tau_{f,s}^{2} \rho_{s,a} \bar{x} x_{s}\right)^{2} \times \\ \times \int_{\varphi_{1}}^{\varphi_{2}} \frac{d\varphi}{\left[a_{1} - b_{1}\cos(\varphi) + c_{1}\sin(\varphi)\right] \left[a_{3} - b_{3}\cos(\varphi) + c_{3}\sin(\varphi)\right]} = R_{1}(\lambda) + R_{2}(\lambda) ,$$
(6.3)

където:  $\theta = 2\pi n \Delta d / \lambda$ ,  $\varphi_2 - \varphi_1 = 8\pi n \Delta d / \lambda = 4\theta$ .

Посредством използване на интерференчното условие за  $R(\lambda)$  (1.59), подобно на извода на уравнението за  $T_+(\lambda)$  на  $T(\lambda)$  от (4.8), се получава следният точен израз за долната обвивка  $R_-(\lambda)$  на  $R(\lambda)$ :

$$R_{-}(\lambda) = \frac{1}{\varphi_{2_{-}}-\varphi_{1_{-}}} \int_{\varphi_{1_{-}}}^{\varphi_{2_{-}}} R_{u}(\varphi_{-}) d\varphi_{-} = \frac{1}{\Delta \varphi} \int_{\varphi_{1_{-}}}^{\varphi_{2_{-}}} R_{u}(\varphi_{-}) d\varphi_{-} , \qquad (6.4)$$

където:

 $\varphi_{-} = 4\pi n(d - d) / \lambda$ ,  $\varphi_{1-} = -4\pi n\Delta d / \lambda$ ,  $\varphi_{2-} = 4\pi n\Delta d / \lambda$ ,  $\Delta \varphi = \varphi_{2-} - \varphi_{1-} = 8\pi n\Delta d / \lambda$ . Сьобразно с гореописаното и (5.6) се получава следният точен израз за горната обвивка  $R_{+}(\lambda)$  на  $R(\lambda)$ :

$$R_{+}(\lambda) = \frac{1}{\varphi_{2_{+}} - \varphi_{1_{+}}} \int_{\varphi_{1_{+}}}^{\varphi_{2_{+}}} R_{u}(\varphi_{+}) d\varphi_{+} = \frac{1}{\Delta \varphi} \int_{\varphi_{1_{+}}}^{\varphi_{2_{+}}} R_{u}(\varphi_{+}) d\varphi_{+} , \qquad (6.5)$$

където:  $\varphi_+ = 4\pi n(d - d) / \lambda + \pi$ ,  $\varphi_{1_+} = -4\pi n\Delta d / \lambda + \pi$ ,  $\varphi_{2_+} = 4\pi n\Delta d / \lambda + \pi$ .

Подобно на извода на приближението (1.61) на  $T_{+}(\lambda)$  и  $T_{-}(\lambda)$ , в което са пренебрегнати  $k(\lambda)$  и  $k_{s}(\lambda)$  в амплитудните коефициенти на пропускане и отражение (1.32), се получават следните приблизителни изрази за обвивките  $R_{+}(\lambda)$  и  $R_{-}(\lambda)$  на  $R(\lambda)$ :

$$R_{\pm}(\lambda) \cong R_{1\pm}(\lambda) + R_{2\pm}(\lambda) \approx 1 + \frac{\left(a_{2_{0}} - a_{3_{0}}\right)}{\theta\sqrt{a_{3_{0}}^{2} - b_{3_{0}}^{2}}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{a_{3_{0}}^{2} \mp b_{3_{0}}}{a_{3_{0}}^{2} \pm b_{3_{0}}}} \tan(\theta)\right] + \frac{n_{s}^{2} \left(\tau_{a,f_{0}}^{2} \tau_{f,s_{0}}^{2} x\right)^{2}}{\theta \left(1 - \rho_{f,s_{0}}^{2}\right) \left[1 - \left(\rho_{a,f_{0}}^{2} x\right)^{2}\right]} \times \left\{\frac{\left[1 - \left(\rho_{s,a_{0}}^{2} x_{s}\right)^{2}\right]}{\sqrt{a_{1_{0}}^{2} - b_{1_{0}}^{2}}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{a_{1_{0}}^{2} \mp b_{1_{0}}}{a_{1_{0}}^{2} \pm b_{1_{0}}}} \tan(\theta)\right] + \frac{1}{\sqrt{a_{3_{0}}^{2} - b_{3_{0}}^{2}}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{a_{3_{0}}^{2} \mp b_{3_{0}}}{a_{3_{0}}^{2} \pm b_{3_{0}}}} \tan(\theta)\right]\right\},$$
(6.6)

$$a_{1_{0}} = 1 - \left(\rho_{a,f_{0}}\rho_{s,a_{0}}\bar{x}x_{s}\right)^{2} + \left(\rho_{a,f_{0}}\rho_{f,s_{0}}\bar{x}\right)^{2} - \left(\rho_{f,s_{0}}\rho_{s,a_{0}}x_{s}\right)^{2}, \ b_{1_{0}} = 2\rho_{a,f_{0}}\rho_{f,s_{0}}\bar{x}\left[1 - \left(\rho_{s,a_{0}}x_{s}\right)^{2}\right], \\ a_{2_{0}} = \rho_{a,f_{0}}^{2} + \left(\rho_{f,s_{0}}\bar{x}\right)^{2}, \ b_{2_{0}} = b_{3_{0}} = 2\rho_{a,f_{0}}\rho_{f,s_{0}}\bar{x}, \ a_{3_{0}} = 1 + \left(\rho_{a,f_{0}}\rho_{f,s_{0}}\bar{x}\right)^{2}.$$

# 6.3. Представяне на оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за $R(\lambda)$

Създаден е оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за  $R(\lambda)$ , който наричаме ОАМОР, посредством използване на структурата на ОАМОТ от Фиг.4.2 и новите формули от Раздел 6.1. ОАМОР е валидиран за моделния ТССВСП, описан в първия параграф от Раздел 2.5, за слоеве съответно с  $\Delta d = 0$ nm и  $\Delta d = 30$  nm, като пресметнатите характеристики на слоя са почти неразличими от характеристиките на модела на слоя. Това и валидността на зависимостта  $T_c(\lambda) + R_c(\lambda) \approx 1$  в области на квази-прозрачност на ТССВСП потвърждават точността на формулите, изведени в Раздел 6.1. Предстои използване на ОАМОР за характеризиране на слоевете от образците А038 и А041.



Фиг. 6.4. Оптимизиран алгоритъм на метода на обвивките за R(λ) (OAMOP) за характеризиране на неравномерен или равномерен тънък слой върху светопропускаща подложка с xs(λ) ≤ 1.

### Научни приноси

**H1**, от Глава 4. Показано е, че разсейването на светлина в слоя води до свиване на интерференчната картина в спектъра на пропускане  $T(\lambda)$  на тънък слой върху светопропускаща подложка (ТССВСП),. Този ефект не е бил разглеждан в различните версии на метода на обвивките (МО) [92,95,112]. С цел отчитане на разсейването на светлина в слоя е предложено използване на 'външно заглаждане' на  $T(\lambda)$  вместо типично използваното 'вътрешно заглаждане' на  $T(\lambda)$ . **H2**, от Глави 4 и 5. Постигнато е значително подобрение на точността на пресмятане на горната и долната обвивки на  $T(\lambda)$ , основано на две нововъведения. Първо, двойното преобразуване, описано в Раздел 5.2.1 води до по-точно и опростено отчитане на влиянието на поглъщането в подложката върху двете обвивки на  $T(\lambda)$ . Второ, в Раздел 4.2 е предложено едновременно използване на итерационна процедура и на допълнителни и гранични точки за пресмятане на всяка от двете обвивки.

**H3**, от Глави 4 и 5. Представени са нови, по-точни формули за горната обвивка  $T_+(\lambda)$  (4.8) и долната обвивка  $T_-(\lambda)$  (5.6) на  $T(\lambda)$ . Тези формули включват  $k(\lambda)$  и  $k_s(\lambda)$  в амплитудните коефициенти на пропускане и отражение на границите на ТССВСП, за разлика от описаните в литературата формули за  $T_+(\lambda)$  и  $T_-(\lambda)$  [92,95,112]. Предложеното използване на по-точните формули (4.8) за  $T_+(\lambda)$  и (5.6) за  $T_-(\lambda)$  дава възможност за по-точно пресмятане на показателя на затихване  $k(\lambda)$  на слоя.

## Научно-приложни приноси

**НП1**, от Глава 2. Два тънки слоя a-Si, с много различни дебелини, от ТССВСП са характеризирани посредством четири метода, подбрани като най-подходящи за точно характеризиране на аморфен слой от ТССВСП, с използване само на  $T(\lambda)$ . Показано е, че най-точно характеризиране на всеки от двата слоя е постигнато посредством алгоритъма УАМОТ, основан на МО [92], в сравнение с алгоритмите УАГМОТ, АМТЛУ и АМКЛУ; като последните два алгоритъма са основани на дисперсионни модели. С това е изпълнена основната задача 1 на дисертацията.

**HII2**, от Глава 4. Предложен е оптимизиран алгоритъм на MO за  $T(\lambda)$  (OAMOT), основан на УАМОТ от [92]. Показано е, че характеризирането посредством ОАМОТ на двата тънки слоя a-Si от ТССВСП, споменати в HП1, е по-точно, отколкото посредством УАМОТ. С това са изпълнени целта и основната задача 2 на дисертацията.

**НПЗ**, от Глава 6. Представени са формули за спектъра на отражение  $R(\lambda)$  на тънък слой от ТССВСП и обвивките на  $R(\lambda)$ , при квази-нормално падане на светлината, в които за първи път е отчетено поглъщането на светлина в подложката. Въз основа на това е създаден и валидиран оптимизиран алгоритъм на МО за  $R(\lambda)$  (OAMOP). С това е изпълнена основната задача 4 на дисертацията.

### Приложни приноси

**П1**, от Глава 4. Два тънки слоя a-Si, изготвени посредством радиочестотно магнетронно разпрашване с различно налягане на използвания газ Ar, са характеризирани посредством ОАМОТ. Такова характеризиране включва пресмятане на показателя на пречупване  $n(\lambda)$ , показателя на затихване  $k(\lambda)$ , средната дебелина  $\overline{d}$  и неравномерността  $\Delta d$  на слоя.

**П2**, от Глава 5. Три слоя  $As_xTe_{100-x}$ , изготвени посредством плазмено подпомогнато отлагане от газова фаза, са характеризирани посредством ОАМОТ. При това са пресметнати  $n(\lambda)$ ,  $k(\lambda)$ ,  $\overline{d}$  и  $\Delta d$  на слоя. С това е изпълнена основната задача 3 на дисертацията.

## СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. R. N. Nestorov, Selection of Error Metric for Accurate Characterization of a Thin Dielectric or Semiconductor Film on Glass Substrate by the Optimizing Envelope Method, Intl. Adv. Res. J. Sci. Eng., 7 (2020) 1-11.

2. D. A. Minkov, G. V. Angelov, R. N. Nestorov, E. Marquez, E. Blanco, J. J. Ruiz-Perez, Comparative study of the accuracy of characterization of thin films a-Si on glass substrates from their interference normal incidence transmittance spectrum by the Tauc-Lorentz-Urbach, the Cody-Lorentz-Urbach, the optimized envelopes and the optimized graphical methods, Mater. Res. Express, 6 (2019) 036410: 1-15. 3. D. A. Minkov, G. V. Angelov, R. N. Nestorov, E. Marquez, Perfecting the dispersion model free characterization of a thin film on a substrate specimen from its normal incidence interference transmittance spectrum, Thin Solid Films, 706 (2020) 137984:1-11.

4. D. Minkov, G. Angelov, R. Nestorov, A. Nezhdanov, D. Usanov, M. Kudryashov, A. Mashin, Optical Characterization of  $As_xTe_{100-x}$  Films Grown by Plasma Deposition Based on the Advanced Optimizing Envelope Method, Materials 2020, 13 (2020) 2981:1-18.

## SUMMARY

## Dissertation topic: Investigation and optimized characterization of thin layers from their interference transmission and reflection spectra.

A thin layer is defined as a layer about 1 nanometer to several microns thick. Due to the deformability and fragility of the thin layers, they are usually prepared on a substrate with a thickness of about 1 mm. Accordingly, and the many applications of thin layers in different branches of optics, for accurate optical characterization of layers, a sample consisting of a thin light-transmitting layer on a light-transmitting substrate is usually used.

The aim of the present work is to determine and optimize an algorithm for the most accurate characterization of a thin semiconductor or dielectric layer of the thin layer deposited on a light-transmitting substrate, using only one transmission spectrum of a thin light-transmitting layer deposited on a light-transmitting substrate based on existing research methods.

Chapter 1 is review of approaches for optical characterization of thin layers in the spectral range from ultraviolet to near-infrared. In this chapter the approaches for optical characterization of thin layers in the spectral region from ultraviolet to near-infrared are considered, and the classification of the main spectrophotometric methods and algorithms for characterization of a thin layer of the thin layer applied on a light-transmitting substrate is made.

Chapter 2 is comparison of the accuracy of characterization of the transmission spectrum of thin layers of amorphous silicon  $\alpha$ -Si from a thin light-transmitting layer deposited on a light-transmitting substrate by means of two envelope methods and two dispersion methods. In this chapter a comparison of two dispersion models and two envelope methods is made and it is shown which of the selected methods is the most accurate.

Chapter 3 is celection of an error metric for the characterization of a thin layer of a thin light-transmitting layer applied to a light-transmitting substrate by means of an

advanced algorithm of the transmission spectrum envelope method. In this chapter, seven error metrics are considered and the best one is selected for more accurate characterization.

Chapter 4 is creation and use of an optimized algorithm of the transmission spectrum envelope method for characterization of a thin layer of a thin light-transmitting layer applied on a light-transmitting substrate. In this chapter a new optimized algorithm is created and it is used for characterization of a thin layer of a thin light-transmitting layer applied on a light-transmitting substrate.. New formulas are proposed for the transmit spectra.

Chapter 5 is Characterization of AsxTe100-x thin films from a thin light-transmitting layer applied on a light-transmitting substrate based on an optimized algorithm of the envelope method. In this chapter tree different substrates are examine with the new algorithm and it is show that the new algorithm can be used for this type of films. A new approach for creating the envelopes is proposed.

Chapter 6 is creation of an optimized algorithm of the envelope method for the reflection spectrum R ( $\lambda$ ) for characterization of a thin layer of a thin light-transmitting layer applied on a light-transmitting substrate in the case  $n > n_s > 1$ . In this chapter new algorithm is created and new formulas for the reflected spectra are proposed.