

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## Simulation of optical system including nanometric absorber layer and calculation reflection, transmission and absorption

### Abstract

In this paper, the simulation of a optical system including absorber layers is investigated. To do this, a computer program has been written in which including reflection, transmission and absorption for S and P polarizations are calculated for different incidence angles in a wide spectrum. The basis of these calculations is matrix method. The output results were compared with two analogous Business software Macleod and Film Wizard and good agreement was observed between them.

**Keywords:** Thin film, Absorber Layer, Software, Matrix method.

## شبیه‌سازی سامانه‌ی اپتیکی شامل لایه‌ی جاذب نانومتری و محاسبه توان‌های بازتاب، تراگسیل و جذب

### چکیده:

در این پژوهش، شبیه‌سازی یک سامانه‌ی اپتیکی شامل لایه‌ی جاذب مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای این شبیه‌سازی برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده‌است که با گرفتن اطلاعات توسط کاربر، توان‌های بازتاب، تراگسیل و جذب را برای قطبش  $S$  و  $P$  را برای محدوده‌ی طول موج نور فرودی، محدوده‌ی زاویه‌ی تابش فرودی و یا برای یک طول موج با زاویه‌ی تابش مورد نظر محاسبه می‌کند. اساس کار این محاسبات، روش ماتریسی می‌باشد. خروجی نرم‌افزار طراحی شده را با نتایج حاصل از دو نرم‌افزار مشابه مکلهود<sup>۱</sup> و فیلم ویزارد<sup>۲</sup> مقایسه شده‌است و توافق خوبی بین نتایج آنها مشاهده شده‌است.

واژه‌های کلیدی: لایه نازک، لایه جاذب، نرم‌افزار، روش ماتریسی.

<sup>1</sup> Macleod

<sup>2</sup> Film Wizard

#### مقدمه:

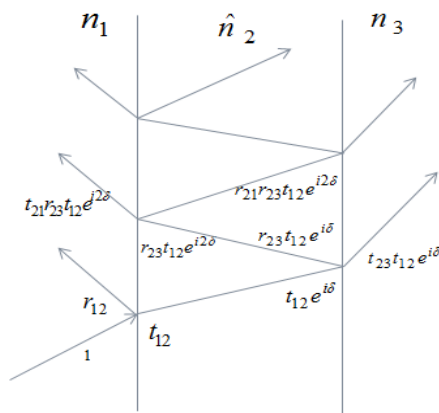
منظور از لایه نازک، بُره‌ای از مواد است که ضخامت آن خیلی کوچکتر از دو بعد دیگر است. از پوشش‌های تک لایه‌ای یا چندلایه‌ای اپتیکی برای بدست آوردن ماده‌ای با ویژگی‌های نوری مورد نظر استفاده می‌شود. لایه‌های نازک در صنایع الکترونیک، در ساخت الکتروادهای شفاف قطعات اپتوالکترونیک، سلول‌های خورشیدی، صفحات نمایش مایع ساخت انواع دیودها، آشکارسازها و لیزرهای نیمه رسانا استفاده می‌شود [۱]. امروزه با ترکیب لایه‌ها با ضخامت و ضریب شکست مناسب روی سطوح شیشه، پوشش‌هایی ایجاد می‌کنند که می‌توانند بازتاب، تراگیل و جذب سامانه را افزایش یا کاهش دهند. از لایه نازک جاذب برای کاهش شدت نور نیز استفاده می‌شود [۲]. برای این لایه‌ها کاربردهای پزشکی و بهداشتی زیادی وجود دارد. برای مثال پوشش‌های نانوکامپوزیتی در صنایع بسته بندی، سبب نازک‌تر شدن بسته بندی، سبکی و طولانی‌تر شدن عمر مواد غذایی می‌شوند، که البته میزان عبور نور از آنها نیز باید کنترل شود.

نور فرودی در مرز، به دو بخش نور بازتابی و عبوری تقسیم می‌شود. با توجه به معادلات ماکسول و شرایط مرزی، برای هر مرز می‌توان روابط فرنل را برای امواج بازتابی و عبوری بدست آورد. برای امواج همدوس، با جمع کردن دامنه‌های امواج بازتابی به محیط فرودی و امواج عبور یافته به محیط بستره می‌توان، توان‌های بازتاب و تراگیل را برای سامانه‌ی اپتیکی چند لایه‌ای حساب کرد. همچنین از قانون اسنل برای تعیین کردن زاویه‌ی تابش در هر لایه استفاده می‌شود. در انجام محاسبات، از روش ماتریسی استفاده می‌شود. پس از طراحی پوشش چندلایه‌ای، که شامل محاسبه‌ی ثابت‌های اپتیکی، تعیین طول موج نور فرودی و زاویه‌ی تابش، تعیین ضخامت هر یک از لایه‌ها است، با استفاده از روش ماتریسی می‌توان، توان‌های بازتاب، تراگیل و جذب‌شده، پوشش تک لایه‌ای یا چند لایه‌ای را بدست آورد. از مزیت‌های این روش ماتریسی، انجام سریع تر و آسان تر محاسبات می‌باشد.

یکی از مشکلات مهم در زمینه‌ی محاسبات و طراحی لایه‌های نازک وجود لایه‌های رسانا در بین مجموعه لایه‌ها می‌باشد. روابط مربوط به خواص اپتیکی رساناها به دلیل ضریب شکست مختلطی که دارند از مواد دی‌الکتریک پیچیده‌تر است و در صورتی که در طراحی لایه‌های نازک، از مواد جاذب استفاده شود، محاسبه‌ی توان‌های بازتاب، تراگیل و جذب را مشکل می‌سازد. از طرفی، لایه‌نشانی فرآیندی طولانی و پرهزینه است، بنابراین داشتن یک نرم افزار شبیه‌سازی که بتواند طراحی مناسبی از نوع لایه‌ها با ضخامت مناسب ارائه کند، بسیار مفید و پراهمیت می‌باشد. لازم به ذکر است که در تمام این پژوهش، نور فرودی همدوس فرض شده است.

#### بررسی سامانه‌ی اپتیکی چند لایه‌ای شامل لایه رسانا :

در ابتدا، تک لایه‌ی جاذب که بین دو محیط دی‌الکتریک قرار گرفته است بررسی می‌کنیم و سپس روابط را برای سیستم چند لایه‌ای تعمیم می‌دهیم. با استفاده از روابط فرنل می‌توان دامنه‌ی امواج بازتابی و عبوری را بدست آورد. برای تک لایه‌ی که بین دو محیط دی‌الکتریک قرار گرفته است (شکل ۱)، ضرایب بازتاب، تراگیل و جذب کل این سامانه اپتیکی از روابط زیر [۳]، بدست می‌آید:



$$r = r_{12} + t_{12} x t_{21} \quad ; \quad x = \frac{e^{i2\delta} r_{23}}{1 - e^{i2\delta} r_{23} r_{21}} \quad (1)$$

$$t = t_{12} y t_{23} \quad ; \quad y = \frac{e^{i\delta}}{1 - e^{i2\delta} r_{23} r_{21}} \quad (2)$$

شکل ۱- بازتاب و انتقال چندگانه‌ی یک پرتوی فرودی با دامنه  
واحد در سه محیط فرودی (۱)، لایه (۲) و بستره (۳)

که  $\delta$  اختلاف فاز ایجاد شده در پرتو در اثر راه نوری طی شده در یک رفت و برگشت در محیط است:

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \hat{n}_2 \cos \hat{\theta}_2 \quad ; \quad \hat{n}_2 = n_2 + i k_2 \quad (3)$$

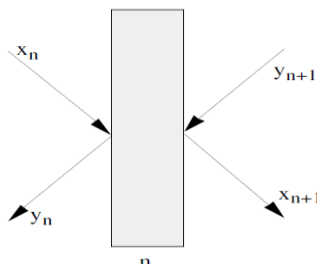
توان‌های بازتاب، تراگسیل و جذب شده به سادگی از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$Tp = |t|^2 \frac{n_1 \cos \theta_3}{n_3 \cos \theta_1} \quad ; \quad Ts = |t|^2 \frac{n_3 \cos \theta_3}{n_1 \cos \theta_1} \quad (4)$$

$$R = |r|^2 \quad ; \quad A = 1 - R - T \quad (5)$$

در رابطه‌ی (۴) اندیس‌های  $S$  و  $P$  به ترتیب مربوط به نور با قطبش  $S$  و  $P$  می‌باشند. در صورتی که چند لایه بین محیط فرودی و بستره قرار گرفته باشد، باید روابط بالا را برای هریک از مرزها جداگانه نوشت، که در این صورت حجم و زمان انجام محاسبات زیاد خواهد شد. با استفاده از روش ماتریسی، که در زیر آمده است، انجام محاسبات ساده‌تر، سریع‌تر و با دقت بالا صورت می‌گیرد.

فرض می‌کنیم که  $N$  لایه بین دو محیط فرودی و بستره قرار گرفته باشند. که در این صورت  $N+2$  محیط خواهیم داشت. با توجه به شکل (۲)، در سطح سمت چپ لایه‌ی  $n$  ام، دو موج فرودی و بازتابی داریم که دامنه‌های آنها با نمادهای  $x_n$  و  $y_n$  نمایش داده می‌شود و دو موج فرودی و بازتابی در سطح سمت راست این لایه داریم که دامنه‌ی آنها با نمادهای  $x_{n+1}$  و  $y_{n+1}$  نمایش داده می‌شود. دامنه‌ی امواج دوطرف لایه را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر به هم ربط داد:



شکل ۲- امواج بازتابی و عبوری در دو سمت سطح لایه  $n$  ام

دامنه‌ی امواج دوطرف لایه را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر به هم ربط داد:

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} = \tilde{M}_n \begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{pmatrix} ; \quad \tilde{M}_n = \frac{1}{t_{n-1,n}} \begin{pmatrix} 1 & r_{n-1,n} \\ r_{n-1,n} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\delta_n} & 0 \\ 0 & e^{+i\delta_n} \end{pmatrix} = \frac{1}{t_{n-1,n}} \begin{pmatrix} e^{-i\delta_n} & r_{n-1,n}e^{+i\delta_n} \\ r_{n-1,n}e^{-i\delta_n} & e^{+i\delta_n} \end{pmatrix} \quad (6)$$

در رابطه‌ی بالا،  $\tilde{M}_n$  ماتریس مربوط به لایه‌ی  $n$  ام می‌باشد. پس برای سامانه‌ی شامل  $N$  لایه خواهیم داشت:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \tilde{M}_1 \cdot \tilde{M}_2 \cdot \tilde{M}_3 \dots \tilde{M}_n \dots \tilde{M}_N \cdot \frac{1}{t_{N,N+1}} \begin{pmatrix} 1 & r_{N,N+1} \\ r_{N,N+1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{N+1} \\ y_{N+1} \end{pmatrix} = \tilde{M} \begin{pmatrix} x_{N+1} \\ y_{N+1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

در این رابطه،  $\frac{1}{t_{N,N+1}} \begin{pmatrix} 1 & r_{N,N+1} \\ r_{N,N+1} & 1 \end{pmatrix}$  مربوط به لایه‌ی  $N+1$  ام می‌باشد.

برای محاسبه‌ی ضرایب بازتاب و تراگسیل به کمک رابطه‌ی (۶) باید توجه داشت که در محیط  $N+1$  نور فقط از سمت چپ به راست حرکت می‌کند و نور فرودی به آن سطح لایه وجود ندارد و در نتیجه  $y_{n+1} = 0$  و بنابراین خواهیم داشت:

$$x_1 = M_{11}x_{N+1} + M_{12}y_{N+1} = M_{11}x_{N+1} ; \quad y_1 = M_{21}x_{N+1} + M_{22}y_{N+1} = M_{21}x_{N+1} \quad (8)$$

$$t = \frac{x_{N+1}}{x_1} = \frac{1}{M_{11}} ; \quad r = \frac{y_1}{x_1} = \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad (9)$$

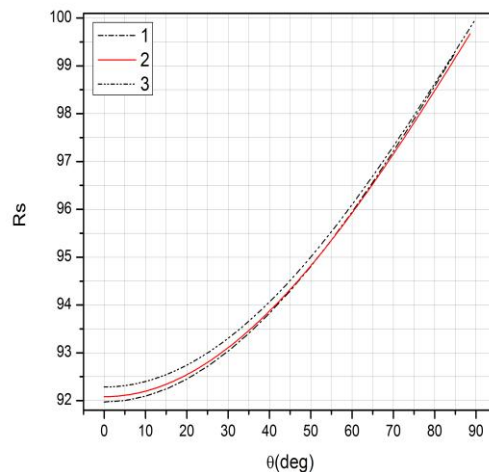
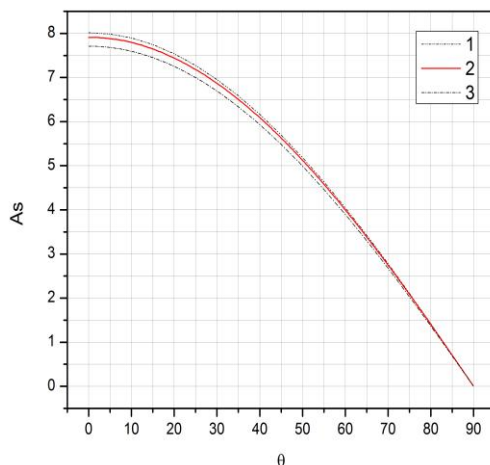
و با توجه به روابط (۴) تا (۷) می‌توان مقدار توان بازتاب، توان تراگسیل و جذب شده را بدست آورد.



## نتیجه‌گیری :

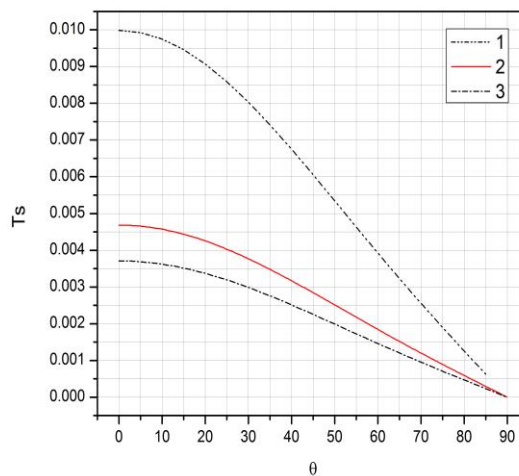
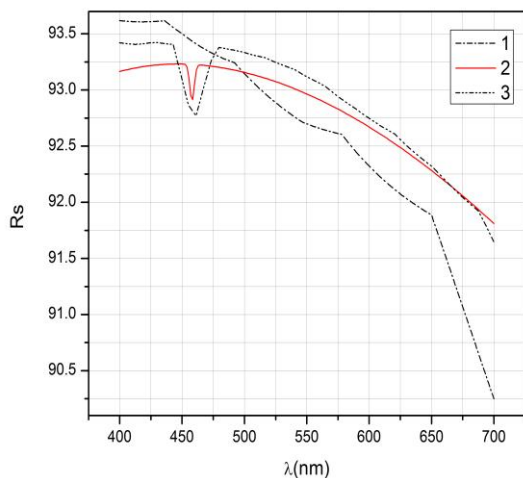
با فرض اینکه محیط فرودی هوا، لایه‌ی جاذب آلومینیوم با ضخامت  $62.5 \text{ (nm)}$  و بستره  $BK7$  باشد، با مقایسه خروجی سه نرم‌افزار طراحی شده برای سامانه‌ی اپتیکی شامل لایه‌ی جاذب، مکلئود و فیلم ویزارد توافق خوب، بین نتایج آنها مشاهده می‌شود. شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) به ترتیب، منحنی‌های بازتاب، جذب شده و عبوری را برحسب محدوده‌ی زاویه‌ی تابش نور فرودی با قطبش  $S$  و طول موج  $510 \text{ (nm)}$  نشان می‌دهند که در هر سه شکل منحنی مربوط به نرم‌افزار طراحی شده بین منحنی دو نرم‌افزار نام‌برده شده قرار دارد. شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) به ترتیب، منحنی‌های بازتاب، جذب شده و عبوری را برحسب محدوده‌ی طول موج نور فرودی با قطبش  $S$  و زاویه‌ی تابش  $30^\circ$  درجه نشان می‌دهند که در شکل‌های (۶) و (۷) تقریباً از طول موج‌های  $450 \text{ (nm)}$  تا  $475 \text{ (nm)}$  و از  $500 \text{ (nm)}$  تا  $700 \text{ (nm)}$  و در شکل (۸) تقریباً از طول موج  $400 \text{ (nm)}$  تا  $450 \text{ (nm)}$  و از  $475 \text{ (nm)}$  تا  $700 \text{ (nm)}$  منحنی مربوط به نرم‌افزار طراحی شده در بین منحنی‌های مربوط به دو نرم‌افزار مشابه دیگر قرار دارد. در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) منحنی‌های مربوط به نرم‌افزار مکلئود دارای شکستگی می‌باشند، که این نشان می‌دهد در محاسبه‌ی ثابت‌های اپتیکی، یک تابع را برای تمام محدوده طول موجی در نظر نگرفته‌اند بلکه تمام محدوده‌ی طول موجی را به چند بازه تفکیک کرده و برای هرکدام از این بازه‌ها توابع مربوط به ثابت‌های اپتیکی را بدست آورده‌اند و سپس حاصل جمع آنها را برای تمام محدوده‌ی طول موجی در نظر گرفته‌اند، در حالی که ما یک تابع را برای ثابت‌های اپتیکی در تمام محدوده‌ی طول موجی بدست آورده‌ایم و علت اینکه در شکل‌های (۶) تا (۸) در بخشی از محدوده‌ی طول موجی که منحنی مربوط به نرم‌افزار طراحی شده در بین دو منحنی دیگر قرار نگرفته‌است می‌تواند به تفاوت در نحوه‌ی محاسبه‌ی ثابت‌های اپتیکی در سه نرم‌افزار مربوط شود. برای قطبش  $P$  نیز همین مقایسه صورت گرفته و توافق خوب بین نتایج سه نرم‌افزار مشاهده شد.

در شکل‌های زیر، منحنی (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب مربوط به نرم‌افزارهای مکلئود، طراحی شده و فیلم ویزارد می‌باشند. خروجی سه نرم‌افزار که شامل توان‌های بازتاب، عبوری و جذب شده می‌باشد در این شکل‌ها، نشان داده شده‌است.



شکل ۴- منحنی توان جذب شده برحسب محدوده‌ی زاویه‌ی تابش  
نور فرودی با طول موج  $510 (nm)$

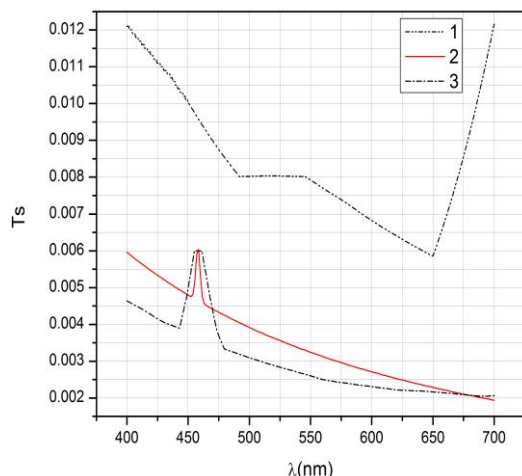
شکل ۳- منحنی توان بازتاب برحسب محدوده‌ی زاویه‌ی تابش  
نور فرودی با طول موج  $510 (nm)$



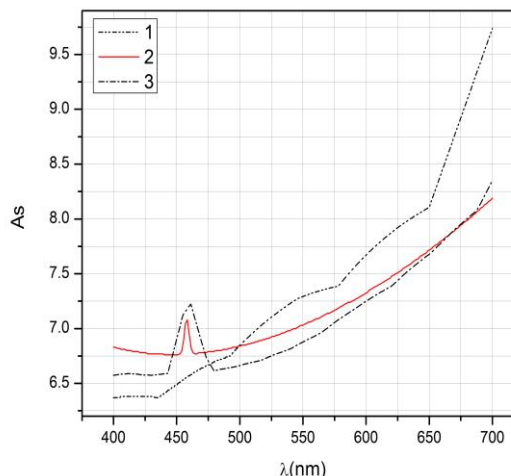
شکل ۶- منحنی توان بازتاب برحسب محدوده‌ی طول موج  
نور فرودی با زاویه‌ی تابش  $30^\circ$  درجه

شکل ۵- منحنی توان عبوری برحسب محدوده‌ی زاویه‌ی تابش  
نور فرودی با طول موج  $510 (nm)$





شکل ۸- منحنی توان عبوری برحسب محدوده‌ی طول موج نور  
فروودی با زاویه‌ی تابش ۳۰ درجه



شکل ۷- منحنی توان جذب شده برحسب محدوده‌ی طول موج  
نور فروودی با زاویه‌ی تابش ۳۰ درجه

در جدول (۱)، خطای نسبی مشاهده شده در شکل‌های (۳) تا (۵)، بین منحنی‌های مربوط به نرم‌افزار طراحی شده و دو نرم‌افزار تجاری مشابه مکتلود و فیلم ویزارد، برای قطبش  $S$  و قطبش  $P$  در یک طول موج خاص درج شده است و در جدول (۲)، خطای نسبی مشاهده شده در شکل‌های (۶) تا (۸)، بین منحنی‌های مربوط به نرم‌افزار طراحی شده و دو نرم‌افزار تجاری مشابه مکتلود و فیلم ویزارد، برای قطبش  $S$  و قطبش  $P$  در یک زاویه‌ی خاص درج شده است. با توجه به دو جدول زیر، میزان خطای نسبی نرم‌افزار طراحی شده با نرم‌افزار فیلم ویزارد نسبت به نرم‌افزار مکتلود کمتر است و علت آن این است که در محاسباتی ثابت‌های اپتیکی از داده‌های مربوط به نرم‌افزار فیلم ویزارد استفاده کرده‌ایم.

جدول ۱- درصد خطای نسبی منحنی‌های رسم شده مربوط به نرم‌افزار طراحی شده نسبت به دو نرم‌افزار مشابه برحسب محدوده‌ی طول موج فروودی

نرم افزار	Rs	Rp	Ts	Tp	As	Ap
مکتلود	۰/۱۹ $\lambda=550 (nm)$	۲/۴ $\lambda=500 (nm)$	۳۴/۳ $\lambda=500 (nm)$	۲۵/۵ $\lambda=550 (nm)$	۷/۰ $\lambda=400 (nm)$	۹/۴ $\lambda=550 (nm)$
فیلم ویزارد	۰/۱۴ $\lambda=550 (nm)$	۰/۳۷ $\lambda=400 (nm)$	۱۲/۰ $\lambda=500 (nm)$	۱۰/۶ $\lambda=550 (nm)$	۴/۰ $\lambda=400 (nm)$	۵/۳ $\lambda=550 (nm)$

جدول ۲- درصد خطای نسبی منحنی‌های رسم شده مربوط به نرم افزار طراحی شده نسبت به دو نرم افزار مشابه برحسب محدوده‌ی زاویه‌ی تابش فرودی

نرم افزار	Rs	Rp	Ts	Tp	As	Ap
مک‌نلود	۰/۱۲ $\theta=10 (deg)$	۰/۱۴ $\theta=10 (deg)$	۷۰/۲ $\theta=40 (deg)$	۷۲/۳ $\theta=20 (deg)$	۱/۲ $\theta=5 (deg)$	۲/۴ $\theta=5 (deg)$
فیلم ویزارد	۰/۲۲ $\theta=10 (deg)$	۰/۲ $\theta=10 (deg)$	۲۲/۱ $\theta=40 (deg)$	۲۳/۸ $\theta=20 (deg)$	۲/۶ $\theta=5 (deg)$	۱/۶ $\theta=5 (deg)$

مراجع:

Thelen, A, 1988. "Design of optical interference coating", Mc-Graw.

Kavokin, A and Malpuech, G, 2003. "Thin Films and Nanostructures", Elsevier.

Sernelius, BoE, 2001, "Surface Modes in Physic", Berlin, Wiley-VCH.