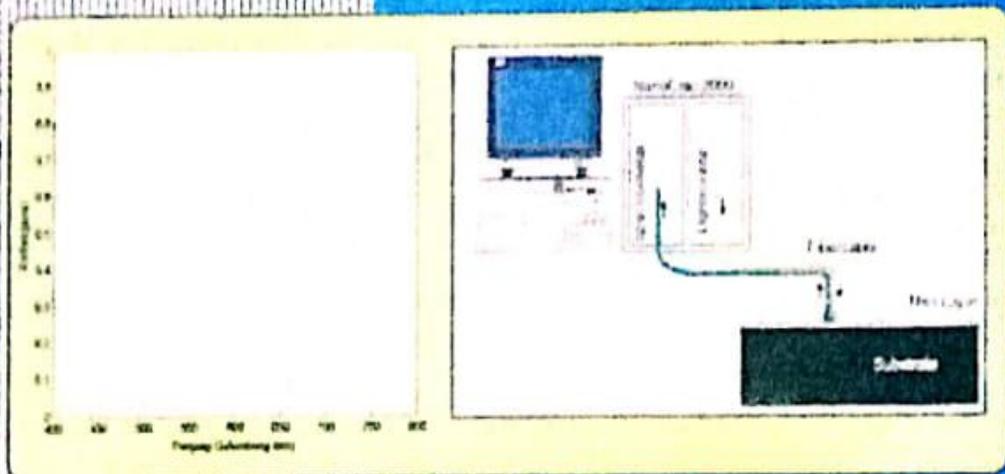


DR. DONNY ROYKE WENAS, MSI

# KARAKTERISASI INDEKS BIAS DAN KETEBALAN FILM



EDITOR:

PROF. DR. ROLES N. PALILINGAN, MS

PENERBIT

KELOMPOK KONSENTRASI FISIKA LINGKUNGAN  
JURUSAN FISIKA FMIPA UNIMA

ISBN: 978-602-9200-02-7



# KARAKTERISASI INDEKS BIAS DAN KETEBALAN FILM

Penulis : DR. Royke Wenas, MSi  
Editor : Prof. DR. Rolles N. Palilingan, MS

Hak Cipta ©2011 pada penulis, dilarang keras mengutip, menjiplak, memfotokopi baik sebagian atau keseluruhan dari isi buku ini tanpa mendapat izin tertulis dari pengarang atau penerbit.

Diterbitkan pertama kali oleh Penerbit Kelompok Konsentrasi Fisika Lingkungan Jurusan Fisika FMIPA UNIMA, Tondano 2011.



ISBN 978-602-9200-02-7



9 786029 200027

Dicetak oleh Kelompok Konsentrasi Fisika Lingkungan  
Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Manado.

**DR. DONNY ROYKE WENAS, MSi**

**KARAKTERISASI INDEKS  
BIAS DAN KETEBALAN FILM**

**PENERBIT KELOMPOK KONSENTRASI FISIKA LINGKUNGAN  
JURUSAN FISIKA FMIPA UNIMA**



# **KARAKTERISASI INDEKS BIAS DAN KETEBALAN FILM**



**DR. DONNY ROYKE WENAS, MSi**

**KARAKTERISASI INDEKS BIAS  
DAN KETEBALAN FILM**

**PENERBIT KONSENTRASI FISIKA LINGKUNGAN  
JURUSAN FISIKA FMIPA UNIMA**

## **KARAKTERISASI INDEKS BIAS DAN KETEBALAN FILM**

**Penulis: DR. DONNY ROYKE WENAS, M.Si.**

**Editor : PROF. DR. ROLLES N. PALILINGAN,MS**

Hak Cipta (c)2011 pada penulis, dilarang keras mengutip, menjiplak, memfotokopi baik sebagian atau keseluruhan dari isi buku ini tanpa mendapat izin tertulis dari pengarang atau penerbit.

Diterbitkan pertama kali oleh Penerbit Kelompok Konsentrasi Fisika Lingkungan Jurusan Fisika FMIPA UNIMA, Tondano 2011.

Dicetak oleh Kelompok Konsentrasi Fisika Lingkungan  
Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Manado.

## **PENGANTAR**

Indeks Bias dan Ketebalan Film menarik untuk dikaji karena dengan mengetahui indeks bias dan ketebalan suatu struktur multilapis maka sifat optik dari struktur tersebut bisa diketahui sehingga bermanfaat bagi aplikasi teknologi divais fotonik.

Pentingnya buku ini ditulis karena dengan diketahuinya indeks bias dan ketebalan suatu struktur multilapis dalam orde submikron dan nanometer, dapat dipahami fenomena fisis yang tidak umum, yang tidak teramati dalam skala makroskopik.

Penulisan buku ketiga ini merupakan hasil motivasi dari penulisan buku pertama, yang terbit tahun 2009 dengan judul: Sifat Optik Film Tipis Molekul DR-1, dan buku kedua yang terbit tahun 2010 dengan judul: Orbital Molekul.

Ucapan terima kasih disampaikan pada editor yang sudah memberikan masukan dan mengedit buku ini. Juga kepada semua pihak yang sudah membantu sehingga penulisan buku ini bisa terselesaikan dengan baik.

Semoga buku ini bisa bermanfaat bagi para pembaca.

Tondano, Maret 2011

Penulis



## GLOSARI

Singkatan	Nama/Arti
Absorpsi	Penyerapan
<i>A</i>	Koefisien Sellmeier
Confinement	Pemerangkapan
DR-1	Disperse Red-1
<i>D</i>	Perpindahan listrik
<i>d</i>	Ketebalan lapisan/film
Dry processing	Proses kering
<b>E</b>	Medan listrik
$E_{\text{lokal}(j)}$	Medan lokal pada atom ke- <i>j</i>
EFA-PVD	Electric Field Assisted Physical Vapor Deposition
EM	Elektromagnetik
FB	Forouhi-Bloomer
Flow chart	Diagram alir
Growth	Penumbuhan
<b>H</b>	Kuat medan magnet
ITO	Indium Tin Oxide
<b>J</b>	Rapat arus listrik
$\ell$	Jarak tempuh rata-rata elektronik
<i>m</i>	Massa dari elektron
Magnetic stirrer	Pengaduk magnetik
Multilapis	Lapisan jamak
$N_j$	Konsentrasi atom ke- <i>j</i>
nm	Nanometer
NMP	N-Methyl Pyrolidinone
Normal incidence	Insidensi normal
Optical properties	Sifat optik
<b>P</b>	Polarisasi
<i>p</i>	Momen dipol
Powder	Bubuk
PV	Nilai prinsipal dari integral Cauchy
<i>r</i>	Koefisien refleksi
<i>R</i>	Reflektansi
SEM	Scanning Electron Microscopic
<i>t</i>	Koefisien transmisi

$T$	Transmitansi
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic
Wet processing	Proses basah
Zero field	Tanpa medan listrik luar

## LAMBANG

$\alpha$	Koefisien absorpsi
$\infty$	Sebanding
$-e$	Muatan elektron
$E_0$	Amplitudo medan listrik gelombang cahaya
$\epsilon$	Tetapan dielektrik
$\tilde{\epsilon}_r$	Tetapan dielektrik relatif kompleks
$\phi$	Beda fase
$\gamma$	Koefisien damping
$h$	Konstanta Planck
$\hbar$	$h/2\pi$
$I$	Intensitas gelombang elektromagnetik
$I_0$	Intensitas awal
$\kappa$	Koefisien atenuasi
$\chi$	Suseptibilitas (kerentanan)
$\lambda$	Panjang gelombang
$\lambda_0$	Panjang gelombang mula-mula
$\mu$	Permeabilitas bahan
$\tilde{n}$	Indeks bias kompleks
$n$	Indeks bias
$\omega$	Frekuensi sudut
$\omega_0$	Frekuensi karakteristik
$\omega_p$	Frekuensi plasma
$\tau$	Waktu relaksasi
$\theta_1$	Sudut datang
$\theta_2$	Sudut bias
$x$	Jarak

## **DAFTAR ISI**

PENGANTAR	v
GLOSARI	vii
DAFTAR ISI	ix
BAB I	
PENDAHULUAN	1
BAB II	
INTERAKSI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK DAN MATERI	5
2.1. Hubungan antara Koefisien Optik Kompleks dan Absorpsi	5
2.2. Dispersi Indeks Bias	12
2.3. Hubungan antara Tetapan Dielektrik Polarizabilitas	20
2.4. Hubungan antara Konstanta Dielektrik dan Absorpsi Dalam Bahan Konduktif	23
BAB III	
PENGUKURAN INDEKS BIAS DAN KETEBALAN FILM	29
BAB IV	
HASIL KARAKTERISASI INDEKS BIAS DAN KETEBALAN FILM	45
4.1. Hasil Eksperimen Deposisi Film dengan Metode EFA-PVD	45
4.2. Karakterisasi Sifat Optik	50
4.3. Program Matlab Untuk Reflektansi Multilapis	56
4.4. Hasil Fiting Indeks Bias Film DR-1	58

DAFTAR PUSTAKA

71

INDEKS

73

# BAB 1

## PENDAHULUAN

Kajian tentang rekayasa struktur tidak hanya penting di bidang keteknikan, tetapi juga dalam bidang fisika dan kimia. Lewat rekayasa struktur dalam orde sub-mikron dan nanometer, dapat diamati fenomena fisis yang tidak umum, yang tidak teramati dalam skala makroskopik. Rekayasa struktur yang paling sederhana adalah struktur lapisan jamak. Dalam struktur semacam ini, bisa diamati efek interfisial, persambungan, dan pemerangkapan (*confinement*). Dalam struktur semacam itu, kita dapat mengontrol densitas dan transpor dari pembawa muatan listrik (elektron atau *hole* dalam divais semikonduktor) atau spin dalam bahan magnetik dan divais spintronik. Selain itu, efek tersebut dapat juga diterapkan pada foton (cahaya), seperti dalam pandu gelombang, *surface plasmon* dan *quantum well*. Ada beberapa macam cara untuk membuat sistem lapisan jamak, dengan metode *wet processing* (proses basah) atau *dry processing* (proses kering). Strategi pembuatan struktur dapat berupa proses *etching* atau sebaliknya lewat proses penumbuhan (*growth*), atau kombinasinya. Untuk mengevaluasi kualitas dari lapisan tersebut juga ada beberapa

macam cara, seperti elipsometri dan prisma kopling. Elipsometri adalah cara yang paling banyak digunakan tetapi membutuhkan kajian yang panjang dan ketebalan lapisan yang tipis dan bersifat lapisan tunggal. Pemakaian prisma kopling sangat terbatas karena ada persyaratan terjadinya pemanduan gelombang cahaya di dalam lapisan. Metode mikroskopik lain, misalnya TEM, dapat pula digunakan tetapi membutuhkan peralatan yang cukup mahal.

Reflektometer dapat diterapkan untuk mengevaluasi kualitas suatu lapisan jika informasi yang diinginkan hanya tentang indeks bias dan ketebalan lapisan. Reflektometer didasari pada fenomena superposisi gelombang cahaya akibat pemantulan jamak oleh suatu struktur lapisan tipis.

Teknik pengukuran reflektometri dapat digunakan untuk penentuan indeks bias dan ketebalan film. Reflektometer bekerja berdasarkan efek interferensi antara berkas yang dipantulkan secara berulang oleh permukaan antara lapisan yang berbeda.

Sistem reflektometer yang disebut sebagai NanoCalc-2000 memiliki rentang pengukuran ketebalan lapisan berkisar dari 10 nm sampai 250  $\mu\text{m}$ . Dengan bantuan simulasi komputer, baik indeks bias maupun ketebalan dapat ditentukan

secara bersamaan. Analisis data dapat dilakukan dengan software yang telah disediakan pada NanoCalc-2000.



# BAB II

## INTERAKSI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK DAN MATERI

### 2.1. Hubungan antara Koefisien Optik Kompleks dan Absorpsi

Koefisien optik  $\tilde{n}$  dari suatu bahan memiliki bentuk umum

$$\tilde{n} = n + i\kappa \quad (2.1)$$

dimana suku real dari  $\tilde{n}$  ( $\text{Re}(\tilde{n}) = n$ ) adalah indeks bias, sedangkan suku imajiner ( $\text{Im}(\tilde{n}) = \kappa$ ) adalah koefisien atenuasi. Dengan menggunakan indeks bias kompleks  $\tilde{n}$  ini, fungsi dari suatu gelombang elektromagnetik (EM) yang merambat dalam bahan tersebut dapat dituliskan sebagai:

$$E(x, t) = E_0 e^{i\left(\frac{2\pi\tilde{n}}{\lambda_0}x - \omega t\right)} \quad (2.2)$$

Persamaan (2.2) dapat ditulis dalam bentuk

$$E(x, t) = E_0 e^{-\frac{2\pi\kappa}{\lambda_0}x} e^{i\left(\frac{2\pi n}{\lambda_0}x - \omega t\right)} \quad (2.3)$$

dan intensitasnya adalah

$$I = |E(x, t)|^2 = |E_0|^2 e^{-\frac{4\pi\kappa}{\lambda_0}x} = I_0 e^{-\frac{4\pi\kappa}{\lambda_0}x} \quad (2.4)$$

Dari persamaan (2.4) di atas, jelaslah bahwa suku imajiner ik menyebabkan amplitudo dan intensitas dari gelombang elektromagnetik tadi mengecil secara eksponensial terhadap jarak  $x$ , yakni mengalami atenuasi dalam arah perambatannya. Oleh karena itu, jika bahan cukup tebal maka gelombang elektromagnetik tidak dapat menembus bahan. Dalam hal ini, bahan tersebut tidak bersifat transparan untuk gelombang elektromagnetik tersebut.

Jika suatu bahan memiliki  $\kappa=0$  atau  $\tilde{n}=n$ , fungsi gelombang elektromagnetik di dalam bahan adalah:

$$E(x, t) = E_0 e^{i\left(\frac{2\pi n}{\lambda_0}x - \omega t\right)} \quad (2.5)$$

dan intensitasnya menjadi

$$I = |\mathbf{E}(x, t)|^2 = |\mathbf{E}_0|^2 = I_0 \quad (2.6)$$

Dalam hal seperti ini, bahan bersifat transparan dan gelombang elektromagnetik dapat merambat tanpa mengalami atenuasi.

Jika gelombang elektromagnetik merambat masuk ke dalam medium sejauh  $dx$ , laju perubahan intensitasnya adalah

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I \quad (2.7)$$

dengan  $\alpha$  adalah koefisien absorpsi. Melalui pengintegrasian, kita peroleh bahwa intensitas pada jarak  $x$  adalah

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.8)$$

dengan  $I_0$  adalah intensitas awal, yakni intensitas menurun secara eksponensial terhadap jarak  $x$ . Perbandingan dengan persamaan sebelumnya menghasilkan suatu hubungan antara koefisien absorpsi dan koefisien atenuasi

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} \kappa = \frac{2\omega}{c} \kappa \quad (2.9)$$

Tetapan dielektrik secara umum juga dituliskan sebagai fungsi kompleks

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (2.10)$$

Karena indeks bias  $n = (\tilde{\varepsilon}\mu)^{1/2}$ , untuk bahan non-magnetik ( $\mu=0$ ), maka indeks bias  $n$  berkaitan dengan tetapan dielektrik  $\varepsilon$  menurut hubungan

$$\varepsilon_1 = n^2 - \kappa^2 \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_2 = 2n\kappa \quad (2.12)$$

$$n^2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1 \right] \quad (2.13)$$

$$\kappa^2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1 \right] \quad (2.14)$$

dengan  $n(\omega)$  dan  $\kappa(\omega)$  berkaitan satu dengan lainnya yang ditentukan oleh hubungan Kramers-Kronig

$$n(\omega) - 1 = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega' \kappa(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.15)$$

dan

$$\kappa(\omega) = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{n(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.16)$$

dengan PV adalah nilai prinsipal dari integral Cauchy yang mengikutinya. Dari hubungan tersebut,  $n$  dapat dicari jika  $\kappa$  diketahui, atau sebaliknya. Demikian juga untuk  $\varepsilon_1(\omega)$  dan  $\varepsilon_2(\omega)$ ,  $\varepsilon_1(\omega)$  dapat dihitung jika  $\varepsilon_2(\omega)$  diketahui, atau sebaliknya, dari persamaan berikut

$$\varepsilon_1(\omega) - 1 = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega' \varepsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.17)$$

dan

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varepsilon_1(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.18)$$

Untuk bahan yang tidak transparan, pengukuran koefisien absorpsi tidak bisa dilakukan secara langsung. Untuk

itu, spektrum absorpsi diperoleh secara tidak langsung lewat pengukuran spektrum refleksi. Jika gelombang elektromagnetik merambat masuk dari medium I dengan indeks bias  $n_1$  ke medium II dengan indeks bias  $n_2$  dengan arah tegak lurus bidang batas medium, maka perbandingan amplitudo antara gelombang yang dipantulkan  $E_r$  dan gelombang datang  $E_0$  adalah

$$r_{\perp} = \frac{E_r}{E_0} = \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}} - 1}{\sqrt{\tilde{\epsilon}} + 1} = \frac{n - 1 + i\kappa}{n + 1 + i\kappa} = r_0 e^{i\theta} \quad (2.19)$$

Reflektivitas didefinisikan sebagai

$$R_{\perp} = r_{\perp} r_{\perp}^* \quad (2.20)$$

atau

$$R_{\perp} = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2} \quad (2.21)$$

dan  $r_{\perp}$  bisa dituliskan sebagai

$$r_{\perp} = \sqrt{R_{\perp}} e^{i\theta} = \sqrt{R_{\perp}} (\cos \theta + i \sin \theta) \quad (2.22)$$

karena

$$\ln r_{\perp} = \ln \sqrt{R_{\perp}} + i\theta \quad (2.23)$$

maka suku fasa dari reflektansi dapat diperoleh dari hubungan Kramers-kronig seperti di atas

$$\theta(\omega) = \frac{1}{\pi} PV \int_0^{\infty} \frac{\omega' \ln R_{\perp}(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.24)$$

Dengan memanfaatkan hubungan di atas tadi, jika spektrum  $R_{\perp}$  dapat diperoleh lewat pengukuran, maka  $n$  dan  $\kappa$  ( $\propto \alpha$ ) dapat dicari dari

$$n = \frac{1 - R_{\perp}}{1 + R_{\perp} - 2\sqrt{R_{\perp} \cos \theta}} \quad (2.25)$$

$$\kappa = \frac{2\sqrt{R_{\perp} \sin \theta}}{1 + R_{\perp} - 2\sqrt{R_{\perp} \cos \theta}} \quad (2.26)$$

## 2.2. Dispersi indeks bias

Seperti telah disinggung di atas, indeks bias bahan bergantung pada frekuensi sudut ( $\omega$ ) atau panjang gelombang cahaya ( $\lambda$ ). Sifat ini dikenal sebagai dispersi indeks bias atau dispersi tetapan dielektrik. Sifat ini terkait dengan respons elektron dari suatu atom atau molekul yang bergantung pada struktur atom atau molekul tersebut. Respons tersebut bisa berupa hanya sekadar polarisasi distribusi elektron atau dapat berupa eksitasi elektronik. Model dielektrik klasik yang paling sederhana, yakni model Lorentz, dapat dipakai untuk memahami sifat dispersi itu. Ketika gelombang cahaya datang, distribusi elektron dari suatu atom atau molekul akan terganggu dan beresilasi di sekitar titik setimbangnya. Dalam model ini, diasumsikan bahwa elektron terikat gaya elastik (seperti gaya pegas) oleh muatan inti atom yang bekerja sebagai gaya restorsi. Akan tetapi, dalam pergerakannya elektron tadi juga akan mengalami gaya hambat yang sebanding dengan kecepatannya, sehingga kita memiliki persamaan gerak yang tidak lain adalah persamaan gerak osilasi teredam yang dipaksakan (oleh medan listrik dari gelombang cahaya), yaitu

$$m \frac{d^2}{dt^2} x + m\gamma \frac{d}{dt} x + m\omega_0^2 x = -eE \quad (2.27)$$

dengan  $x$  adalah posisi dari elektron relatif terhadap titik pusat atom dan  $m$  adalah massa dari elektron,  $\omega_0$  adalah frekuensi karakteristik,  $\gamma$  adalah koefisien damping,  $-e$  adalah muatan elektron, dan  $E$  adalah amplitudo medan listrik dari gelombang cahaya datang.

Dari solusi persamaan (2.27) di atas, maka dapat diperoleh ungkapan polarisasi  $\mathbf{P}$  akibat gerak osilasi di atas, yakni

$$P = Np = -eNx = \frac{e^2 N}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\gamma)} E \quad (2.28)$$

dengan  $p$  adalah momen dipol induksi. Perpindahan listrik di dalam bahan menjadi

$$\begin{aligned} D &= \varepsilon_0 E + P_{background} + P_{resonant} = \varepsilon_0 \left( 1 + \chi + \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\gamma)} \right) E \\ &= \varepsilon_0 \left[ \left( 1 + \chi + \frac{Ne^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{m\varepsilon_0((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\gamma\omega)^2)} \right) + \left( \frac{Ne^2\gamma\omega}{m\varepsilon_0((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\gamma\omega)^2)} \right) \right] E \\ &= \varepsilon_0 \tilde{\varepsilon}_r(\omega) E \end{aligned} \quad (2.29)$$

dengan  $\tilde{\epsilon}_r$ , adalah yang kita kenal sebagai tetapan dielektrik relatif, yang dapat diungkapkan secara sederhana sebagai

$$\tilde{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega) \quad (2.30)$$

Indeks bias terkait dengan tetapan dielektrik, atau permitivitas relatif ( $\tilde{\epsilon}_r$ ) bahan lewat hubungan

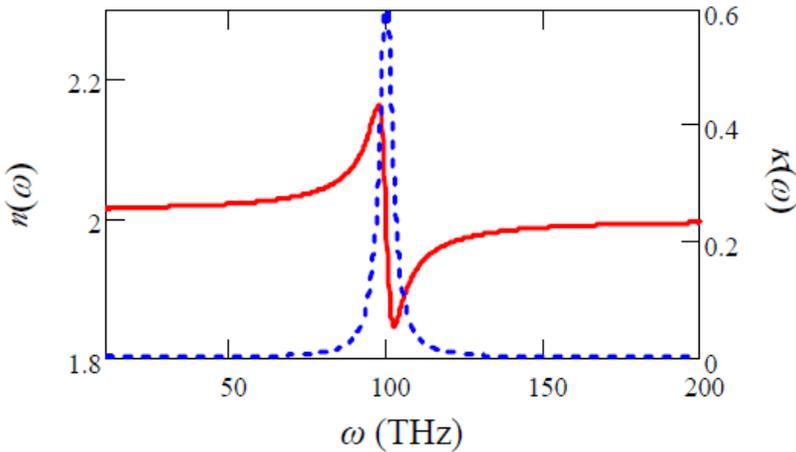
$$\tilde{n} = \sqrt{\tilde{\epsilon}_r} \quad (2.31)$$

sehingga, dapat diperoleh

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) + i\kappa(\omega) \cong \left[ \left( 1 + \frac{Ne^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{2m\epsilon_0((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2)} \right) + i \left( \frac{Ne^2\gamma\omega}{2m\epsilon_0((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2)} \right) \right] \quad (2.32)$$

Baik dalam ungkapan tetapan dielektrik maupun indeks bias, suku real terkait dengan laju penjalaran cahaya di dalam bahan dan pembiasan cahaya di bidang batas antara dua medium, sedangkan suku imajiner terkait dengan penyerapan atau absorpsi energi cahaya oleh medium tersebut.

Gambar (2.1), berikut menunjukkan kurva dispersi  $n(\omega)$  (garis penuh) dan  $\kappa(\omega)$  (garis putus-putus). Serapan cahaya hanya terjadi di sekitar frekuensi karakteristik, yang diikuti dengan perubahan indeks bias real yang signifikan.



Gambar (2.1). Kurva dispersi  $n(\omega)$  dan  $\kappa(\omega)$

Pada daerah jauh dari frekuensi karakteristik, serapan cahaya tidak terjadi dan indeks bias real bernilai relatif konstan. Deskripsi tetapan dielektrik dan indeks bias dengan osilator Lorentz ini cukup memadai untuk daerah di sekitar frekuensi karakteristik. Untuk di daerah frekuensi resonansi, perumusan indeks bias terutama sekali untuk suku absorpsinya, memerlukan perumusan kuantum. Baik dalam model klasik

maupun kuantum, suku imajiner indeks bias terkait dengan koefisien serapan  $\alpha$  dan koefisien ekstinsi  $\varepsilon$  yang dapat ditentukan dari eksperimen, yakni

$$\alpha = c\varepsilon = \frac{4\pi}{\lambda_0} \kappa = \frac{2\omega}{c} \kappa \quad (2.33)$$

Secara praktis, dispersi indeks bias suatu bahan biasanya didekati secara semi-empirik. Ada dua model dispersi yang sering dipakai, yakni

a) Dispersi Cauchy

Indeks bias  $n$  dinyatakan oleh

$$n(\omega) = n_{-2}(\hbar\omega)^{-2} + n_0 + n_2(\hbar\omega)^2 + n_4(\hbar\omega)^4 \quad (2.34)$$

dengan  $n_{-2}, n_0, \dots$  adalah parameter yang bergantung jenis bahan (jenis atom/molekul, rapat jenis dan cara tersusunnya atom/molekul).

b) Dispersi Sellmeier

Indeks bias  $n$  dinyatakan oleh

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (2.35)$$

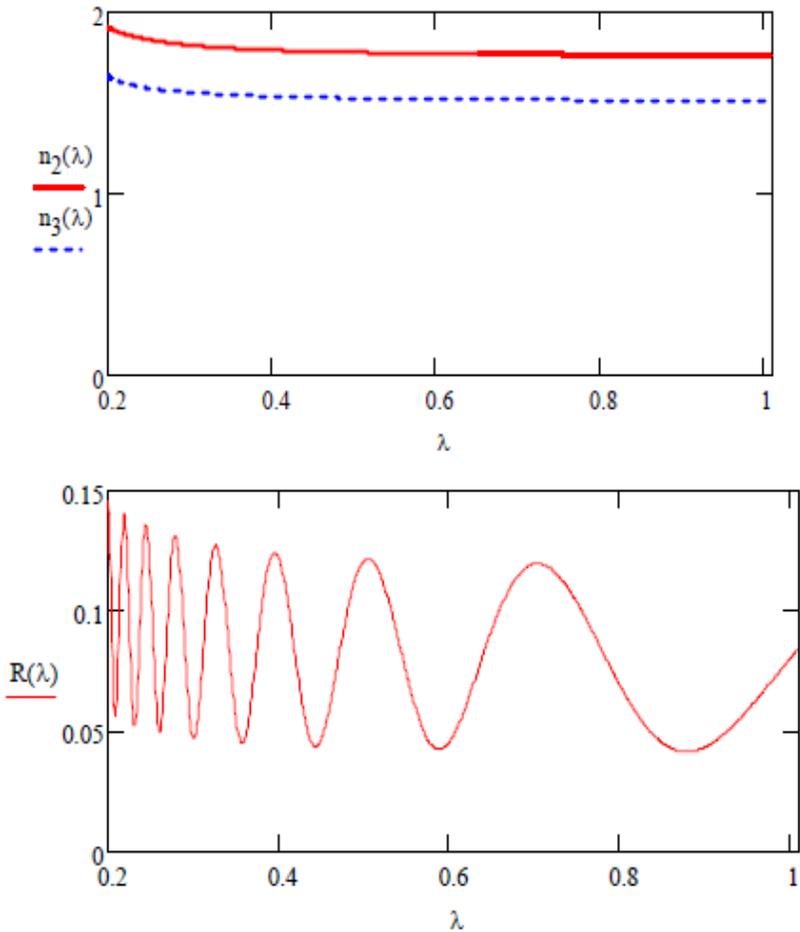
dengan  $\lambda$  adalah panjang gelombang ( $\mu\text{m}$ ) dan  $A$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ , ... adalah koefisien Sellmeier yang juga bergantung pada jenis bahan. Koefisien ini biasanya ditentukan dari pengukuran sampel standar.

Tabel (2.1) diberikan beberapa contoh nilai koefisien Cauchy dan Sellmeier untuk beberapa bahan. Untuk indeks bias dari bahan semikonduktor di daerah dekat dengan pita *gap*-nya, fungsi indeks bias bisa didekati dengan persamaan Forouhi-Bloomer (FB), hubungan Herve-Vandamme, atau hubungan Wemple-DiDomenico, yang dapat ditemukan di berbagai literatur bahan semikonduktor.

Tabel (2.1). Nilai koefisien Cauchy-Sellmeier untuk beberapa bahan

Material	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
SiO <sub>2</sub> (fused silica)	0.696749	0.408218	0.890815	0.0690660	0.115662	9.900559
86.5%SiO <sub>2</sub> - 13.5%GeO <sub>2</sub>	0.711040	0.451885	0.704048	0.0642700	0.129408	9.425478
GeO <sub>2</sub>	0.80686642	0.71815848	0.85416831	0.068972606	0.15396605	11.841931
BaF <sub>2</sub>	0.63356	0.506762	3.8261	0.057789	0.109681	46.38642
Sapphire	1.023798	1.058264	5.280792	0.0614482	0.110700	17.92656
Diamond	0.3306	4.3356		0.175	0.106	
Quartz, $n_o$	1.35400	0.010	0.9994	0.092612	10.700	9.8500
Quartz, $n_e$	1.38100	0.0100	0.9992	0.093505	11.310	9.5280
KDP, $n_o$	1.2540	0.0100	0.0992	0.09646	6.9777	5.9848
KDP, $n_e$	1.13000	0.0001	0.9999	0.09351	7.6710	12.170

Indeks bias bergantung pada frekuensi ( $\omega$ ), sehingga nilai reflektansi R akan bergantung pula pada  $\omega$ . Sebagai contoh, Gambar (2.2) menunjukkan kurva indeks bias dari gelas BK7 ( $n_2$ ) dan *sapphire* ( $n_3$ ) dan spektrum reflektansi R dari struktur lapisan udara | *sapphire* ( $d = 500$  nm | gelas BK7.



Gambar (2.2). Kurva indeks bias gelas BK7 ( $n_2$ ) dan shapire ( $n_3$ ) .

### 2.3. Hubungan antara Tetapan Dielektrik dan Polarizabilitas

Telah kita lihat dari model Lorentz di atas bahwa dispersi tetapan dielektrik merupakan refleksi dari respon elektron terluar dari sebuah atom terhadap gelombang elektromagnetik. Lebih lanjut, marilah kita tinjau dispersi tetapan dielektrik ini sebagai fungsi dari polarizabilitas dan suseptibilitas dari bahan bersangkutan. Polarizabilitas adalah ukuran mikroskopik yang menunjukkan sifat dasar atom, sedangkan suseptibilitas adalah ukuran makroskopik yang bergantung pada bagaimana atom-atom tersusun menjadi suatu kesatuan.

Polarizabilitas sebuah atom  $\alpha$  didefinisikan sebagai fungsi dari medan listrik lokal  $E_{\text{lokal}}$

$$\mathbf{p} = \alpha \mathbf{E}_{\text{lokal}} \quad (2.36)$$

dengan  $p$  adalah momen dipol. Hubungan antara medan listrik makroskopik  $E$  dan medan listrik lokal  $E_{\text{lokal}}$  diberikan oleh

$$\mathbf{E}_{\text{lokal}} = \mathbf{E} + \text{const } \mathbf{P} \quad (2.37)$$

Persamaan (2.37) menyatakan bahwa medan listrik yang bekerja pada sebuah atom sama dengan medan makroskopik  $E$  ditambah dengan medan oleh polarisasi atom di sekitarnya. Harga  $const$  bergantung pada cara bagaimana atom-atom tersusun. Untuk atom-atom yang tersusun dalam bentuk kristal kubik,  $const = 1/3 \epsilon_0$  dan medan lokal menjadi

$$E_{lokal} = E + \frac{1}{3\epsilon_0} P \quad (2.38)$$

Hubungan ini dikenal sebagai hubungan Lorentz.

Polarisasi bahan  $P$  adalah

$$P = \sum_j N_j p_j = \sum_j N_j \alpha_j E_{lokal}(j) \quad (2.39)$$

dengan  $N_j$  adalah konsentrasi atom,  $\alpha_j$  adalah polarizabilitas atom ke- $j$  dan  $E_{lokal}(j)$  adalah medan lokal pada atom ke- $j$ . Untuk atom-atom dalam susunan kubik, polarisasi  $P$  menjadi

$$P = \sum N_j \alpha_j \left( E + \frac{1}{3\epsilon_0} P \right) \quad (2.40)$$

dan suseptibilitas  $\chi$  adalah

$$\chi = \frac{P}{E} = \frac{\sum N_j \alpha_j}{1 - \frac{1}{3} \sum N_j \alpha_j} \quad (2.41)$$

Karena  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (1 + \chi)$ , maka diperoleh bahwa:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} \sum N_j \alpha_j \quad (2.42)$$

Hubungan ini dikenal sebagai hubungan Clausius – Mossoti, yang menyatakan hubungan antara tetapan dielektrik dan polarizabilitas dari atom-atom penyusun.

Polarizabilitas sebuah atom dapat dibedakan berdasarkan jenis asalnya, yakni elektronik, ionik dan dipolar. Polarizabilitas ionik berasal dari pergeseran awan elektron relatif terhadap inti. Polarizabilitas ionik berasal dari pergeseran ion bermuatan relatif terhadap ion bermuatan lainnya. Polarizabilitas dipolar berasal dari perubahan orientasi molekul yang memiliki dipol permanen di bawah pengaruh medan listrik. Pada frekuensi tinggi atau pada daerah gelombang cahaya (optik), kontribusi polarizabilitas dipolar dan ionik adalah kecil karena inersia dari atom/molekul dan

ion. Pada daerah tersebut hanya polarizabilitas elektronik saja yang berperan.

## 2.4. Hubungan antara Konstanta Dielektrik dan Absorpsi dalam Bahan Konduktif

Untuk bahan konduktif, persamaan Maxwell akan menjadi

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{H} / \partial t \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{E} / \partial t\end{aligned}\quad (2.43)$$

Jika medan gelombang elektromagnetik tidak bervariasi terlalu besar dibandingkan jarak tempuh rata-rata elektronik  $\ell$  (*electronic mean free path*), dengan kata lain, jika  $\lambda \gg \ell$ , maka

$$\mathbf{J}(\omega) = \sigma(\omega)\mathbf{E}(\omega)\quad (2.44)$$

Dari hubungan

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{i\omega}{c} \nabla \times \mathbf{H}\quad (2.45)$$

Dapat diperoleh persamaan gelombang

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{\omega^2}{c^2} \left( 1 + \frac{4\pi i \sigma}{\omega} \right) \mathbf{E} \quad (2.46)$$

atau

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{\omega^2}{c^2} \tilde{\epsilon}(\omega) \mathbf{E} \quad (2.47)$$

dengan tetapan dielektrik kompleks

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = 1 + \frac{4\pi i \sigma(\omega)}{\omega} \quad (2.48)$$

Jelaslah bahwa suku imajiner dari tetapan dielektrik kompleks dari logam ditentukan oleh konduktivitasnya, yaitu merupakan kontribusi dari pembawaan muatan bebas.

Fungsi konduktivitas bisa diperoleh dari persamaan gerak elektron di dalam logam di bawah pengaruh medan listrik  $\mathbf{E}$ . Persamaan gerak untuk momentum per elektron adalah

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -\frac{\mathbf{p}}{\tau} - e\mathbf{E} \quad (2.49)$$

dengan  $\mathbf{p}$  adalah momentum dan  $\tau$  adalah waktu relaksasi atau waktu antar tumbukan seperti dalam model Drude untuk konduktivitas DC. Jika  $\mathbf{E}$  berbentuk

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}(\omega)e^{-i\omega t} \quad (2.50)$$

maka solusi keadaan tunak  $\mathbf{p}(t)$  juga akan berbentuk

$$\mathbf{p}(t) \propto \mathbf{p}(\omega)e^{-i\omega t} \quad (2.51)$$

sehingga kita bisa peroleh hubungan

$$-i\omega\mathbf{p}(\omega) = -\frac{\mathbf{p}(\omega)}{\tau} - e\mathbf{E}(\omega) \quad (2.52)$$

Karena rapat arus adalah

$$\mathbf{j}(\omega) = -\frac{ne\mathbf{p}(\omega)}{m} = -\frac{(ne^2\tau/m)\mathbf{E}(\omega)}{(1/r) - i\omega} \quad (2.53)$$

maka diperoleh

$$\sigma(\omega) = \frac{(ne^2\tau/m)}{1-i\omega\tau} = \frac{\sigma_0}{1-i\omega\tau} \quad (2.54)$$

bisa dilihat di sini bahwa jika  $\omega=0$  (medan listrik DC) maka  $\sigma$  akan kembali sama dengan  $\sigma$  dari model Drude untuk konduktivitas DC, yakni  $\sigma=ne^2\tau/m$ .

Dari hasil di atas dapat diperoleh tetapan dielektrik kompleks untuk logam adalah

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = 1 + \frac{4\pi i(ne^2\tau/m)}{\omega(1-i\omega\tau)} \quad (2.55)$$

dimana untuk aproksimasi pertama untuk ( $\omega \gg 1/\tau$ ), yakni untuk gelombang optik,

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon(\omega) = 1 - \frac{4\pi ne^2/m}{\omega} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.56)$$

dengan  $\omega_p$  dinamakan sebagai frekuensi plasma. Kita lihat di sini bahwa

- Jika  $\omega < \omega_p$ , maka  $\epsilon$  = bilangan real dan negatif, artinya gelombang elektromagnetik akan mengalami atenuasi sehingga bahan bersifat tidak transparan.

- Jika  $\omega > \omega_p$ , maka  $\varepsilon$  = bilangan real dan positif, artinya gelombang elektromagnetik mengalami propagasi sehingga bahan tampak transparan.
- Jika  $\omega \cong \omega_p$ , maka akan terjadi osilasi plasma atau plasmon, yakni resonansi antara gelombang elektromagnetik dan rapat muatan.

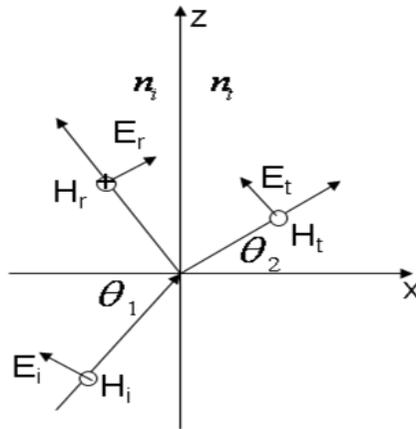


## BAB III

# PENGUKURAN INDEKS BIAS DAN KETEBALAN FILM

Teknik pengukuran reflektometri digunakan untuk penentuan indeks bias dan ketebalan film. Reflektometer bekerja berdasarkan efek interferensi antara berkas yang dipantulkan secara berulang oleh permukaan antara lapisan yang berbeda.

Tinjau kasus dengan polarisasi TM (*Transverse Magnetic*), seperti pada Gambar 3.1. Syarat batas yang harus dipenuhi oleh medan  $\vec{E}$  dan  $\vec{H}$  adalah kontinuitas komponen tangensialnya pada bidang batas.



Gambar (3.1). Pemantulan dan pembiasan gelombang EM modus TM pada permukaan batas antara dua media yang berbeda ( $\ominus$ =keluar,  $\oplus$ = masuk bidang gambar).

Kontinuitas  $E_z$  dan  $H_y$  di  $x=0$  adalah

$$\begin{aligned} E_z : (E_i + E_r) \cos \theta_1 &= E_t \cos \theta_2 \\ H_y : n_i(E_i - E_r) &= n_t E_t \end{aligned} \quad (3.1)$$

persamaan (3.1) dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \cos \theta_1 \\ n_i & -n_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \cos \theta_2 \\ n_t & -n_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

sehingga

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \cos \theta_1 \\ n_i & -n_i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \cos \theta_2 \\ n_t & -n_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Persamaan (3.3), dapat ditulis dalam bentuk

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \frac{1}{-2n_i \cos \theta_1} \begin{bmatrix} -n_i & -\cos \theta_1 \\ -n_i & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \cos \theta_2 \\ n_t & -n_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

sehingga diperoleh

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \frac{1}{-2n_i \cos \theta_1} \begin{bmatrix} (-n_i \cos \theta_2 - n_t \cos \theta_1) E_t \\ (-n_i \cos \theta_2 + n_t \cos \theta_1) E_t \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Koefisien refleksi dan transmisi Fresnell adalah

$$r = \left( \frac{E_r}{E_i} \right) = \frac{n_i \cos \theta_2 - n_t \cos \theta_1}{n_i \cos \theta_2 + n_t \cos \theta_1} \quad (3.6)$$

$$t = \left( \frac{E_t}{E_i} \right) = \frac{2n_i \cos \theta_1}{n_i \cos \theta_2 + n_t \cos \theta_1} \quad (3.7)$$

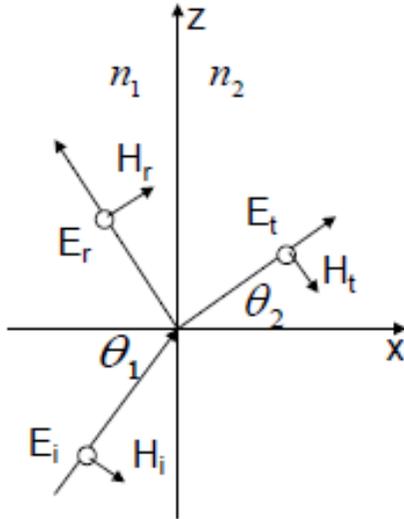
Intensitas reflektansi adalah

$$R = |r|^2 \quad (3.8)$$

dan transmitansi

$$T = |t|^2 \frac{n_t}{n_i} \quad (3.9)$$

Untuk kasus dengan polarisasi TE (*Transverse Electric*), seperti pada Gambar (3.2). Syarat batas yang harus dipenuhi oleh medan  $\vec{E}$  dan  $\vec{H}$  adalah kontinuitas komponen tangensialnya pada bidang batas.



Gambar (3.2). Pemantulan dan pembiasan gelombang EM modus TE pada permukaan batas antara dua media yang berbeda.

Kontinuitas  $E_y$  dan  $H_z$  di  $x=0$  adalah

$$\begin{aligned} E_y : (E_i + E_r) &= E_t \\ H_z : n_i(E_i - E_r) \cos \theta_1 &= n_t E_t \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

persamaan (3.10) dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_i \cos \theta_1 & -n_i \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_t \cos \theta_2 & -n_t \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

sehingga

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_i \cos \theta_1 & -n_i \cos \theta_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_t \cos \theta_2 & -n_t \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Koefisien refleksi adalah

$$r = \begin{pmatrix} E_r \\ E_i \end{pmatrix} = \frac{n_i \cos \theta_1 - n_t \cos \theta_2}{n_i \cos \theta_1 + n_t \cos \theta_2} \quad (3.13)$$

dan koefisien transmisi

$$t = \begin{pmatrix} E_t \\ E_i \end{pmatrix} = \frac{2n_i \cos \theta_1}{n_i \cos \theta_1 + n_t \cos \theta_2} \quad (3.14)$$

Intensitas reflektansi adalah

$$R = |r|^2 \quad (3.15)$$

dan transmitansi

$$T = |t|^2 \frac{n_t}{n_i} \quad (3.16)$$

Untuk kasus insidensi normal (*normal incidence*), maka  $\theta_1 = \theta_2 = 0$ , sehingga tidak lagi terdapat perbedaan antara komponen TE dan TM, dan berlaku

$$r = \left( \frac{E_r}{E_i} \right) = \frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \quad (3.17)$$

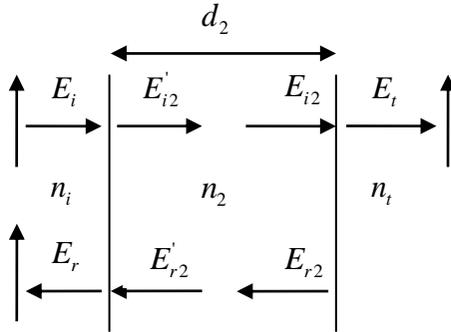
dan

$$t = \left( \frac{E_t}{E_i} \right) = \frac{2n_i}{n_i + n_t} \quad (3.18)$$

persamaan (3.4), menjadi

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{n_i} \\ 1 & -\frac{1}{n_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_i & -n_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Tinjau sistem yang terdiri dari satu lapisan dengan ketebalan  $d_2$  dan indeks bias  $n_2$ , seperti yang diperlihatkan pada Gambar (3.3).



Gambar (3.3). Sistem satu lapis dengan ketebalan  $d_2$  dan indeks bias  $n_2$

Sesuai dengan rumusan refleksi-transmisi yang diuraikan di atas, maka berlaku disetiap perbatasan dua medium:

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \tilde{D}_i^{-1} \tilde{D}_2 \begin{bmatrix} E'_{i2} \\ E'_{r2} \end{bmatrix} \quad (3.20a)$$

dan

$$\begin{bmatrix} E_{i2} \\ E_{r2} \end{bmatrix} = \tilde{D}_2^{-1} \tilde{D}_i \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20b)$$

dengan

$$\tilde{D}(l) = \begin{bmatrix} \cos \theta_l & \cos \theta_l \\ n_l & -n_l \end{bmatrix}; l = i, 2, t \quad (3.21)$$

penjalaran dalam medium dua, berlaku

$$\begin{bmatrix} E'_{i2} \\ E'_{r2} \end{bmatrix} = \tilde{P}_2 \begin{bmatrix} E_{i2} \\ E_{r2} \end{bmatrix} \quad (3.22a)$$

dengan

$$\tilde{P}_2 = \begin{bmatrix} e^{j\phi_2} & 0 \\ 0 & e^{-j\phi_2} \end{bmatrix} \quad (3.22b)$$

dan

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \quad (3.23)$$

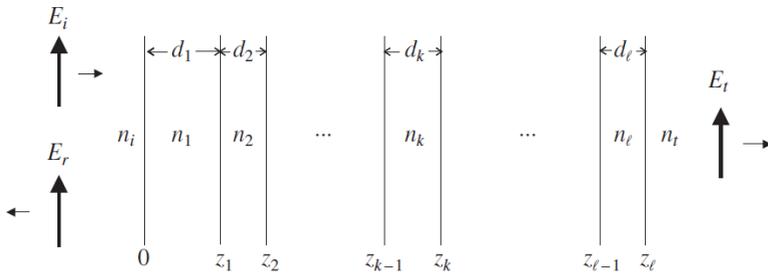
sehingga

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \tilde{D}_i^{-1} \tilde{D}_2 \tilde{P}_2 \tilde{D}_2^{-1} \tilde{D}_i \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{n_i} \\ 1 & -\frac{1}{n_i} \end{bmatrix} \tilde{M}_2 \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_t & -n_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

dengan

$$\tilde{M}_2 = \tilde{D}_2 \tilde{P}_2 \tilde{D}_2^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \phi_2 & \frac{j \sin \phi_2}{n_2} \\ j n_2 \sin \phi_2 & \cos \phi_2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Untuk sistem multilapis yang terdiri dari  $\ell$  lapisan dengan ketebalan  $d_k$  dan indeks bias  $n_k = \sqrt{\frac{\epsilon_k}{\epsilon_0}}$ ,  $1 \leq k \leq \ell$ , seperti yang diperlihatkan pada Gambar (3.4).



Gambar (3.4). Struktur multilapis

maka, berlaku hubungan (Rowe, 1999):

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{n_i} \\ 1 & -\frac{1}{n_i} \end{bmatrix} \cdot \prod_{k=1}^{\ell} \tilde{M}_k \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_t & -n_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

dengan

$$\tilde{M}_k = \begin{bmatrix} \cos \phi_k & \frac{j \sin \phi_k}{n_k} \\ j n_k \sin \phi_k & \cos \phi_k \end{bmatrix}, \quad \phi_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k d_k \quad (3.27)$$

Untuk kasus sistem 2 lapis, dari persamaan (3.26) diperoleh:

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{n_i} \\ 1 & -\frac{1}{n_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & \frac{j \sin \phi_1}{n_1} \\ j n_1 \sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi_2 & \frac{j \sin \phi_2}{n_2} \\ j n_2 \sin \phi_2 & \cos \phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_t & -n_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

dengan

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \quad (3.29a)$$

dan

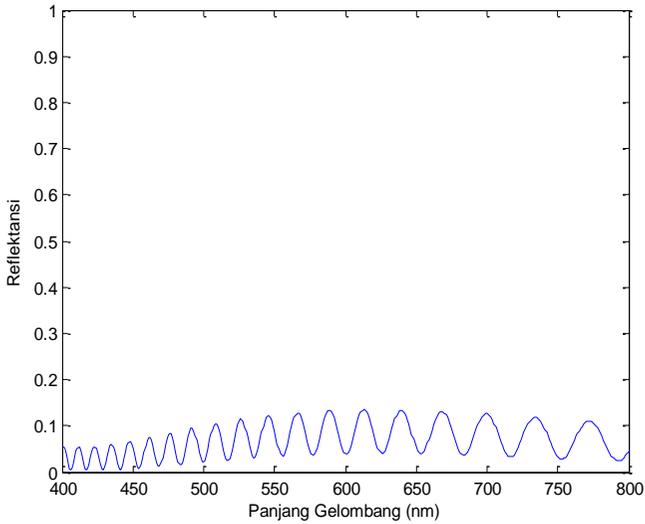
$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \quad (3.29b)$$

Untuk kasus sistem 3 lapis, dari persamaan (3.26) diperoleh

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{n_i} \\ 1 & -\frac{1}{n_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & \frac{j \sin \phi_1}{n_1} \\ j n_1 \sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_2 & \frac{j \sin \phi_2}{n_2} \\ j n_2 \sin \phi_2 & \cos \phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_3 & \frac{j \sin \phi_3}{n_3} \\ j n_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_t & -n_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

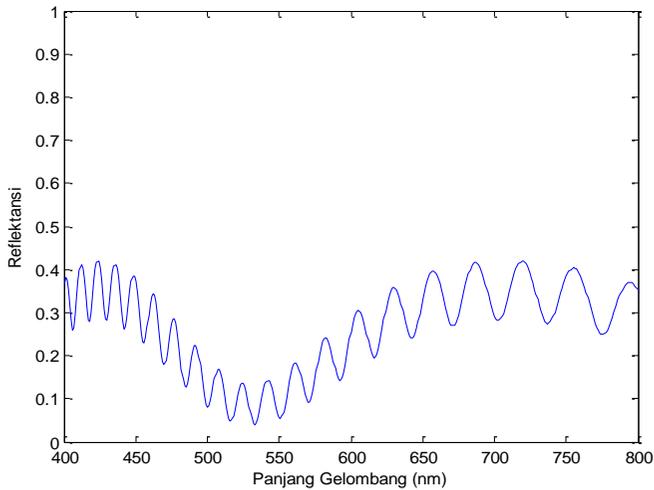
Dari persamaan (3.8), (3.9), (3.17), (3.28) dan (3.29) dibuatlah program simulasi untuk memperoleh nilai reflektansi R sebagai fungsi dari panjang gelombang (nm).

Andaikan sebuah lapisan tipis dengan indeks bias  $n_2=1.55$ , ketebalan  $d_2=200$  nm di atas substrat gelas ITO ( $n_3=1.80$ ,  $d_3=4000$  nm). Seberkas cahaya jatuh normal terhadap lapisan tersebut, nilai reflektansi R sebagai fungsi dari panjang gelombang (nm) diperlihatkan pada Gambar (3.5) di bawah ini.



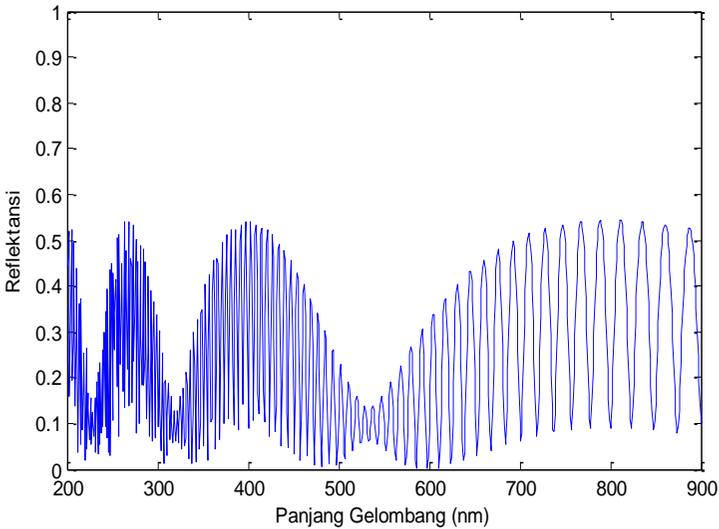
Gambar (3.5). Nilai reflektansi ( $R$ ) sebagai fungsi panjang gelombang ( $n_2=1.55$ ).

Jika lapisan  $n_2$  terbuat dari  $\text{TiO}_2$ , yakni  $n_2 = 2.652$ , maka kurva reflektansi di atas menjadi seperti dalam Gambar (3.6) di bawah ini.



Gambar (3.6). Nilai reflektansi ( $R$ ) sebagai fungsi panjang gelombang ( $n_2=2.652$ ).

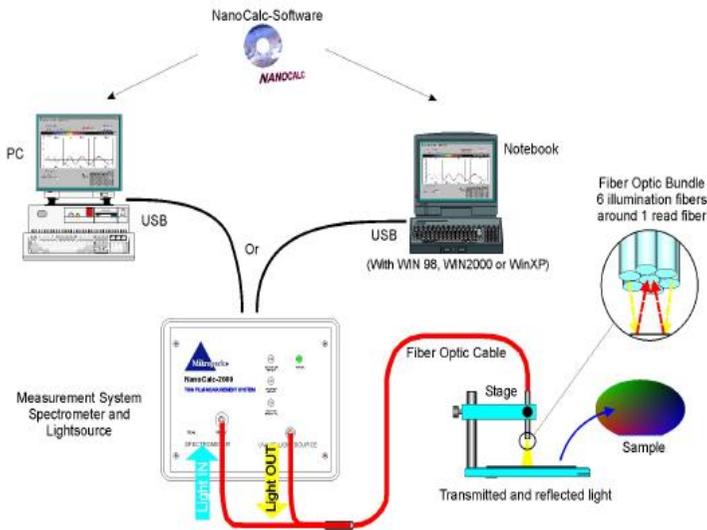
Apabila lapisan indeks bias  $n_2 = 3.50$ , maka kurva reflektansi menjadi seperti dalam Gambar (3.7) di bawah ini.



Gambar (3.7). Nilai reflektansi (R) sebagai fungsi panjang gelombang ( $n_2=3.50$ )

Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan sistem reflektometer NanoCalc-2000. Rentang pengukuran ketebalan lapisan berkisar dari 10 nm – 250  $\mu\text{m}$ . Dengan bantuan simulasi komputer, baik indeks bias maupun ketebalan dapat ditentukan secara bersamaan. Gambar (3.8), menunjukkan konfigurasi dari sistem pengukuran reflektometer ini. Sumber cahaya dan cahaya terpantul disalurkan dengan pandu gelombang. Sampel acuan (referensi) diletakkan pada jarak tertentu dari keluaran pandu gelombang sehingga teramati pola intensitas mentah di

layar monitor. Setelah intensitas tersebut disimpan sebagai data referensi, sampel acuan tersebut diganti dengan sampel yang akan diukur dan segera dapat dilakukan pengukuran spektrum reflektansi. Analisis data dapat dilakukan dengan software yang telah disediakan pada NanoCalc-2000.



(NanoCalc manual 2000)

Gambar (3.8). Konfigurasi sistem pengukuran reflektometer

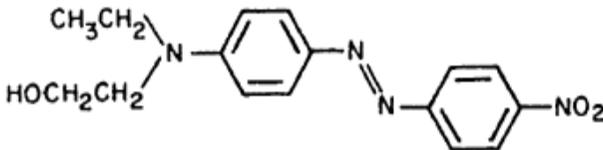
# BAB IV

## HASIL KARAKTERISASI INDEKS BIAS DAN KETEBALAN FILM

### 4.1. Hasil Eksperimen Deposisi Film dengan metode EFA-PVD

Dalam bagian ini, disajikan hasil eksperimen fabrikasi film tipis Disperse Red-1 (DR-1) dengan metode *Electric Field Assisted Physical Vapor Deposition* (EFA-PVD) menggunakan substrat ITO (*Indium Tin Oxide*).

Bahan DR-1 dalam bentuk bubuk (*powder*) yang digunakan dalam eksperimen ini diperoleh secara komersial dari Aldrich. Molekul ini mempunyai berat molekul 314,34. Struktur molekul ini ditunjukkan dalam Gambar (4.1).



Gambar (4.1). Struktur Molekul DR-1

Bubuk DR-1 (Gambar 4.2) ini telah digunakan untuk deposisi vakum tanpa perlakuan tambahan. DR-1 yang telah diterima dalam bentuk bubuk kemudian diproses dalam bentuk larutan dan film. Larutan DR-1 disiapkan dengan cara melarutkan bubuk DR-1 ke dalam pelarut N-Methyl Pyrolidinone (NMP). Larutan DR-1 diaduk dengan menggunakan pengaduk magnetik (*magnetic stirrer*) selama 1 jam sehingga diperoleh larutan yang homogen.

Sampel dalam bentuk film tipis dideposisi pada substrat ITO dengan menggunakan vakum evaporator tipe VPC-410 dari Ulvac Sinku Kiko, yang dioperasikan pada tekanan  $(2-4) \times 10^{-5}$  torr, dengan suhu krusibel  $168^{\circ}\text{C}$  dan suhu substrat  $26^{\circ}\text{C}$  (Gambar 4.3). Substrat ITO berfungsi sebagai elektroda untuk pembangkit medan poling listrik dan juga sebagai sumber efek surfaktan yang diinginkan. Substrat ditempatkan 10 cm di atas krusibel dengan posisi elektroda mesh stainless di antara substrat dan krusibel. Film dipersiapkan dengan variasi medan listrik luar sebesar 0 MV/m, 0,59 MV/m, 1,9 MV/m, 2,6 MV/m dan 3,3 MV/m. Lamanya waktu deposisi film tipis adalah 1 jam. Tidak ada perlakuan tambahan selama proses deposisi film.

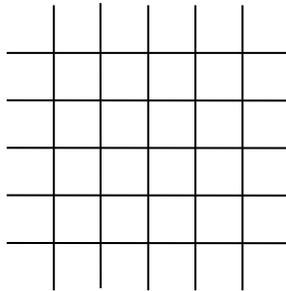


Gambar (4.2). Bahan DR-1



Gambar (4.3). Vakum evaporator tipe VPC-410 dari Ulvac Sinku Kiko

Pemberian medan listrik dilakukan dengan menghubungkan elektroda positif ke mesh dan negatif ke substrat ITO. Bentuk mesh yang digunakan telah didesain dan disimulasikan agar dapat menghasilkan distribusi medan listrik yang homogen pada permukaan substrat. Model dari mesh yang digunakan dapat dilihat pada Gambar (4.4). Seluruh ekperimen fabrikasi film tipis dengan medan listrik dilakukan menggunakan bentuk mesh seperti pada Gambar (4.4). Besarnya medan listrik divariasikan antara 0 hingga 3,3 MV/m.



Gambar (4.4). Model mesh yang digunakan

Film yang dihasilkan mempunyai permukaan yang rata dan halus serta ketebalan yang homogen. Ketebalan film diukur dengan menggunakan reflektometer (NanoCalc-2000 VIS).

Hasil pengukuran ketebalan film bervariasi dari 150 sampai 200 nm untuk film yang berbeda.



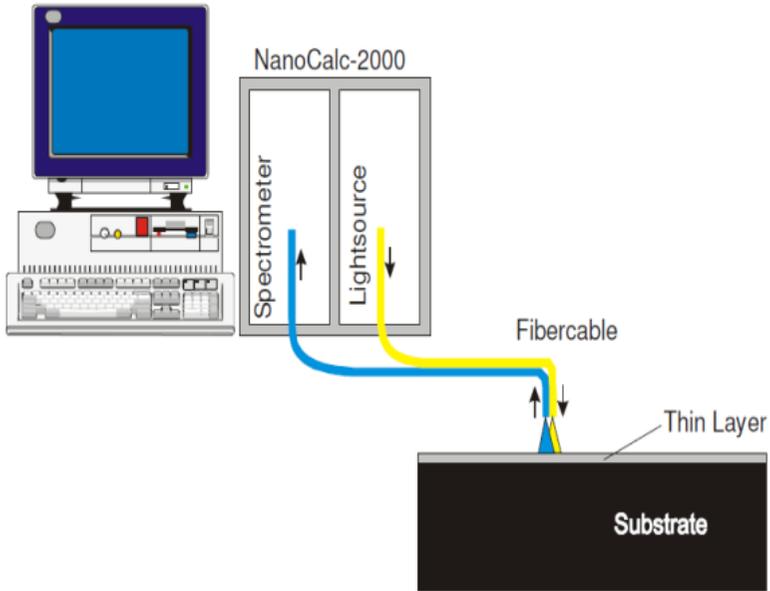
Gambar (4.5). Pengaduk magnetik (*magnetic stirrer*)



Gambar (4.6). Larutan DR-1 (pelarut NMP)

#### **4.2. Karakterisasi Sifat Optik (Optical Properties)**

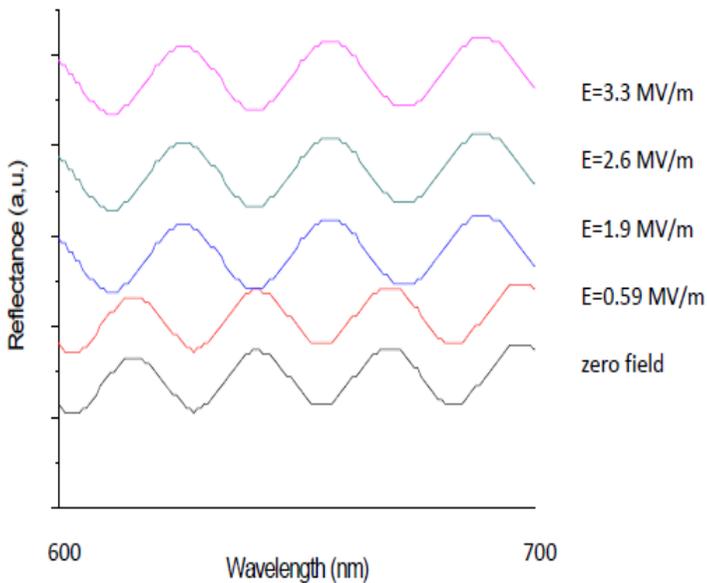
Sifat optik (indeks bias) film ditentukan dari pengukuran reflektometer (NanoCalc-2000 VIS). Gambar (4.7), memperlihatkan skema susunan peralatan reflektometer NanoCalc-2000 VIS.



Gambar (4.7). Skema susunan peralatan reflektometer

Indeks bias film diukur dengan reflektometer (NanoCalc-2000 VIS) untuk mengkaji pengaruh medan listrik yang digunakan pada deposisi film dalam proses deposisi EFA-PVD dari film DR-1 di atas substrat ITO. Hasil pengukuran dari sampel yang diperoleh dengan medan yang berbeda dalam jangkauan panjang gelombang dari 600 nm sampai 700 nm, diperlihatkan pada Gambar (4.8). Setiap pengukuran sampel

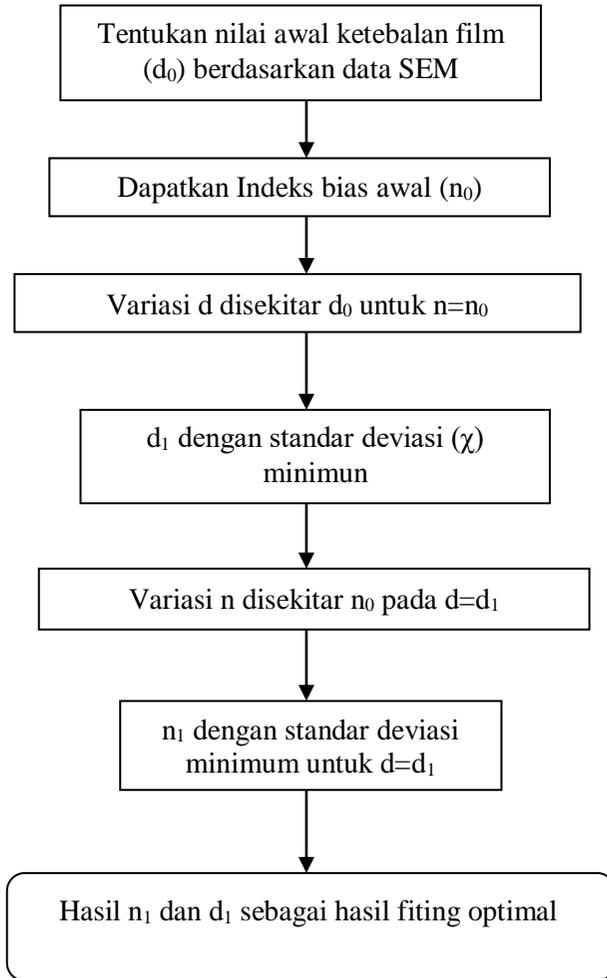
film DR-1, selalu diawali dengan pengukuran substrat tanpa film DR-1 sebagai referensi pengukuran yang bertujuan untuk menghilangkan efek *background* dari data yang ditampilkan dalam Gambar (4.8).



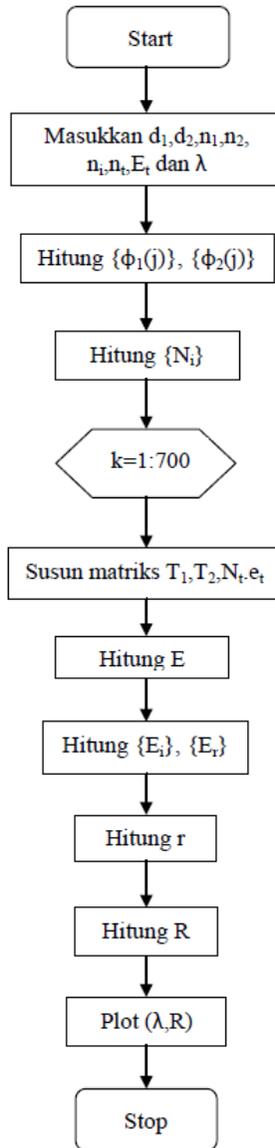
Gambar (4.8). Hasil pengukuran reflektometer film DR-1 terdposisi di atas substrat ITO untuk variasi medan listrik luar pada rentang panjang gelombang (600 – 700 nm).

Analisis data dilakukan dengan menggunakan program simulasi komputer yang dibuat atas dasar rumusan analitik dalam Bab III. Hasil simulasi telah diuji dengan program NanoCalc yang tersedia. Namun program NanoCalc itu sendiri ternyata tidak dapat digunakan untuk melakukan fitting data pengukuran yang diperlukan untuk mengekstraksi informasi indeks bias ( $n$ ) dan ketebalan film ( $d$ ) secara optimal. Prosedur fitting dijelaskan oleh *flow chart* (diagram alir) pada Gambar (4.9) di bawah ini.

Prosedur tersebut diulang untuk film terdposisi di atas substrat ITO dengan variasi medan listrik yang berbeda.

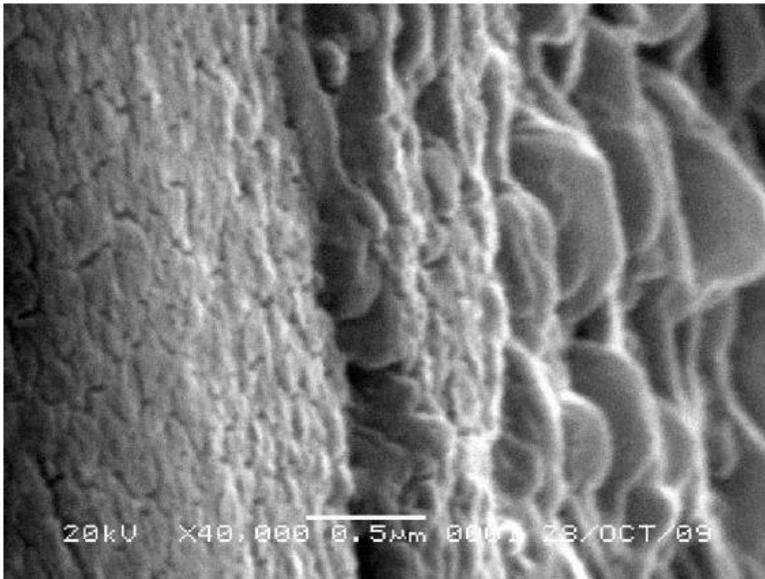


Gambar (4.9). Diagram Alir Penentuan Indeks Bias Film DR-1



Gambar (4.10). Diagram Alir Reflektansi Multilapis

Penentuan nilai awal ketebalan film ( $d_0 \cong 200$  nm) diperoleh dari hasil SEM (*Scanning Electron Microscopic*) penampang (samping), seperti yang diperlihatkan pada Gambar (4.11).



Gambar (4.11). Hasil SEM penampang (samping) film DR-1

### 4.3. Program Matlab Untuk Reflektansi Multilapis

Program Matlab untuk reflektansi multilapis, diuraikan di bawah ini:

```

clear
clc
% lamda=200:0.1:900
d1=200e-9;% tebal film
d2=4000e-9;% tebal ITO
Et=1;
ni=1;
n1=1.55;% indeks bias film
n2=1.800;% indeks bias ITO
nt=1.500;% indeks bias gelas
lamda_old=200;
for j=1:700
lamda(j)=lamda_old;
phi1(j)=((2*pi)/lamda(j))*n1*d1*1e9;
phi2(j)=((2*pi)/lamda(j))*n2*d2*1e9;
Ni=[1 1./ni;1 1./ni];
end
for k=1:700
    T1=[cos(phi1(k))i*(phi1(k))./n1;i*n1*sin(phi1(k))
        cos(phi1(k))];
    T2=[cos(phi2(k))i*sin(phi2(k))./n2;i*n2*sin(phi2(k))
        cos(phi2(k))];
    Nt=[1 1;nt -nt];
    et=[Et;0];
    E=.5.*Ni*T1*T2*Nt*et;
    Ei=E(1,:);
    Er=E(2,:);
    r(k)=Er./Ei;
end
R=r.*conj(r);
plot(lamda,R)
xlabel('Panjang Gelombang (nm)')
ylabel('Reflektansi')
axis([200 900 0 1])

```

#### 4.4. Hasil Fiting Indeks Bias Film DR-1

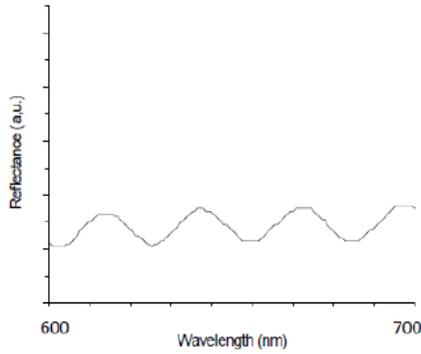
Tabel (4.1), memperlihatkan fitting spektrum film DR-1 *zero field* (tanpa medan listrik luar) (Gambar 4.12) terdeposisi di atas substrat ITO. Dengan menggunakan program simulasi komputer, diperoleh hasil fitting seperti pada Tabel (4.1) di bawah ini.

Tabel (4.1). Hasil fitting film DR-1 untuk *zero field*

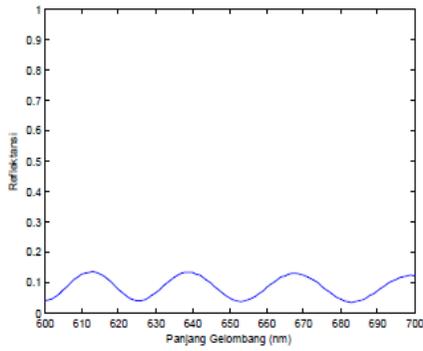
$\chi$		Ketebalan Film (nm)				
		$d_1=197$	$d_2=198$	$d_3=199$	$d_4=200$	$d_5=201$
Indeks Bias	$n_1=1,534$	0,01099	0,01081	0,02672	0,01287	0,01159
	$n_2=1,535$	0,01096	0,01077	0,01066	0,01075	0,01141
	<b><math>n_3=1,536</math></b>	0,01091	<b>0,01000</b>	0,01065	0,01078	0,01087
	$n_4=1,537$	0,01089	0,01072	0,01064	0,01086	0,01105
	$n_5=1,538$	0,01103	0,01082	0,01071	0,01085	0,01087

Dari Tabel (4.1), diperoleh fitting terbaik indeks bias untuk film

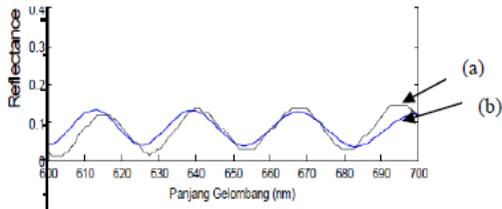
DR-1 *zero field* adalah  $n=1,536$ . Dengan  $\chi = \sqrt{\sum_i \frac{(R_i^s - R^p)^2}{n}}$ .



(a)



(b)



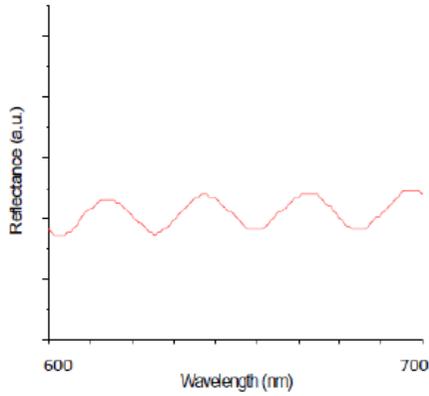
Gambar (4.12). Spektrum film DR-1 (*zero field*):  
(a) hasil pengukuran, (b) simulasi.

Gambar (4.13), memperlihatkan fitting spektrum film DR-1 dengan medan listrik luar  $E=0,59$  MV/m terdposisi di atas substrat ITO. Dengan menggunakan program simulasi komputer diperoleh hasil seperti pada Tabel (4.2).

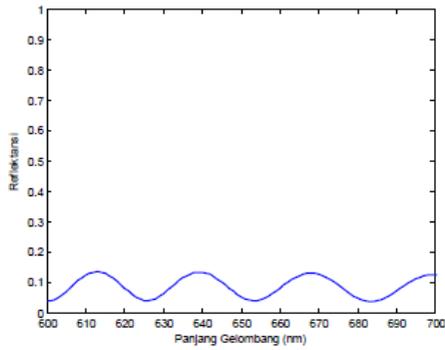
Tabel (4.2). Hasil fitting film DR-1 untuk  $E=0,59$  MV/m

$\chi$		Ketebalan Film (nm)				
		$d_1=197$	$d_2=198$	$d_3=199$	$d_4=200$	$d_5=201$
Indeks Bias	$n_1=1,543$	0,01102	0,01058	0,01018	0,01085	0,01101
	$n_2=1,544$	0,01097	0,01050	0,01012	0,01083	0,01097
	<b><math>n_3=1,545</math></b>	0,01091	0,01049	<b>0,01005</b>	0,01056	0,01107
	$n_4=1,546$	0,01114	0,01069	0,01027	0,01083	0,01102
	$n_5=1,547$	0,01108	0,01063	0,01024	0,01076	0,01089

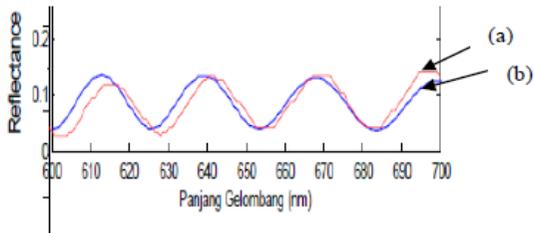
Dari Tabel (4.2), diperoleh hasil fitting terbaik indeks bias film DR-1 untuk  $E=0,59$  MV/m adalah  $n=1,545$ .



(a)



(b)



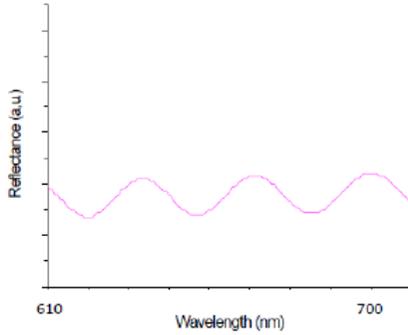
Gambar (4.13). Spektrum film DR-1 dengan  $E=0,59$  MV/m:  
(a) hasil pengukuran, (b) simulasi.

Gambar (4.14), memperlihatkan fitting spektrum film DR-1 dengan medan listrik  $E=1,9$  MV/m terdposisi di atas substrat ITO. Dengan menggunakan program simulasi komputer diperoleh hasil fitting seperti pada Tabel (4.3).

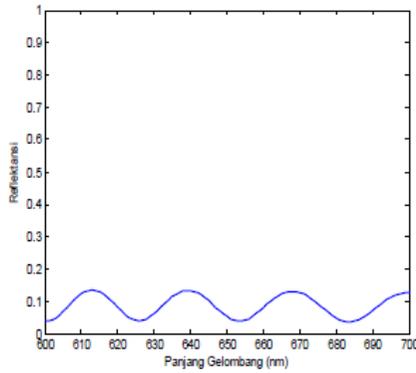
Tabel (4.3). Hasil fitting film DR-1 untuk  $E=1,9$  MV/m

$\lambda$		Ketebalan Film (nm)				
		$d_1=197$	$d_2=198$	$d_3=199$	$d_4=200$	$d_5=201$
Indeks Bias	$n_1=1,557$	0,00952	0,00932	0,00918	0,00928	0,00931
	$n_2=1,558$	0,00946	0,00927	0,00916	0,00935	0,00938
	$n_3=1,559$	0,00942	0,00925	0,00917	0,00939	0,00976
	<b><math>n_4=1,560</math></b>	0,00938	0,00920	<b>0,00914</b>	0,00924	0,00928
	$n_5=1,561$	0,00955	0,00934	0,00922	0,00961	0,00962

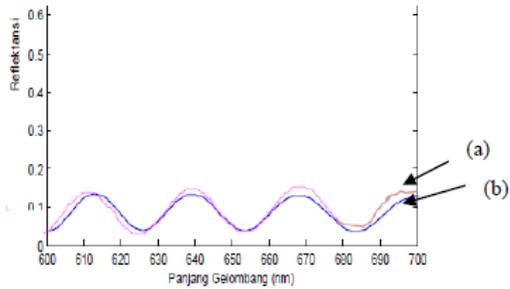
Dari Tabel (4.3), diperoleh fitting terbaik indeks bias film DR-1 untuk  $E=1,9$  MV/m adalah  $n=1,560$ .



(a)



(b)



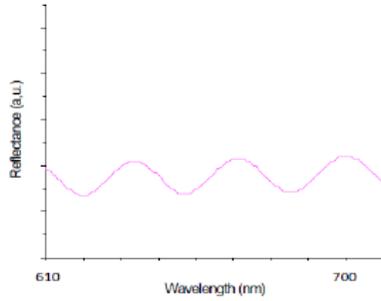
Gambar (4.14). Spektrum film DR-1 dengan  $E=1,9$  MV/m:  
(a) hasil pengukuran, (b) simulasi.

Selanjutnya, Gambar (4.15), memperlihatkan fitting spektrum film DR-1 dengan medan listrik  $E=2,6$  MV/m terdposisi di atas substrat ITO. Dengan menggunakan program simulasi komputer diperoleh hasil seperti pada Tabel (4.4).

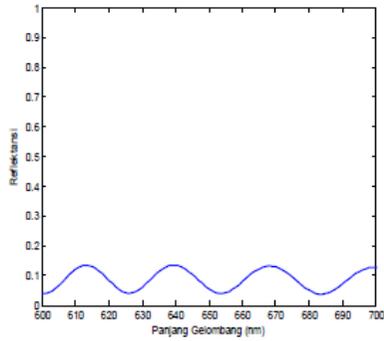
Tabel (4.4). Hasil fitting film DR-1 untuk  $E=2,6$  MV/m

$\chi$		Ketebalan Film (nm)				
		$d_1=197$	$d_2=198$	$d_3=199$	$d_4=200$	$d_5=201$
Indeks Bias	$n_1=1,567$	0,01348	0,01296	0,01405	0,01404	0,01405
	$n_2=1,568$	0,01354	0,01299	0,01411	0,01402	0,01403
	<b><math>n_3=1,569</math></b>	0,01336	<b>0,01283</b>	0,01384	0,01387	0,01388
	$n_4=1,570$	0,01337	0,01286	0,01393	0,01389	0,01394
	$n_5=1,571$	0,01342	0,01291	0,01400	0,01398	0,01401

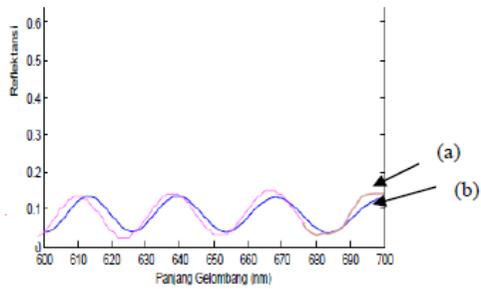
Dari Tabel (4.4), diperoleh fitting terbaik indeks bias film DR-1 untuk  $E=2,6$  MV/m adalah  $n=1,569$ .



(a)



(b)



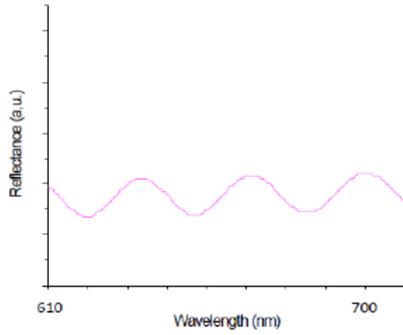
Gambar (4.15). Spektrum film DR-1 dengan  $E=2,6$  MV/m:  
(a) hasil pengukuran, (b) simulasi.

Gambar (4.16), memperlihatkan fitting spektrum film DR-1 untuk  $E=3,3$  MV/m terdposisi di atas substrat ITO. Dengan menggunakan program simulasi komputer diperoleh hasil fitting seperti pada Tabel (4.5) di bawah ini.

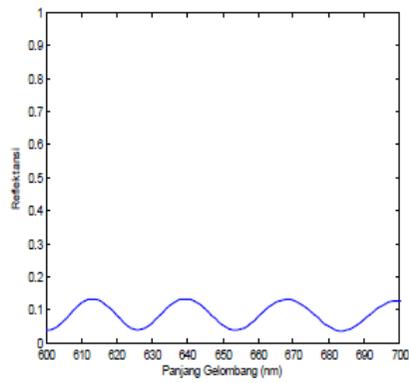
Tabel (4.5). Hasil fitting film DR-1 untuk  $E=3,3$  MV/m

$\chi$		Ketebalan Film (nm)				
		$d_1=197$	$d_2=198$	$d_3=199$	$d_4=200$	$d_5=201$
Indeks Bias	$n_1=1,580$	0,00876	0,00877	0,00886	0,00898	0,00903
	$n_2=1,581$	0,00877	0,00875	0,00883	0,00901	0,00898
	<b><math>n_3=1,582</math></b>	0,00875	<b>0,00872</b>	0,00886	0,00897	0,00905
	$n_4=1,583$	0,00873	0,00876	0,00887	0,00902	0,00898
	$n_5=1,584$	0,00878	0,00875	0,00873	0,00891	0,00912

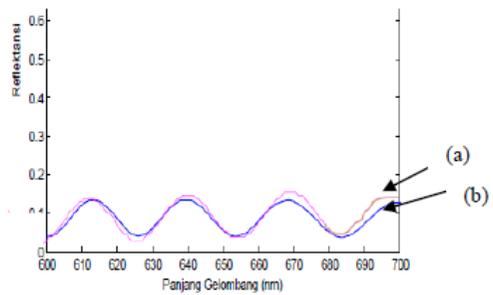
Dari Tabel (4.5), diperoleh fitting terbaik indeks bias film DR-1 untuk  $E=3,3$  MV/m adalah  $n=1,582$ .



(a)



(b)



Gambar (4.16). Spektrum film DR-1 untuk  $E=3,3$  MV/m:  
(a) hasil pengukuran, (b) simulasi.

Hasil akhir dari seluruh proses fitting untuk nilai indeks bias ( $n$ ) dari semua sampel dicantumkan dalam Tabel (4.6).

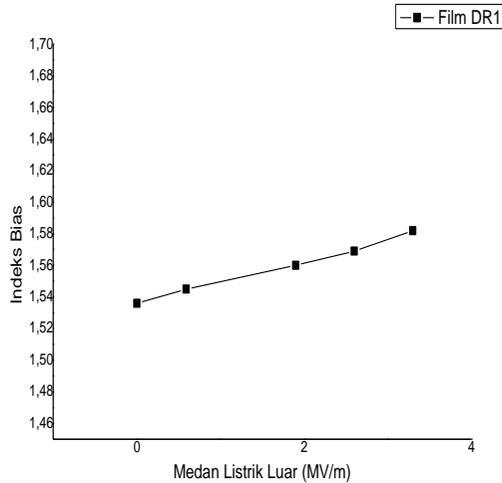
Tabel (4.6). Hasil fitting untuk penentuan indeks bias film DR-1 berdasarkan data Reflektometrik dengan indeks bias ITO  $n_2 = 1,800$ ; ketebalan ITO  $d_2 = 4000$  nm.

E (MV/m)	Indeks Bias Film DR1
0	1,536
0,59	1,545
1,9	1,560
2,6	1,569
3,3	1,582

Berdasarkan Tabel (4.6), dibuatlah grafik indeks bias film ( $n$ ) sebagai fungsi dari medan listrik dalam Gambar (4.17).

Dari hasil yang disajikan melalui Gambar (4.17), tampak adanya kenaikan nilai indeks bias ( $n$ ) secara monoton dengan peningkatan medan listrik yang diterapkan dalam proses deposisi. Hal ini sebagai akibat bertambahnya konsentrasi molekul-molekul DR-1 yang terdeposisi teratur paralel tegak lurus substrat dalam film dengan kenaikan medan

listrik. Hasil pengamatan ini sesuai dengan pengamatan yang telah dilaporkan sebelumnya (Li *et al.*, 2006).



Gambar (4.17). Indeks bias film DR-1 sebagai fungsi medan listrik luar



## DAFTAR PUSTAKA

- Billings, A. 1993. *Optics, Optoelectronics and Photonics, Engineering Principles and Applications*. New York: Prentice Hall.
- Griffiths, D.J. 1999. *Introduction to Electrodynamics*. New Jersey: Prentice Hall.
- Hidayat, R. 2006. *Pengukuran Karakteristik Lapisan Tipis Dengan Metoda Pemantulan Cahaya Jamak*. Modul EKSFIS 2. Bandung: KK Fisika Magnetik dan Fotonik FMIPA ITB.
- Li, X., Z. Cao, Q. Shen, Y. Yang. 2006. Influence of Dopant Concentration on Thermo-Optic Properties of PMMA composite. *Materials Letters* 60: 1238-1241.
- NanoCalc Manual versi 2.31. 2000. Mikropack
- Prasad, P.N. & Williams, D.J. 1991. *Introduction to Nonlinear Optical Effects in Molecules and Polymers*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Rowe, H.E. 1999. *Electromagnetic Propagation in Multi-Mode Random Media*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Wenas, D.R., R. Hidayat, H. Taunaumang, Herman, R.E. Siregar, M.O. Tjia. 2008. "Structural and spectroscopic study of aggregation effect in DR1 thin films deposited by E-PVD method". *Proc. ICMNS*. 978: 679-683.

Wenas, D. R. 2009. *Sifat Optik Film Tipis Molekul DR-1*. Bandung: UNPAD Press. ISBN: 978-979-3985-19-0.

Wenas, D.R., Herman, R.E. Siregar, M.O. Tjia. 2009. X-Ray Diffraction Pattern and Optical Properties of Disperse Red-1 Thin Films Deposited by Electric Field Assisted PVD Method. American Institute of Physics 978-0-7354-0797-8:349-352.

## INDEKS

### A

Absorpsi 5, 7, 9, 10, 14, 15, 23  
Amplitudo 6, 10, 13  
Atenuasi 5, 6, 7, 26

### C

Confinement 1

### D

DR-1 45, 46, 47, 50, 51, 52, 54, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67,  
68, 69, 71  
Dry processing 1

### E

EFA-PVD 45, 51  
Elektromagnetik 5, 6, 7, 10, 20, 23, 26, 27  
Elipsometri 2

### F

Forouhi-Bloomer 17  
Foton 1

### G

Growth 1

### H

Herve-Vandamme 17

## I

Indeks bias 2, 5, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 29, 36, 38, 40, 42, 43, 45, 50, 51, 53, 54, 57, 58, 60, 62, 64, 66, 68, 69  
ITO 40, 45, 46, 48, 51, 52, 53, 57, 58, 60, 62, 64, 66, 68

## K

Kramers-Kronig 8, 11  
Koefisien serapan 16

## L

Lorentz 12, 15, 20, 21

## M

Magnetic stirrer 46, 49  
Multilapis 38, 55, 56

## N

Nilai prinsipal 9  
NMP 46, 50  
Normal incidence 35  
NanoCalc 2, 3, 43, 44, 48, 50, 51, 53

## O

Optical properties 50, 72

## P

Powder 45

## R

Reflektansi 11, 18, 32, 34, 40, 41, 42, 43, 44, 55, 56, 57  
Reflektometer 2, 29, 43, 44, 48, 50, 51, 52

## S

SEM 54, 56

## **T**

Transverse Electric	32
Transverse Magnetic	29

## **W**

Wemple-DiDomenico	17
Wet processing	1

## **Z**

Zero field	58, 59
------------	--------



## TENTANG PENULIS

**Donny Royke Wenas**, lahir 10 Juni 1963 di Manado, Sulawesi Utara. Menyelesaikan studi S1 di Jurusan Fisika IKIP Manado, tahun 1986. Diangkat menjadi dosen Fisika tahun

1987 di IKIP Manado, kemudian lulus S2 di Jurusan Fisika Universitas Gadjah Mada tahun 1995. Penulis menyelesaikan Program Doktor MIPA-Fisika tahun 2010 di Fakultas Pascasarjana Universitas Padjadjaran, Bandung.

Hingga saat ini penulis bertugas sebagai staf pengajar di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Manado, dan membina mata kuliah Fisika Dasar, Fisika Modern, Fisika Matematika, Gelombang dan Mekanika Kuantum Molekul. Penulis pernah menjabat sebagai Sekretaris Program Studi Fisika tahun 2002 sampai 2004, dan Sekretaris Jurusan Fisika 2005 sampai 2006. Dalam bidang penelitian, penulis aktif melakukan kegiatan penelitian, memperoleh Hibah Pengajaran DUE-Like tahun 2003 dan 2004. Memperoleh Hibah Penelitian DUE-Like tahun 2002 dan 2003, selanjutnya memperoleh Hibah Penelitian Fundamental tahun 2006, Hibah Program Doktor tahun 2009, Hibah Bersaing tahun 2009 dan 2010 dari DP2M DIKTI. Penulis aktif dalam penulisan buku, buku pertama terbit tahun 2009 dengan judul: Sifat Optik Film Tipis Molekul DR-1, dan buku kedua terbit tahun 2010 dengan judul: Orbital Molekul. Sampai sekarang, penulis aktif melakukan penelitian dalam bidang Fabrikasi Film Tipis untuk aplikasi Divais Fotonik.

Menikah dengan Cyrke Bujung tahun 1989 dan memiliki dua orang putri, Iva dan Ivy. Ia tinggal bersama istri dan keluarga di Manado, Sulawesi Utara.