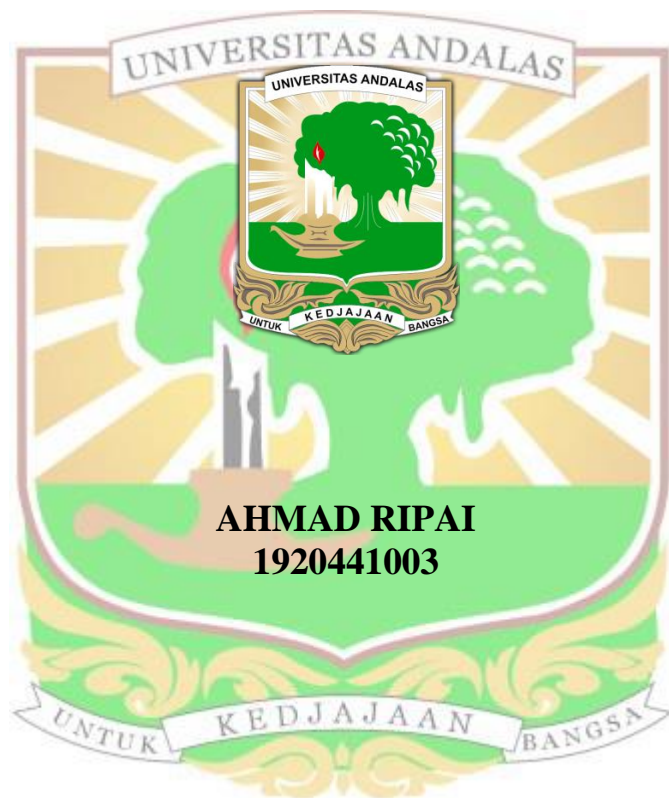


**APLIKASI METODE *SPLIT - STEP FOURIER*  
DALAM MENYELIDIKI SOLUSI *BRIGHT SOLITON*  
UNTUK KRISTAL FOTOREFRAKTIF**

**TESIS**



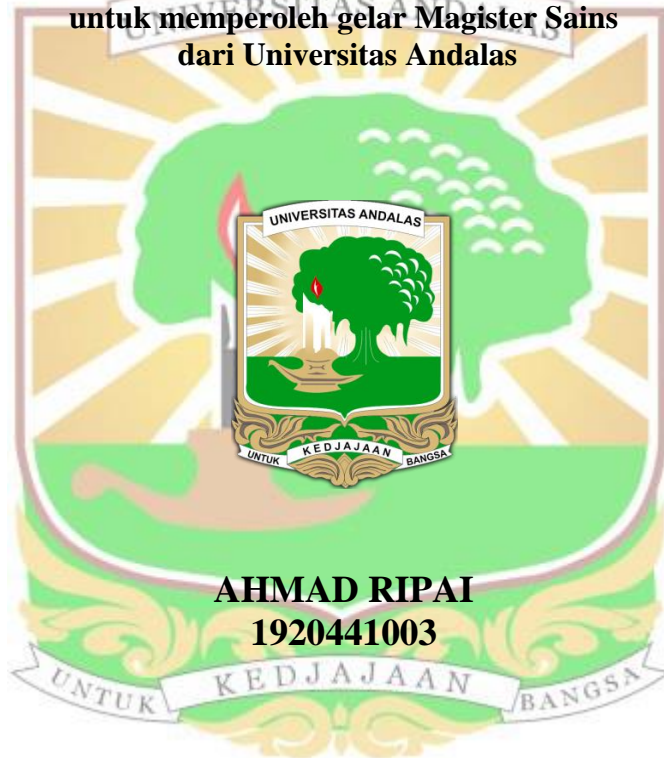
**PROGRAM PASCASARJANA  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS ANDALAS  
PADANG**

**2020**

**APLIKASI METODE *SPLIT - STEP FOURIER*  
DALAM MENYELIDIKI SOLUSI *BRIGHT SOLITON*  
UNTUK KRISTAL FOTOREFRAKTIF**

**TESIS**

**Karya tulis sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Magister Sains  
dari Universitas Andalas**



**AHMAD RIPAI  
1920441003**

**PROGRAM PASCASARJANA  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS ANDALAS  
PADANG**

**2020**

## PERSETUJUAN PEMBIMBING

**Judul Tesis** : Aplikasi Metode *Split-Step Fourier* Dalam  
Menyelidiki Solusi *Bright Soliton* Untuk Kristal  
Fotorefraktif  
**Nama** : Ahmad Ripai  
**Nomor Bp** : 1920441003

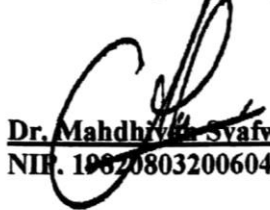
telah disetujui untuk diseminarkan pada tanggal 4 Mei 2020 oleh,

**Pembimbing Utama**




Dr. Zulfri, M.Si  
NIP. 196803031997031002

**Pembimbing Pendamping I**



Dr. Mahdhir Svaifwan  
NIP. 196208032006041001

**Pembimbing Pendamping II**



Dr. Wahyu Hidayat, M.Si  
NIP. 197701292010121001

## PERNYATAAN KEASLIAN NASKAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Ripai  
No. BP/NIM : 1920441003  
Jurusan/Program Studi : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dengan ini menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis dengan judul: **Aplikasi Metode *Split-step Fourier* Dalam Menyelidiki Solusi *Bright Soliton* Untuk Kristal Fotorefraktif** adalah benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bebas dari plagiat terhadap karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa dalam tesis ini terkandung ciri-ciri plagiat dan bentuk-bentuk peniruan lainnya yang dianggap melanggar peraturan, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana semestinya.



Padang, 4 Mei 2020

Yang membuat pernyataan,

(Ahmad Ripai)

**TESIS**

**APLIKASI METODE *SPLIT - STEP FOURIER*  
DALAM MENYELIDIKI SOLUSI *BRIGHT SOLITON*  
UNTUK KRISTAL FOTOREFRAKTIF**

disusun oleh:

**AHMAD RIPAI  
1920441003**

Telah dipertahankan di hadapan tim penguji  
pada tanggal 4 Mei 2020

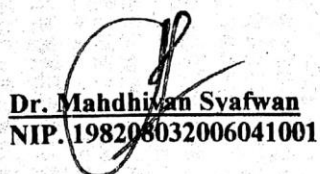
**Tim Penguji:**

**Pembimbing Utama,**



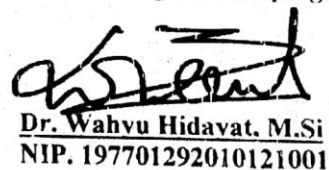
**Dr. Zulfi, M.Si  
NIP. 196803031997031002**

**Pembimbing Pendamping I,**



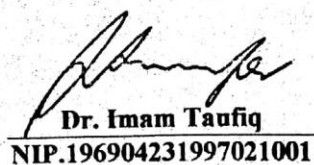
**Dr. Mahdhan Syafwan  
NIP. 198206032006041001**

**Pembimbing Pendamping II,**



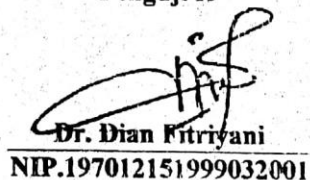
**Dr. Wahyu Hidavat, M.Si  
NIP. 197701292010121001**

**Penguji I**



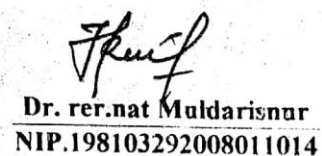
**Dr. Imam Taufiq  
NIP. 196904231997021001**

**Penguji II**



**Dr. Dian Fitriyani  
NIP. 197012151999032001**

**Penguji III**



**Dr. rer.nat Muldarisnar  
NIP. 198103292008011014**

# APLIKASI METODE *SPLIT - STEP FOURIER* DALAM MENYELIDIKI SOLUSI *BRIGHT* SOLITON UNTUK KRISTAL FOTOREFRAKTIF

## ABSTRAK

Soliton dalam kristal fotorefraktif telah diketahui eksis dan sekarang menjadi tren riset sains di era modern. Penelitian soliton dalam kristal fotorefraktif melibatkan berbagai disiplin ilmu, yang bekerja saling melengkapi antara teori, model dan eksperimen. Fisika memberikan landasan teori yang dapat digunakan untuk eksperimen. Dalam menyusun teori ini sangat sering dihadapkan pada problem matematis yang rumit, terutama saat menyelesaikan model persamaan dinamika soliton. Pada penelitian ini, metode numerik *split-step Fourier* telah sukses diaplikasikan ke dalam model dinamika *bright* soliton bergantung waktu dalam kristal fotorefraktif yang memiliki kedua efek elektro-optik linier dan kuadratik. Dari hasil perhitungan numerik, diperoleh *bright* soliton terbentuk pada keadaan *steady*, dan mengalami evolusi hingga akhirnya stabil. Kristal fotorefraktif ditemukan memiliki waktu respon ( $\tau \approx 2$ ) dalam membentuk soliton. Terakhir, efek elektro-optik ditemukan mempengaruhi kestabilan *bright* soliton.

Kata-kata kunci: bright soliton, kristal fotorefraktif, split-step Fourier

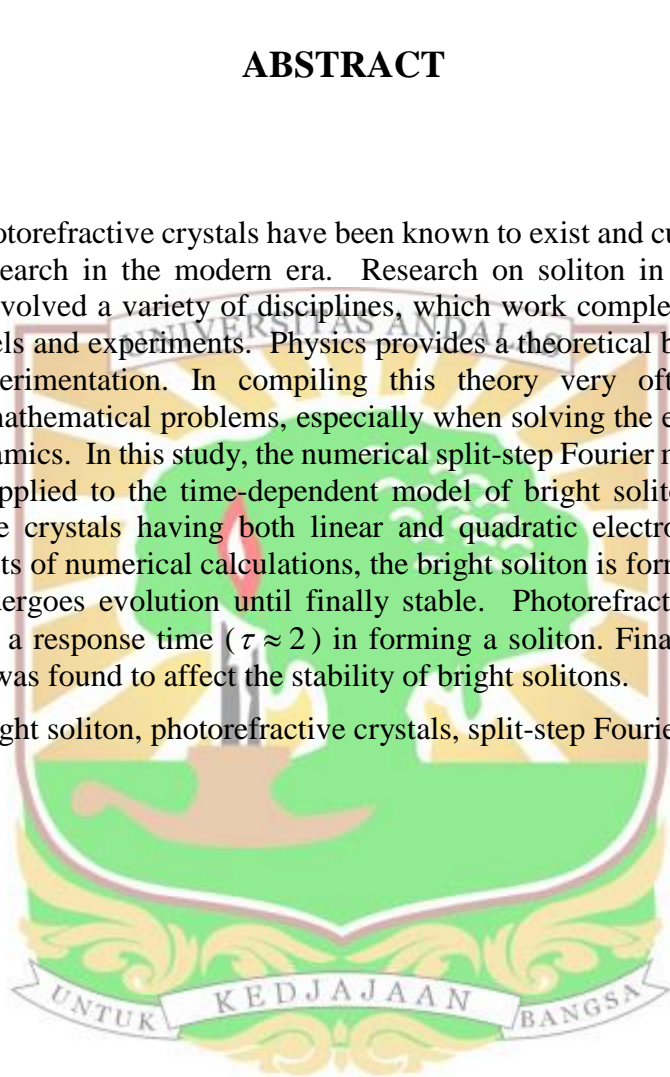


# APPLICATION OF THE SPLIT-STEP FOURIER METHOD ON INVESTIGATION OF THE BRIGHT SOLITON SOLUTION IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS

## ABSTRACT

Solitons in photorefractive crystals have been known to exist and currently become a trend of research in the modern era. Research on soliton in photorefractive crystals has involved a variety of disciplines, which work complementary among theories, models and experiments. Physics provides a theoretical basis that can be used for experimentation. In compiling this theory very often faced with complicated mathematical problems, especially when solving the equation models of soliton dynamics. In this study, the numerical split-step Fourier method has been successfully applied to the time-dependent model of bright soliton dynamics in photorefractive crystals having both linear and quadratic electro-optical effect. From the results of numerical calculations, the bright soliton is formed in a steady-state, and undergoes evolution until finally stable. Photorefractive crystals are found to have a response time ( $\tau \approx 2$ ) in forming a soliton. Finally, the electro-optical effect was found to affect the stability of bright solitons.

Keywords: bright soliton, photorefractive crystals, split-step Fourier



---Bacalah, dan Tuhanmulah Yang Maha Pemurah, Yang mengajar  
(manusia) dengan perantaraan kalam (pena/tulisan), Dia mengajar  
kepada manusia apa yang tidak diketahuinya---  
[QS. Al-'Alaq:3-5]



Dipersembahkan kepada orang tua terbaik,  
dan kesemua saudara tersayang,  
yang senantiasa memberikan warna kehidupan.



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini. Shalawat serta salam semoga tercurah kepada nabi Muhammad SAW yang telah membawa umatnya dari zaman kebodohan ke zaman yang penuh ilmu pengetahuan seperti saat ini.

Selesainya penulisan tesis ini tidak terlepas oleh bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan do'a dan dorongan yang sangat besar kepada penulis.
2. Bapak Dr. Zulfi, M.Si selaku pembimbing utama yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bimbingan, motivasi, semangat dan masukan dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan tesis ini.
3. Bapak Dr. Mahdhivan Syafwan selaku pembimbing pendamping I dari Jurusan Matematika Universitas Andalas yang telah banyak memberikan ilmu, meluangkan waktu diskusi seputar problem matematis dan algoritma penelitian, memberikan motivasi, semangat serta masukan dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan tesis ini.
4. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, M.Si selaku pembimbing pendamping II dari Institut Teknologi Bandung yang telah banyak memberikan ilmu, wawasan fisika, khususnya dalam bidang kajian teori soliton, optik nonlinier dan komputasi sistem nonlinier, meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, motivasi, semangat dan masukan dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan tesis ini.
5. Bapak Dr. Imam Taufiq, Bapak Dr.rer.nat.Muldarisnur dan Ibu Dr. Dian Fitriyani selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan kritik, arahan dan masukan sehingga penulisan tesis ini menjadi lebih baik.

6. Bapak Dr.rer.nat. Muldarisnur juga selaku ketua Jurusan Fisika Universitas Andalas yang telah memberikan kemudahan dan bantuan fasilitas selama masa perkuliahan, serta meluangkan waktu diskusi, memberikan motivasi dan membantu penulis dalam mendalami makna fisis penelitian.
7. Bapak Trengginas Eka Putra Sutantyo, M.Si selaku dosen kelompok kajian Fisika Teoritik Universitas Andalas yang ikut meluangkan waktu diskusi, dan memberikan banyak ide bagi penulis dalam menghadapi problem-problem penelitian.
8. Seluruh jajaran tinggi Jurusan, Fakultas dan Kampus Universitas Andalas yang telah memberikan kesempatan kepada penulis melanjutkan studi Magister Fisika melalui program *Fast Track* Sarjana-Magister Universitas Andalas mulai tahun 2018.
9. Kakak-kakak program Magister Fisika angkatan 2018, dan teman-teman *Fast Track* Sarjana-Magister Universitas Andalas angkatan 2019 atas segala bantuannya.
10. Dan semua pihak yang membantu penulis untuk menyelesaikan studi di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar tesis ini menjadi lebih baik. Mudah-mudahan tesis ini dapat bermanfaat baik bagi penulis maupun pembaca.



Padang, Mei 2020

Ahmad Ripai

# DAFTAR ISI

	halaman
<b>PERNYATAAN KEASLIAN NASKAH</b> .....	i
<b>ABSTRAK</b> .....	ii
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iv
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	x
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xi
<b>DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG</b> .....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	4
I.3 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian.....	4
<b>BAB II LANDASAN TEORI</b> .....	5
II.1 Sejarah dan Karakteristik Soliton.....	5
II.1.1 Sejarah Soliton.....	5
II.1.2 Karakteristik Soliton.....	7
II.2 Model Matematis Soliton.....	8
II.3 Soliton Dalam Medium Optik Tidak Linier .....	9
II.4 Penurunan Persamaan Schrödinger Tidak Linier .....	11
II.4.1 Model Matematis dari Propagasi Medan Elektromagnetik .....	11
II.4.2 Persamaan Schrödinger Tidak Linier-Model I .....	16
II.4.3 Persamaan Schrödinger Tidak Linier-Model II.....	17
II.5 Solusi Analitik Persamaan Schrödinger Tidak Linier .....	19
II.5.1 Solusi Model I (Solusi <i>temporal</i> Soliton).....	20
II.5.2 Solusi Model II (Solusi <i>spatial</i> Soliton).....	24
II.6 Efek Fotorefraktif .....	25

II.7	<i>Benchmarking Metode Split-Step Fourier</i> .....	28
II.7.1	<i>Initial Condition</i> – Pulsa Secan-Hiperbolik.....	31
II.7.2	<i>Initial Condition</i> – Pulsa Gaussian .....	32
II.7.2	Tingkat Akurasi Metode <i>Split-Step Fourier</i> .....	33
<b>BAB III</b>	<b>METODE PENELITIAN</b> .....	34
III.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	34
III.2	Teknik Penelitian.....	34
<b>BAB IV</b>	<b>FORMULASI MATEMATIS DAN NUMERIK</b> .....	37
IV.1	Persamaan Propagasi <i>Envelope</i> Dalam Kristal Fotorefraktif .....	37
IV.2	Persamaan Dinamika <i>Bright Soliton</i> Dalam Kristal Fotorefraktif .....	39
IV.3	Formulasi Numerik.....	42
IV.4	Algoritma.....	45
<b>BAB V</b>	<b>HASIL DAN ANALISIS PERHITUNGAN NUMERIK</b> .....	46
V.1	Profil <i>Bright Soliton</i> .....	46
V.2	Perilaku <i>Temporal Bright Soliton</i> .....	49
V.2	Efek Elektro-Optik Linier dan Kuadratik.....	52
<b>BAB VI</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	55
VI.1	Kesimpulan.....	55
VI.2	Saran.....	55
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	56
<b>LAMPIRAN</b>	.....	60



## DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar II.1	Pulsa soliton ..... 7
Gambar II.2	Profil <i>temporal</i> soliton ..... 23
Gambar II.3	Profil <i>spatial</i> soliton..... 24
Gambar II.4	Presentasi skematis dari efek fotorefraktif..... 26
Gambar II.5	Ilustrasi metode <i>split-step Fourier</i> : pengaruh dispersi dan ketidaklinieran secara simetri bergantian di sepanjang <i>fiber</i> . .... 29
Gambar II.6	Profil pulsa sech: (a) $L_D = 10$ ; $\beta_2 = 1$ ; $N = 1$ , (b) $L_D = 10$ ; $\beta_2 = -1$ ; $N = 1$ , dan (c) $L_D = 10$ ; $\beta_2 = -1$ ; $N = 2$ ..... 31
Gambar II.7	Profil pulsa gaussian: (a) $L_D = 10$ ; $\beta_2 = 1$ ; $N = 1$ , (b) $L_D = 10$ ; $\beta_2 = -1$ ; $N = 1$ , dan (c) $L_D = 10$ ; $\beta_2 = -1$ ; $N = 2$ ..... 32
Gambar II.8	Solusi analitik vs solusi numerik..... 33
Gambar III.1	Bagan tahapan penelitian ..... 34
Gambar V.1	Formasi <i>bright</i> soliton: profil <i>normalized intensity</i> saat $\tau = 0.15$ , $\tau = 1.5$ , dan $\tau = 5$ ..... 48
Gambar V.2	Variasi soliton <i>width</i> (FWHM) dari <i>bright</i> soliton dengan evolusi waktu $\tau$ ..... 51
Gambar V.3	Variasi soliton <i>width</i> (FWHM) dari <i>bright</i> soliton dengan evolusi waktu $\tau$ ketika salah satu dari efek elektro-optik saling mendominasi ..... 53

## DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel II.1 Model matematis soliton.....	8
Tabel IV.1 Parameter-parameter fisis terkait kristal fotorefraktif PMN-0.33PT45	



## DAFTAR LAMPIRAN

	halaman
<b>Lampiran A</b>	
Skema pendukung .....	60
<b>A.1</b> <i>Centrosymmetric</i> dan evolusi keadaan polarisasi dalam <i>fiber</i> ....	60
<b>A.2</b> Modulasi SPM ( <i>self-phase modulation</i> ).....	60
<b>A.3</b> Kombinasi efek linier difraksi dan pemfokusan diri ( <i>self-focusing</i> ).....	61
<b>A.4</b> Skema fotokonduktivitas.....	61
<b>A.5</b> Gambaran hasil penelitian Katti tahun 2019 .....	62
<b>A.6</b> <i>Full Width at Half Maximum</i> (FWHM) .....	63
<b>Lampiran B</b>	
<i>Code</i> MATLAB .....	64
<b>B.1</b> Solusi analitik persamaan Schrödinger tidak linier.....	64
<b>B.2</b> Solusi numerik persamaan Schrödinger tidak linier .....	65
<b>B.3</b> Solusi analitik vs numerik persamaan Schrödinger tidak linier.	66
<b>B.4</b> Solusi numerik persamaan dinamika <i>bright</i> soliton.....	67



## DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
PMN-0.33PT	<i>Lead Magnesium Niobate with 33 mol % Lead Titanate</i>	3
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>	4
KdV	<i>Korteweg de Vries</i>	6
LIPI	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia	8
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>	9
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>	28
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i>	30
<b>LAMBANG</b>		
<b>E</b>	Vektor medan listrik	11
<b>H</b>	Vektor medan magnet	11
<b>D</b>	Vektor kerapatan fluks listrik	11
<b>B</b>	Vektor kerapatan fluks magnet	11
<b>J</b>	Vektor kerapatan arus	11
$\rho_f$	Kerapatan muatan bebas	11
$\epsilon_0$	Permitivitas vakum	12
$\mu_0$	Permeabilitas vakum	12
<b>P</b>	Polarisasi listrik	12
<b>M</b>	Magnetisasi	12
$\nabla^2 \mathbf{E}$	Laplacian <b>E</b>	12
$\partial t$	Diferensial terhadap waktu	12
$c$	Kecepatan cahaya	12
$\chi \{ \chi^{(1)}, \chi^{(2)}, \chi^{(3)}, \dots \}$	Suseptibilitas magnetik {orde 1,2,3,dst.}	13





LAMBANG	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
$\varepsilon_0 \chi^{(1)} \cdot \mathbf{E}$	Komponen polarisasi linier	13
$\varepsilon_0 \chi^{(3)} \cdot  \mathbf{E} ^2 \mathbf{E}$	Komponen polarisasi tidak linier	13
$\mathbf{P}_L$	Polarisasi linier	13
$\mathbf{P}_{NL}$	Polarisasi tidak linier	13
$\omega$	Representasi frekuensi	14
$\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, \omega)$	Transformasi Fourier dari $\mathbf{E}$ ke dalam domain frekuensi	14
$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$	$\mathbf{E}$ dalam domain waktu	14
$\varepsilon(\omega)$	Konstanta dielektrik	14
$n\{n_1, n_2\}$	Indeks bias bahan {linier, tidak linier}	14
$\alpha$	Parameter <i>optical losses</i> atau atenuasi <i>fiber optik</i>	15
$k$	Bilangan gelombang atau konstanta propagasi	15
$\beta_0$	Konstanta propagasi	16
$A$	Fungsi amplitudo <i>envelope</i>	16
$\gamma$	Parameter tidak linier	17
$\beta_2$	Parameter dispersi	17
$I$	Intensitas berkas optik	18
$\partial^2 A / \partial z^2$	Representasi dari percepatan <i>envelope</i>	19
$\partial A / \partial z$	Representasi dari kecepatan <i>envelope</i>	19
$U$	Fungsi amplitudo <i>envelope</i> dalam <i>dimensionless</i>	20
$N$	Parameter tidak linier dalam <i>dimensionless</i>	20
$L_D$	Panjang daerah yang dikenai sifat dispersi dalam <i>dimensionless</i>	20

LAMBANG	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
$L_{NL}$	Panjang daerah yang dikenai sifat tidak linier dalam <i>dimensionless</i>	21
$\xi$	Representasi dari arah perambatan ( <i>spatial</i> ) berkas optik atau <i>envelope</i> dalam <i>dimensionless</i>	21
$\tau$	Representasi dari waktu perambatan ( <i>temporal</i> ) berkas optik atau <i>envelope</i> dalam <i>dimensionless</i>	21
$\zeta$	Representasi dari arah difraksi berkas optik atau <i>envelope</i> dalam <i>dimensionless</i>	24
$\hat{D}$	Operator linier {dispersi, difraksi}	28
$\hat{N}$	Operator tidak linier	28
$\lambda_0$	Panjang gelombang dalam vakum	37
$n_e$	Indeks bias <i>unperturbed</i> (tanpa gangguan)	37
$n_e'$	Indeks bias <i>perturbed</i> (gangguan)	38
$r_{eff}$	Koefisien efek elektro-optik linier	38
$g_{eff}$	Koefisien efek elektro-optik kuadratik	38
$\epsilon_r$	Permittivitas bahan	38
$\beta$	Generasi <i>dark-carrier</i>	39
$S_i$	Tampang-lintang fotoionisasi ( <i>cross section photoionization</i> )	39
$e$	Muatan (elektron)	40
$\mu$	Mobilitas electron	40
$K_B$	Konstanta Boltzman's	40
$N_D$	Konsentrasi donor	40
$N_A$	Konsentrasi akseptor	40
$N_D^+$	Konsentrasi donor terionisasi	40

LAMBANG	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
$T$	Temperatur mutlak	40
$\beta_1$	Koefisien efek elektro-optik linier dalam <i>dimensionless</i>	42
$\beta_2$	Koefisien efek elektro-optik kuadratik dalam <i>dimensionless</i>	42

