



**PENGARUH WAKTU ANNEALING TERHADAP
STRUKTUR KRISTAL DAN MORFOLOGI FILM
TIPIS ZINC OXIDE DOPING GALIUM DENGAN
METODE DC MAGNETRON SPUTTERING**

Skripsi
disusun sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika

oleh :

Lana Khanifah

4211414029

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2018**

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan perundang-undangan.

Semarang, 31 Oktober 2018



Lana Khanifah
NIM 4211414029

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke Sidang Panitia Ujian Skripsi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Pembimbing I,



Dr. Putut Marwoto, M.S.
NIP 196308211988031004

Semarang, 19 Oktober 2018
Pembimbing II,



Dr. Sulhadi, M.Si.
NIP 197108161998021001

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Pengaruh Waktu *Annealing* terhadap Struktur Kristal dan Morfologi Film
Tipis Zinc Oxide Doping Gallium dengan Metode DC Magnetron
Sputtering

disusun oleh

Lana Khanifah

4211414029

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada
Rabu, 31 Oktober 2018.

Panitia,
Ketua,



Prof. Dr. Sudarmji, M.Si.
NIP 196601231992031003

Ketua Pengaji,

Dr. Budi Astuti, M.Sc.
NIP 197902162005012001

Anggota Pengaji /
Pembimbing I

Dr. Putut Marwoto, M.S.
NIP 196308211988031004

Sekretaris,

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.
NIP 196807141996031005

Anggota Pengaji /
Pembimbing II

Dr. Sulhadi, M.Si.
NIP 197108161998021001

MOTTO

“Maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain). Dan hanya kepada Tuhanmulah engkau berharap”. (Q.S. Al Insyirah : 7-8)

PERSEMBAHAN

Teruntuk Allah SWT
yang tercinta, Bapak, Ibu, Kakak
yang terkasih, Sahabat, dan Teman-teman
Almamater saya serta
Seluruh Saintis Indonesia

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas berkat dan rahmat Allah SWT, serta sholawat kepada junjungan Nabi Muhammad SAW sehingga penulis mampu menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Pengaruh Waktu Annealing terhadap Struktur Kristal dan Morfologi Film Tipis Zinc Oxide Doping Galium dengan Metode DC Magnetron Sputtering”.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak berupa saran, bimbingan, maupun bantuan dalam bentuk lain. Maka perkenankan penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum. selaku Rektor Universitas Negeri Semarang
2. Prof. Dr. Sudarmin, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang
3. Dr. Suharto Linuwih, M.Si. selaku Ketua Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang
4. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Negeri Semarang sekaligus dosen wali yang telah memberikan saran, arahan, dan motivasi kepada penulis selama proses perkuliahan
5. Dr. Putut Marwoto, M.S. selaku pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran kepada penulis selama penyusunan skripsi
6. Dr. Sulhadi, M.Si. selaku pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran kepada penulis selama penyusunan skripsi
7. Dr. Budi Astuti, M.Sc. selaku penguji skripsi yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran kepada penulis dalam penyusunan skripsi
8. Dr. Sugianto, M.Sc., dan Drs. Ngurah Made Dharma Putra, M.Si., Ph.D. selaku pembimbing Laboratorium Film Tipis Fisika Universitas Negeri Semarang
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Fisika yang telah memberikan ilmu selama masa perkuliahan sebagai bekal penulis dalam penyusunan skripsi ini
10. Mas Agus Andi Wibowo, S.Si., Bapak Muttaqin, S.Si., Ibu Natalia Erna S., S.Pd., dan Bapak Teguh Darsono, Ph.D. atas segala masukan, saran, dan bantuan kepada penulis

11. Seluruh crew Laboratorium Film Tipis, Ida, Nura, Rini, Aldi yang senantiasa bekerjasama serta memberikan motivasi dan hiburan selama penelitian
12. Teman-teman Fisika angkatan 2014 dan Hima Fisika 2014 yang telah membersamai dan menjadi cerita indah di bangku perkuliahan
13. Keluarga Family Kos yang telah memberikan kehangatan sebuah rumah selama empat tahun terakhir
14. Penjual bakso mini dan makanan di sekitar kampus FMIPA UNNES yang telah berkontribusi sebagai penyuplai energi selama penelitian
15. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu dan memberikan dukungan berupa moral dan spiritual.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penulis menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Semoga laporan skripsi ini dapat menambah pengetahuan dan memberikan manfaat

Semarang, 31 Oktober 2017

Penulis

ABSTRAK

Khanifah, L. 2018. *Pengaruh Waktu Annealing terhadap Struktur Kristal dan Morfologi Film Tipis Zinc Oxide Doping Gallium dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Dr. Putut Marwoto, M.S. dan Pembimbing Pendamping Dr. Sulhadi, M.Si.

Kata kunci : ZnO:Ga, Sputtering, Waktu annealing, Struktur kristal, Morfologi

Film tipis Zinc oxide doping Gallium (ZnO:Ga) telah berhasil ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering diatas substrat *corning glass*. Film ditumbuhkan pada daya plasma 35 Watt, tekanan gas Argon 500 mtorr, dan temperatur substrat 300 °C selama satu jam. Selanjutnya *treatment annealing* dilakukan dengan variasi waktu 20, 30, 40, 50, 60, dan 70 menit. Pengaruh waktu *annealing* terhadap struktur kristal film tipis ZnO:Ga diteliti dengan karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD), morfologi film diteliti dengan karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM), serta unsur dan ikatan penyusun film dengan karakterisasi *Energy Dispersive X-ray* (EDX) dan *Fourier Transform Spectroscopy* (FTIR). Hasil karakterisasi XRD film tipis ZnO:Ga menunjukkan bahwa film memiliki struktur *wurzite* heksagonal monokristalin dengan orientasi bidang (002). Pemberian waktu *annealing* yang berbeda pada film tipis ZnO:Ga mampu memperbaiki struktur kristal dan hasil optimum diperoleh pada waktu *annealing* 30 menit. Citra SEM menunjukkan bahwa penambahan waktu *annealing* pada rentang waktu 20 hingga 40 menit mengakibatkan morfologi film tipis ZnO:Ga lebih rata dengan ukuran butir yang homogen. Morfologi film mengalami penurunan kualitas pada waktu *annealing* pada rentang waktu 40 hingga 70 menit. Hal ini dikarenakan kerusakan struktur kristal akibat *annealing* yang terlalu lama. Karakterisasi film tipis menggunakan EDX menunjukkan bahwa unsur penyusun film adalah seng (Zn), gallium (Ga), dan oksigen (O). Kandungan unsur O pada film tipis ZnO:Ga menurun seiring dengan semakin lama waktu *annealing* yang dilakukan pada rentang waktu 20 hingga 40 menit, dan meningkat pada rentang waktu *annealing* 40 hingga 70 menit. Dalam hasil karakterisasi FTIR ditemukan adanya vibrasi ikatan Zn-O pada film tipis ZnO:Ga waktu annealing 20 menit hingga 60 menit, dan vibrasi ikatan Ga-O pada film waktu *annealing* 30, 40, 60, dan 70 menit. Peningkatan waktu *annealing* mengakibatkan intensitas puncak absorpsi Zn-O menurun, sedangkan puncak absorpsi Ga-O meningkat.

ABSTRACT

Khanifah, L. 2018. *Influence of Annealing Time to the Crystal Structure and Morphology of Zinc Oxide Doping Gallium Thin Film by DC Magnetron Sputtering Method.* Skripsi, Department of Physics, Faculty of Mathematics and Science, Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia. First Advisor Dr. Putut Marwoto, M.S. dan Second Advisor Dr. Sulhadi, M.Si.

Kata kunci : ZnO:Ga, Sputtering, Annealing time, Crystal structure, Morphology

Gallium doped zinc oxide (ZnO:Ga) thin film were deposited by DC Magnetron Sputtering onto corning glass substrates. Film were deposited on 35 Watt, Argon pressure 500 mtorr, and substrate temperature 300 °C during an hour. Treatment annealing on 350 °C have been variation by annealing time at 20, 30, 40, 50, 60, and 70 minutes. Effect of annealing time on the crystal structure of ZnO:Ga film was investigated by *X-Ray Diffraction* (XRD), morphology of film by *Scanning Electron Microscopy* (SEM), element contains by Energy Dispersive X-ray (EDX), and constituent chemical bond by *Fourier Transform Spectroscopy* (FTIR). The result of XRD characterization shows that ZnO:Ga has a wurtzite hexagonal monocrystalline structure with an orientation at (002) plane. The difference of annealing time of ZnO:Ga thin film afford to improve the crystal structure. The optimum result is film with annealing time on 30 minutes. According to SEM characterization, increasing of annealing time on 20 minutes to 40 minutes was make a dense structure and homogenous grain size. Film morphology was decreased with increasing of annealing time on 40 minutes to 70 minutes because the longer annealing time make a structure of film was corrupted. The EDX results confirmed that ZnO:Ga thin films contain elements of zinc (Zn), gallium (Ga), and oxygen (O). Content of O element was decrease along the annealing time on 20 to 40 minutes, and then increase along 40 to 70 minutes. Due to the FTIR spectra, the bonding vibration of Zn-O was found on the film by annealing time on 20 to 60 minutes and the bonding vibration of Ga-O on the film by annealing time 30, 40, 60, and 70 minutes. The increasing of annealing time will be decreased absorption peak intensity of Zn-O bond and the absorption peak intensity of Ga-O was increased.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN.....	ii
PERSETUJUAN PEMBIMBING	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Zinc Oxide (ZnO).....	6
2.2 <i>Gallium Oxide (Ga₂O₃)</i>	8

2.3 DC Magnetron Sputtering	9
2.4 Sel Surya	11
2.5 <i>Transparant Conducting Oxide</i> (TCO)	14
2.6 ZnO doping Ga.....	16
BAB III METODE PENELITIAN.....	18
3.1 Pembuatan Sampel	18
3.1.1 Pembuatan Target	18
3.1.2 Preparasi Substrat	19
3.1.3 Deposisi Film.....	19
3.1.4 <i>Treatment Annealing</i>	20
3.2 Karakterisasi Sampel.....	21
3.2.1 X-Ray Diffraction (XRD).....	21
3.2.2 SEM-EDX.....	25
3.2.3 <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR) <i>Spectroscopy</i>	25
3.3 Diagram Alir Penelitian	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Hasil Penelitian	28
4.1.1 Analisis Data <i>X-Ray Difraction</i> (XRD)	28
4.1.2 Analisis Data <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive X-ray</i> (EDX)	33

4.1.3 Analisis Data FTIR	38
4.2 Pembahasan.....	41
BAB V PENUTUP.....	48
5.1 Simpulan.....	48
5.2 Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat dan karakterisasi ZnO	6
Tabel 3.1 Parameter deposisi film tipis ZnO:Ga	20
Tabel 4.1 Hasil analisis posisi puncak difraksi XRD film tipis ZnO:Ga	30
Tabel 4.2 Hasil analisis nilai FWHM, ukuran kristalit, strain, stress, dan kerapatan dislokasi	32
Tabel 4.3 Data koefisien tekstur dan derajat orientasi film tipis ZnO:Ga	33
Tabel 4.4 Kandungan unsur pada sampel film tipis ZnO:Ga(2%)	37
Tabel 4.5 Hasil analisis spektrum FTIR sampel film tipis ZnO:Ga	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Struktur kristal ZnO (a) <i>rocksalt</i> kubik, (b) <i>zincblende</i> kubik, (c) <i>wurtzite</i> heksagonal. Bulatan abu-abu dan hitam secara berturut-turut merepresentasikan atom Zn dan O	7
Gambar 2.2. Proses <i>sputtering</i> pada permukaan target.	10
Gambar 2.3. Skema sistem kerja DC Magnetron Sputtering	11
Gambar 2.4. <i>p-n junction</i> pada sel surya	12
Gambar 2.5 Struktur Lapisan Film Tipis Sel Surya	14
Gambar 2.6 Skema konfigurasi sel surya berbasis film tipis	16
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian ZnO:Ga	27
Gambar 4.1 Spektrum XRD film tipis ZnO:Ga variasi waktu <i>annealing</i>	29
Gambar 4.2 Citra SEM film tipis ZnO:Ga variasi waktu <i>annealing</i> (a) 20 menit, (b) 30 menit, (c) 40 menit, (d) 50 menit, (e) 60 menit, dan (f) 70 menit.	34
Gambar 4.3 Spektrum EDX film tipis ZnO:Ga dengan variasi waktu <i>annealing</i> (a) 20 menit, (b) 30 menit, (c) 40 menit, (d) 50 menit, (e) 60 menit, dan (f) 70 menit.	36
Gambar 4.4 Spektrum FTIR film tipis ZnO:Ga variasi waktu <i>annealing</i>	39

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Referensi JCPDS Nomor 36-1451	57
Lampiran 2. Perhitungan nilai <i>d-spacing</i>	58
Lampiran 3. Perhitungan nilai parameter kisi-c	60
Lampiran 4. Perhitungan FWHM	62
Lampiran 5. Perhitungan nilai strain	66
Lampiran 6. Perhitungan nilai stress	68
Lampiran 7. Perhitungan ukuran kristal	70
Lampiran 8. Perhitungan nilai kerapatan dislokasi	72
Lampiran 9. Perhitungan nilai derajat orientasi	74
Lampiran 10. Perhitungan nilai koefisien tekstur	77

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi adalah sebuah pengetahuan yang ditujukan untuk menciptakan alat, tindakan pengolahan, dan ekstraksi benda (Merriam-Webster dictionary). Teknologi juga merupakan aplikasi dari sains untuk memecahkan suatu permasalahan dalam kehidupan manusia. Seiring dengan perkembangan zaman, teknologi dibuat dalam bentuk yang lebih praktis, berukuran kecil, namun memiliki kemampuan yang canggih (Seshan, 2002 : 7). Untuk memperoleh teknologi semacam ini diperlukan sebuah material yang mampu mendukung hal tersebut. Salah satu material yang banyak diteliti dan dikembangkan adalah material film tipis.

Film tipis merupakan lapisan material yang memiliki ukuran beberapa nanometer hingga 100 mikrometer atau ketebalan yang berukuran beberapa atom yang ditumbuhkan pada sebuah permukaan substrat (Hughes, 2014). Material ini pada umumnya bersifat transparan terhadap rentang cahaya tertentu dan mengabsorpsi sebagian yang lainnya (Macleod, 2017). Aplikasi material film tipis telah banyak dikembangkan dalam berbagai hal, seperti fabrikasi pada komponen elektronik, tampilan peralatan elektronik (seperti LCD, LED, dan lain-lain), *optical coating*, dan peralatan penyimpan data, baik berbasis optik maupun magnetik (Seshan, 2002 : 29-30).

Optical coating dibuat dengan cara mendeposikan satu atau lebih lapisan tipis yang dikombinasikan dengan tujuan untuk mengubah sifat fisis dan sifat optik material tersebut sesuai dengan kebutuhan (Greivenkamp, 2015). Salah satu material ini adalah *Transparent Conducting Oxide* (TCO). TCO merupakan material semikonduktor dengan karakteristik konduktivitas listrik yang tinggi, transparansi yang baik pada spektrum cahaya tampak dan daerah mendekati infra merah, serta reflektansi yang baik pada daerah infra merah (Ikhmayies, 2017). Dikarenakan karakteristik inilah, maka material TCO dapat diaplikasikan sebagai teknologi *window layer* pada sel surya. Salah satu bahan TCO yang populer dimanfaatkan adalah *Indium Tin Oxide* (ITO). Namun, bahan ITO termasuk bahan yang mahal dan relatif langka, sehingga banyak peneliti mulai mengembangkan material baru yaitu *Zinc Oxide* (ZnO) (Sulhadi *et. al.*, 2015).

Zinc Oxide (ZnO) merupakan bahan semikonduktor yang memiliki energi ikat tinggi sebesar 60 MeV (Sulhadi *et. al.*, 2015), *direct band gap* cukup besar sekitar 3,37 eV (Young *et. al.*, 2017). Selain itu ZnO juga memiliki biaya fabrikasi yang relatif rendah dan merupakan bahan non-toksik (Young *et. al.*, 2017). Namun pada lingkungan korosif, ZnO bersifat kurang stabil dan memiliki sifat listrik yang kurang baik karena memiliki konsentrasi pembawa muatan yang rendah (Buyanova *et. al.*, 2009).

Pendopingan bertujuan untuk meningkatkan sifat konduktivitas, mobilitas elektron, transparansi, dan stabilitas pada film ZnO (Novita *et. al.*, 2017). Pemberian doping unsur-unsur golongan IIIA seperti Boron (B), Indium (In), Aluminium (Al) dan Galium (Ga) pada ZnO akan meningkatkan stabilitas dan

konduktivitas listrik hingga berorde $10^5 \Omega\text{cm}$ (Mahadik *et. al.*, 2014; Amara & Mohamed, 2014), serta meningkatkan sifat optik film seperti transmitansi cahaya lebih dari 80% (Chen *et. al.*, 2015). Di antara bahan doping tersebut, galium (Ga) dinilai sebagai bahan yang paling menjanjikan karena Ga memiliki jari-jari atom yang hampir sama dengan Zn, dan konduktivitas yang lebih baik dari aluminium (Li *et. al.*, 2009), serta merupakan bahan yang kurang reaktif dan tahan terhadap oksidasi (Sulhadi *et. al.*, 2015). Film tipis ZnO dengan doping Ga menunjukkan konsentrasi yang lebih tinggi, mobilitas pembawa, dan kestabilan termal yang lebih baik dibandingkan tanpa doping (Kim *et. al.*, 2010).

Sifat-sifat film tipis dapat dioptimalkan sesuai dengan pengaplikasiannya dengan mengubah-ubah struktur film tipis. Film tipis dengan struktur kristal yang berbeda, juga akan menghasilkan perbedaan pada sifat optik dan sifat listrik film tipis. Oleh karena itu, perbedaan perlakuan pada film tipis harus diperhatikan agar menghasilkan struktur film yang sesuai dengan tujuan pengaplikasiannya.

Pembuatan film tipis ZnO:Ga dapat dilakukan dengan berbagai macam teknik deposisi, seperti teknik *sputtering* (Yoshino *et.al.*, 2014), *Pulsed Laser Deposition* (PLD) (Noh *et. al.*, 2016), *Spray Pyrolysis* (Maller *et. al.*, 2013), sol-gel (Chen *et. al.*, 2015), evaporasi (Yu *et. al.*, 2015), elektrolisis (Su *et. al.*, 2016), dan *Chemical Vapour Deposition* (CVD) (Chen *et. al.*, 2014). Dalam penelitian ini telah dilakukan penumbuhan film tipis ZnO:Ga dengan teknik *sputtering* yaitu dengan menggunakan alat DC *Magnetron Sputtering*. Teknik ini dipilih karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan teknik lainnya, yaitu dapat dioperasikan dalam temperatur rendah, menghasilkan film dengan kualitas baik (Sahu *et. al.*,

2015), proses deposisi yang sederhana, dan biaya yang relatif murah (Fatiatun, 2015), serta alat tersebut tersedia di Laboratorium Fisika FMIPA UNNES.

Penelitian DC Magnetron Sputtering di Laboratorium Fisika FMIPA UNNES telah berhasil menumbuhkan film tipis dengan variasi konsentrasi doping Ga_2O_3 (Suprayogi, 2014), suhu deposisi (Fatiatun, 2015), tekanan gas oksigen pada saat deposisi (Faizal, 2016), dan temperature *annealing* (Usriyah, 2016). Pada penelitian ini telah dilakukan pembuatan film tipis ZnO:Ga dengan variasi waktu *annealing* untuk mendapatkan struktur kristal dan morfologi film tipis yang optimum untuk diaplikasikan sebagai *window layer* sel surya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dituliskan, permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini adalah :

- 1) Bagaimana pengaruh waktu *annealing* terhadap struktur kristal film ZnO:Ga?
- 2) Bagaimana pengaruh waktu *annealing* terhadap morfologi film ZnO:Ga?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

- 1) Mengetahui pengaruh waktu *annealing* terhadap struktur kristal film tipis ZnO:Ga.
- 2) Mengetahui pengaruh waktu *annealing* terhadap morfologi film tipis ZnO:Ga.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah dapat menunjukkan kajian mengenai pengaruh suhu *annealing* ZnO:Ga, sehingga dapat diperoleh film tipis dengan struktur kristal dan morfologi yang optimal untuk diaplikasikan sebagai bahan *window layer* sel surya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Zinc Oxide (ZnO)

Zinc Oxide (ZnO) merupakan bahan semikonduktor tipe-n paduan unsur dari golongan II dan VI antara logam dan oksida. Bahan ini berbentuk serbuk putih, tidak larut dalam air namun larut dalam zat asam dan basa. ZnO memiliki titik lebur sebesar 1.975 °C (Sagari, *et. al.*, 2016), konsentrasi pembawa muatan yang tinggi (Saleem *et. al*, 2011), stabilitas termal yang baik, energi ikat eksitasi sebesar 60 MeV, serta *direct bandgap* yang lebar sebesar 3,37 eV pada temperatur ruang (Young *et. al.*, 2017). Sifat dan karakterisasi ZnO ditunjukkan pada Tabel 2.1.

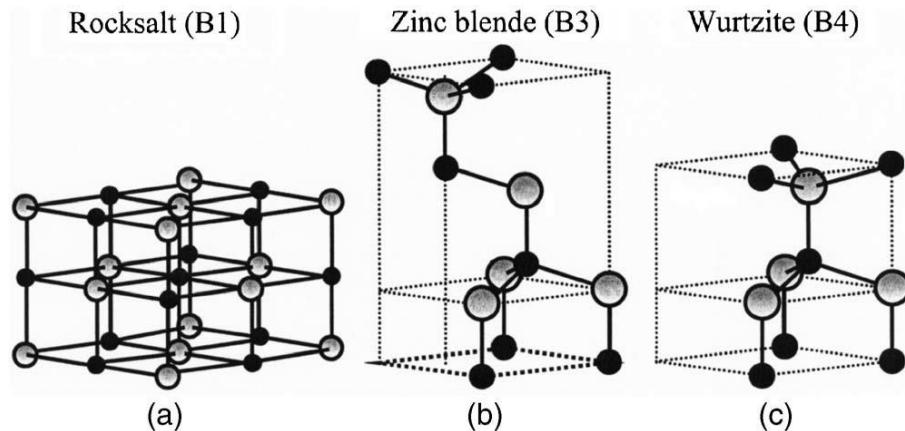
Tabel 2.1. Sifat dan karakterisasi ZnO

Karakteristik ZnO	
Rumus molekul	Zn O
Massa molekul	81.38 g/mol
Titik lebur	1975 ° C (terurai)
Berat Jenis	5,607 g/cm ³
Kelarutan dalam air	0,16 mg/100 mL (30 °C)
Band gap	3,37 eV (<i>direct</i>)
Indeks bias (<i>n</i>)	2,0041

(sumber : www.scienclab.com)

ZnO memiliki tiga macam struktur kristal yaitu *wurtzite*, *zinc blende*, dan *rocksalt*. Struktur yang paling umum dijumpai pada ZnO adalah *wurtzite* heksagonal karena merupakan struktur paling stabil dibandingkan struktur lainnya pada kondisi lingkungan. Bentuk *zincblende* dapat distabilkan dengan ZnO yang

ditumbuhkan pada substrat dengan struktur kisi kubik, sementara struktur *rocksalt* akan terbentuk untuk fase metastabil pada tekanan tinggi. Bentuk struktur kristal *wurtzite*, *zinc blende*, dan *rocksalt* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Struktur kristal ZnO (a) *rocksalt* kubik, (b) *zincblende* kubik, (c) *wurtzite* heksagonal. Bulatan abu-abu dan hitam secara berturut-turut merepresentasikan atom Zn dan O (Sumber: Ozgur *et. al.*, 2005).

Sifat suatu zat padat ditentukan oleh struktur dan simetri kristal bahan tersebut. Dalam struktur kristal *wurtzite* heksagonal, ZnO memiliki sifat *piezoelektrik* dengan nilai parameter kisi $a = 3,249 \text{ \AA}$ dan $c = 5,206 \text{ \AA}$ (Doyan & Humaini, 2017), serta konduktivitas dan transparansi yang tinggi (Mukri, *et. al.*, 2015). Selain itu, ZnO memiliki kemampuan mudah menyerap spektrum cahaya dengan panjang gelombang pada rentang cahaya ultraviolet (UV) (Young *et. al.*, 2017, Zhang *et. al.*, 2015). Dikarenakan memiliki sifat-sifat tersebut, ZnO dapat diaplikasikan sebagai bahan dasar pembuatan *Transparent Conducting Oxide* (TCO).

Disamping kelebihan yang dimiliki, ZnO juga memiliki kekurangan yaitu kurang stabil pada lingkungan korosif (Buyanova *et. al.*, 2009) dan dapat

mengalami penurunan konduktivitas listrik yang disebabkan karena terjadinya proses resapan kimia (*chemisorption*) gas oksigen pada permukaan film tipis ZnO (Shin *et. al.*, 2009).

Dalam beberapa tahun terakhir, ZnO banyak diaplikasikan pada berbagai hal, diantaranya yaitu sel surya, laser diode, laser ultraviolet, *thin film*, *transduser piezoelektrik*, dan sensor gas (Tarwal *et. al.*, 2011). Pada pengaplikasian ZnO, untuk memperoleh sifat-sifat yang optimum dapat dilakukan dengan pemberian doping. Pendopingan bertujuan untuk meningkatkan sifat konduktivitas, mobilitas elektron, transparansi, dan stabilitas pada film ZnO (Novita *et. al.*, 2017). Pemberian doping unsur-unsur golongan IIIA seperti Boron (B), Indium (In), Aluminium (Al), dan Galium (Ga) pada ZnO akan meningkatkan stabilitas dan konduktivitas listrik (Mahadik *et. al.*, 2014; Amara *et. al.*, 2014), serta meningkatkan sifat optik film seperti transmitansi cahaya lebih dari 80% (Chen *et. al.*, 2015).

2.2 **Gallium Oxide (Ga₂O₃)**

Gallium oxide (Ga₂O₃) merupakan bahan semikonduktor paduan golongan III dan VI yang memiliki *bandgap* lebar yaitu sebesar 4,8 eV (Marwoto *et. al.*, 2010; Faizal, 2016) dan memiliki sifat transparan pada daerah panjang gelombang ultraviolet (UV) hingga 280 nm. Bahan ini memiliki titik lebur pada suhu sekitar 1.740 °C dan stabil pada suhu tinggi (Marwoto *et. al.*, 2012).

Material Ga₂O₃ dapat diaplikasikan sebagai bahan dielektrik, sensor kimia, *transparant conducting oxide* (TCO), dan *thin film electroluminescent* (TFEL)

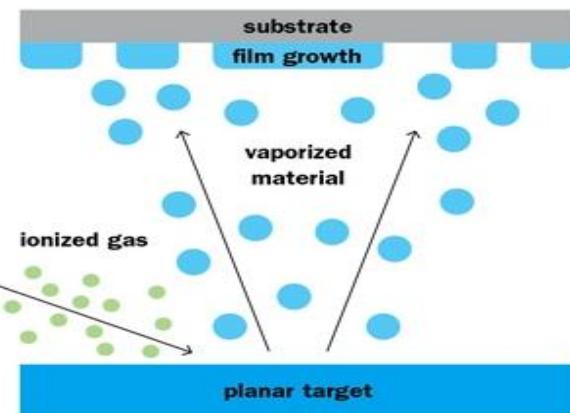
(Wibowo *et. al.*, 2013). Sifat konduktivitas Ga dapat berubah bergantung pada atmosfer lingkungan, sehingga Ga sering diaplikasikan sebagai sensor gas. Sifat *luminescence* senyawa Ga_2O_3 tanpa doping pada spektrum warna UV adalah sebesar 3,40 eV; warna biru sebesar 2,59 eV; dan warna hijau sebesar 2,48 eV (Marwoto *et. al.*, 2012). Nilai *bandgap* yang lebar menyebabkan Ga memiliki sifat optik dan listrik yang baik (Yu *et. al.*, 2010).

Pemanfaatan Ga_2O_3 sebagai material TCO biasanya diaplikasikan sebagai bahan dopan ZnO . Dibandingkan dengan unsur golongan IIIA lainnya, Ga dinilai sebagai bahan dopan yang paling menjanjikan. Hal ini dikarenakan ion Ga^{3+} (0,062 nm) memiliki jari-jari atom mendekati jari-jari Zn^{2+} (0,074 nm), dan panjang ikatan kovalen Ga-O (1,92 Å) mendekati panjang ikatan Zn-O (1,97 Å), sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya penyimpangan kekisi kristal (Young *et. al.*, 2017). Selain itu, Ga merupakan bahan yang kurang reaktif dan lebih tahan terhadap pengoksidaan dibandingkan Al (Awang *et. al.*, 2013).

2.3 DC Magnetron Sputtering

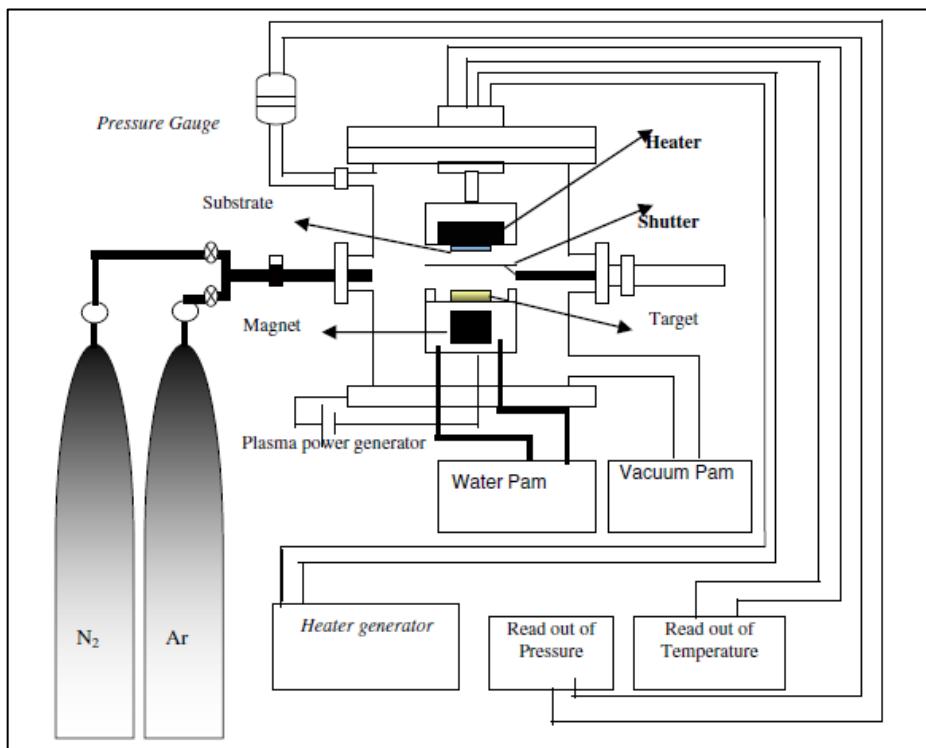
Sputtering merupakan sebuah proses pelontaran atom-atom suatu material dari permukaan sebuah target berwujud padat atau cair melalui proses pertukaran momentum dengan cara menembakkan permukaan target dengan partikel berenergi tinggi. Ilustrasi proses terjadinya *sputtering* ditunjukkan oleh Gambar 2.2. Atom-atom yang terlontar dari target akan terhambur ke segala arah, kemudian difokuskan pada substrat untuk membentuk lapisan tipis (Sudjatmoko, 2003:7-9). Salah satu cara untuk memfokuskan atom-atom bermuatan (plasma) tersebut adalah dengan

menggunakan batang magnet. Batang magnet tersebut ditempatkan di bawah target (katoda) untuk mengarahkan plasma jatuh ke daerah yang diinginkan. Alat yang menggunakan prinsip kerja ini disebut sebagai *magnetron sputtering*. Terdapat beberapa jenis *magnetron sputtering* yang dikembangkan yaitu *Direct Current (DC) Magnetron Sputtering*, *Radio Frequency (RF) Magnetron Sputtering*, dan *Cathodic Arc Evaporation* (Lundin *et. al.*, 2012).



Gambar 2.2. Proses *sputtering* pada permukaan target.
(Sumber : Soleras Advanced Coatings)

DC Magnetron Sputtering merupakan proses deposisi dengan uap plasma atau *Plasma Vapor Deposition* (PVD) yang menggunakan prinsip medan magnet tertutup dalam aliran arus searah (*direct current*). Proses deposisi ini terjadi dalam *chamber* yang berisi plasma untuk membawa atom target dari katoda menuju anoda. Gas plasma ini akan dipercepat dengan beda potensial sekitar ratusan hingga ribuan eV dan menumbuk katoda, sehingga menyebabkan atom target akan lepas dari katoda. Gas plasma yang digunakan biasanya adalah Argon karena tidak bereaksi dengan target (Tunggadewi *et. al.*, 2015). Sistem kerja alat DC Magnetron Sputtering ditunjukkan oleh Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Skema sistem kerja DC Magnetron Sputtering (Marwoto *et. al.*, 2012).

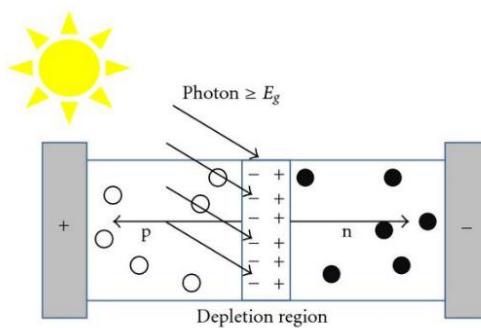
Metode deposisi dengan DC Magnetron Sputtering memiliki kelebihan yaitu dapat menghasilkan film tipis dari bahan dengan titik leleh tinggi, ketebalan lapisan dapat dikontrol dengan akurat, temperatur deposisi yang rendah, dan kecepatan deposisi yang tinggi (Sugianto *et. al.*, 2016).

2.4 Sel Surya

Sel surya merupakan teknologi semikonduktor yang berfungsi untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan peristiwa fisika dan kimia (Askari *et. al.*, 2015). Sel surya bekerja dengan prinsip efek fotolistrik

dengan mengindikasikan bahwa cahaya merupakan partikel diskrit atau kuanta energi.

Sel surya menggunakan prinsip kerja semikonduktor *p-n junction* seperti pada dioda. *P-n junction* merupakan hasil dari doping semikonduktor jenis *p* dan *n* pada silikon murni. Pada semikonduktor jenis *p* pembawa muatan mayoritasnya merupakan *hole* (pembawa muatan positif), sedangkan pada semikonduktor jenis *n* pembawa muatan mayoritasnya merupakan elektron (pembawa muatan negatif). Apabila bagian *p* dihubungkan dengan kutub positif baterai dan bagian *n* dihubungkan dengan kutub negatif baterai, maka arus akan mengalir melalui *p-n junction*. Kondisi ini disebut sebagai panjar maju. Apabila bagian *p* dihubungkan dengan kutub negatif dan bagian *n* dihubungkan dengan kutub positif baterai, maka akan terjadi panjar mundur yaitu arus tidak dapat mengalir melalui *p-n junction* (arus yang mengalir sangat kecil disebut dengan arus bocor). Ilustrasi *p-n junction* pada sel surya ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.4. *p-n junction* pada sel surya (Gupta *et. al.*, 2009).

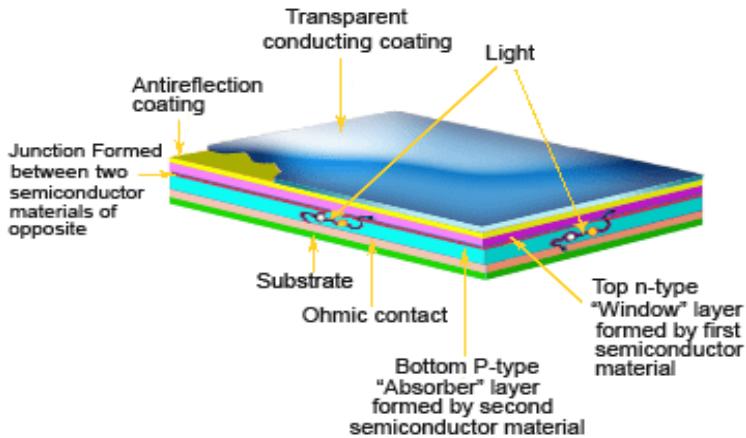
Teknologi sel surya memanfaatkan kondisi panjar mundur yaitu efek fotokonduktif dan *photovoltaic*. Fotokonduktif merupakan gejala ketika energi cahaya dinaikkan, maka akan terjadi peningkatan arus bocor pada kondisi panjar

mundur. Penyerapan energi pada kondisi ini disebut sebagai efek *photovoltaic* (Diputra, 2008). Operasi *photovoltaic* memerlukan tiga hal dasar, yaitu :

1. Mampu mengabsorpsi cahaya untuk membangkitkan pasangan elektron atau *hole* dalam material,
2. Mampu memisahkan pembawa muatan yang berbeda jenis (pembawa muatan positif dan negatif),
3. Mampu mengalirkan pembawa muatan ke rangkaian sistem eksternal (Askari *et. al.*, 2015).

Pada saat foton mengenai sel surya, maka energi akan diserap oleh elektron untuk melepaskan diri dari semikonduktor *n*. Akibat dari terlepasnya elektron ini, maka akan terbentuk *hole* pada daerah yang ditinggalkannya. Hal ini disebut dengan fotogenerasi elektron-*hole* atau pasangan elektron *hole* akibat cahaya matahari. Selanjutnya elektron tersebut akan tertarik ke arah semikonduktor *n* dan *hole* akan tertarik ke arah semikonduktor *p*, karena adanya medan magnet yang timbul pada sambungan *p-n*. Jika pada kedua semikonduktor tersebut dihubungkan dengan sebuah kabel dan hambatan, maka elektron akan mengalir melalui kabel tersebut. Dalam kejadian ini timbulah arus listrik karena adanya pergerakan elektron (Suriadi *et. al.*, 2010; Mitayani, 2013).

Untuk dapat menjalankan fungsi kerjanya, secara umum sel surya terdiri dari beberapa lapisan utama meliputi substrat, *Transparent Conducting Oxide* (TCO), dan lapisan semikonduktor *p-n junction*. Struktur lapisan sel surya berbasis film tipis ditunjukkan oleh Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Struktur Lapisan Film Tipis Sel Surya
(Askari *et. al.*, 2015)

2.5 *Transparant Conducting Oxide (TCO)*

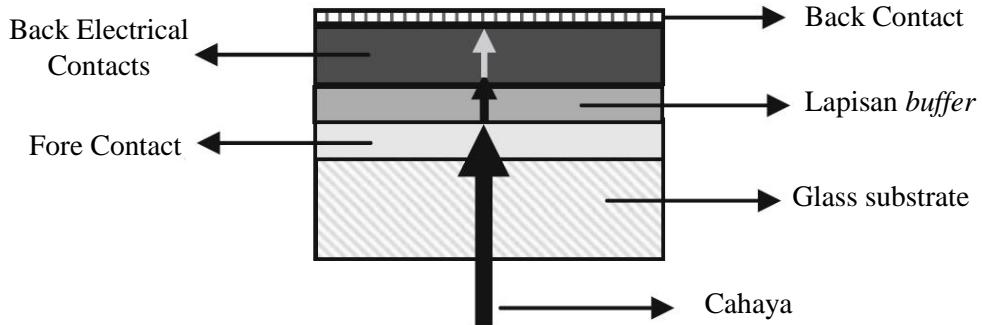
Transparent Conducting Oxide (TCO) merupakan material semikonduktor yang telah banyak dikembangkan dalam bidang teknologi modern masa kini. Contoh pengaplikasian TCO adalah pada layar *liquid crystal displays* (LCD), LED, *electrochronic windows* (jendela yang bisa diatur menjadi transparan gelap), sensor gas, sel surya, dan *organic electroluminescence* seperti *touchscreen* monitor pada mesin ATM (Sinaga, 2009). TCO banyak diaplikasikan pada berbagai peralatan optik karena sifatnya yang memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, transparansi yang baik pada spektrum cahaya tampak dan daerah mendekati infra merah, serta reflektansi yang baik pada daerah infra merah (Ikhmayies, 2017).

TCO memiliki energi *band gap* yang lebar yaitu antara 2,4 – 4,5 eV (Sinaga, 2009). Hal ini berarti bahwa, energi cahaya yang berada pada rentang energi bandgap tersebut akan diteruskan atau ditransmitansikan oleh TCO. Foton yang ditransmisikan inilah yang berada pada kisaran spektrum cahaya tampak. Sebagai

suatu material yang diaplikasikan untuk mentransmisikan cahaya, TCO harus memiliki beberapa sifat khusus, meliputi struktur kristal yang homogen dan kerapatan kristal yang tinggi (Callahan *et. al.*, 2012).

Sifat konduktivitas pada material TCO disebabkan karena ikatan ionik yang dibentuk oleh unsur penyusun bahan yaitu berupa unsur logam dan oksigen. Ikatan kimia kedua unsur ini membuat atom pada bahan dapat mudah terlepas dengan sendirinya dari posisi normal ke posisi lain, sehingga mengakibatkan elektron terlepas dari struktur oksida tersebut. Elektron yang terlepas inilah yang akan menghantarkan arus listrik apabila material dialiri arus listrik (Faizal, 2016).

Dalam pengaplikasiannya sebagai sel surya, TCO memiliki beberapa kegunaan yaitu sebagai *fore contact* (lapisan pertama pada sel surya), *back electrical contacts*, dan lapisan *buffer* (penyangga). Skema lapisan sel surya ini ditunjukkan oleh Gambar 2.6. Sebagai *fore contact* pada sel surya, TCO akan meneruskan cahaya menuju *device* dan menjaga hubungan listrik dengan sel, sehingga TCO harus memiliki konduktivitas tipe-n. Lapisan *back electrical contacts* memiliki kemampuan untuk mengiluminasi cahaya dari salah satu atau kedua sisi selnya. Material TCO yang memiliki kualitas baik untuk diaplikasikan sebagai sel surya salah satunya adalah SnO₂ dan ZnO dengan atau tanpa doping (Ikhmayies, 2017).



Gambar 2.6 Skema konfigurasi sel surya berbasis film tipis.
(Ikhmayies, 2017)

2.6 ZnO doping Ga

Film tipis ZnO doping Ga sering diaplikasikan sebagai material TCO, salah satunya adalah *window layer* pada sel surya. Setiap substitusi parsial antara ion Ga^{3+} dan Zn^{2+} mengakibatkan ion Ga^{3+} menyumbangkan satu elektron bebas pada film tipis ZnO:Ga, sehingga konsentrasi pembawa muatan dalam film tipis menjadi semakin tinggi (Chen *et. al.*, 2015). Agar menjadi sebuah material *window layer* yang baik, suatu film harus memiliki sifat optik dan sifat listrik yang optimum, serta struktur kristal yang baik, meliputi ukuran kristal, homogenitas kristal, dan kerapatan kristal. Dalam pembuatan film tipis dengan metode *sputtering*, parameter yang perlu diperhatikan untuk memperoleh sifat-sifat optimum film tipis adalah konsentrasi doping, tekanan gas *inert* yang digunakan, daya plasma, suhu dan waktu deposisi, serta suhu dan waktu *annealing*.

Laboratorium Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang telah melakukan beberapa penelitian pembuatan film tipis ZnO:Ga dengan beberapa variasi. Fatiatus (2015) melakukan penelitian mengenai pengaruh suhu deposisi terhadap film tipis

ZnO:Ga. Deposisi dilakukan pada tekanan gas argon 500 mTorr, daya plasma 30 W dengan variasi suhu deposisi 300°C, 325°C, 350°C, 375°C, 400°C, 425°C, dan 450°C. Hasil analisis dari karakterisasi XRD, UV-Vis, IV Meter, elipsometer, dan SEM menunjukkan bahwa film tipis yang dihasilkan pada suhu deposisi 300°C mempunyai sifat optik, sifat listrik, dan struktur kristal yang cocok diaplikasikan sebagai material TCO.

Usriyah (2016) melakukan penumbuhan film tipis ZnO:Ga pada temperatur 300°C, selama 60 menit, dengan daya plasma 60 W dan temperature *annealing* 250°C – 400°C. Hasil analisis dari karakterisasi XRD, SEM, dan UV-Vis disimpulkan bahwa film pada suhu *annealing* 350°C memiliki transmitansi yang paling tinggi yaitu sebesar ~84,043%, energi gap sebesar 3,35 eV, ukuran kristal terbesar, serta kualitas kristal yang lebih baik dibandingkan hasil film yang di-*annealing* pada suhu lain.

BAB V

PENUTUP

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil karakterisasi dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa pemberian waktu *annealing* yang berbeda pada film tipis ZnO:Ga mampu memperbaiki struktur kristal, yaitu berupa peningkatan ukuran kristalit film dan penurunan nilai kerapatan dislokasi, *d-spacing*, parameter kisi-c, *lattice strain*, serta *stress*. Waktu *annealing* yang terlalu singkat menyebabkan struktur kristal belum sempurna terbentuk, sedangkan waktu *annealing* yang terlalu lama menyebabkan kerusakan struktur kristal pada film sehingga mengakibatkan film yang bersifat amorf. Hasil struktur kristal yang optimum diperoleh pada film tipis ZnO:Ga waktu *annealing* 30 menit.

Pemberian waktu *annealing* pada rentang waktu 20 hingga 40 menit mengakibatkan peningkatan kualitas morfologi film tipis ZnO:Ga, yaitu berupa penurunan ukuran *grain boundaries*, peningkatan homogenitas butir kristal, serta peningkatan kandungan Zn dan Ga, serta ikatan Zn-O dan Ga-O pada film. Namun setelah waktu *annealing* 40 menit, film mengalami penurunan kualitas morfologi. Hasil morfologi film tipis ZnO:Ga yang optimum diperoleh pada film dengan waktu *annealing* 40 menit.

5.2 Saran

Penelitian lebih lanjut perlu dikembangkan pada film tipis ZnO:Ga(2%) dengan parameter waktu *annealing* 40 menit untuk diaplikasikan sebagai bahan *window layer* sel surya dan *Transparent Conducting Oxide* (TCO).

DAFTAR PUSTAKA

- Amara, S., & Mohamed B. 2014. Investigation on Optical, Structural and Electrical Properties of Annealed AZO/Al/AZO Multilayer Structures Deposited By Dc Magnetron Sputtering. *J Mater Sci:Mater Electron*, 26 (3) : 1763-1769.
- Asikuzun, E., O. Ozturk, L. Arda, A.T. Tasci, F. Kartal, & C. Terzioglu. 2016. High Quality c-Axis Oriented Non-Vacuum Er Doped ZnO Thin Film. *Ceramics International*, 42(7) : 8085-8091.
- Askari, M. B., M. M. A. Vahid, & M. Mohsen. 2015. Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*. 3(5): 94-113.
- Awang R, S. N. H. M. Daud, C. C. Yap, M. H. H. Jumali, & Z. Zalita. 2013. Struktur dan sifat optik filem nippit nanozarah ZnO terdop Ga. *Sains Malaysiana*, 42(11) : 1663-70.
- Buyanova, I. A., Wang, X.J., Wang, W. M., Tu, C. W., & Chen, W. M.. 2009. Superlattices and Microstructure Effect of Ga Doping on Optical and Structural Properties of ZnO Epilayers. *Superlattices and Microstructures*. 45 : 4-5.
- Callahan, D. N., J. N. Munday, & H. A. Atwater. 2012. Solar Cell Light Trapping Beyond the Ray Optic Limit. *Nano Lett*. 12 : 214–218.
- Chen, M., Z. L. Pei, X. Wang, C. Sun, & L. S. Wen. 2001. Structural, Electrical, and Optical Properties ff Transparent Conductive Oxide ZnO:Al Films Prepared by Dc Magnetron Reactive Sputtering. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 19(3) : 963-970.
- Chen, S., G. Carraro, D. Barreca, & R. Binions. 2014. Growth and Electro-Optical Properties of Ga-Doped ZnO Films Prepared by Aerosol Assisted Chemical Vapour Deposition. *Thin Solid Films*, 584 : 316-319.
- Chen, S., M. E. A. Warwick, & R. Binions. 2015. Effects of Film Thickness and Thermal Treatment on The Structural and Opto-Electronic Properties of Ga-Doped ZnO Films Deposited by Sol–Gel Method. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 137 : 202–209.
- Diputra, W. 2008. *Simulator Algoritma Pendekripsi Kerusakan Modul Surya Pada Rangkaian Modul Surya*. Skripsi. Jakarta : FT Universitas Indonesia.

- Doyan, A., & Humaini. 2017. Sifat Optik Lapisan Tipis ZnO. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi* ISSN. 2407-6902, 3(1) : 34-39.
- Edel, J. *Soleras Advanced Coatings* - 589 Elm St., Biddeford. www.soleras.com [diakses : 26 Februari 2017].
- Faizal, R. 2016. *Pengaruh Tekanan Oksigen Setelah Deposisi Terhadap Sifat Film Tipis ZnO Doping Ga Yang Ditumbuhkan Dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang : FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Fang, G., D. Lia, & B. L. Yao. 2003. Fabrication and Characterization of Transparent Conductive ZnO:Al Thin Films Prepared by Direct Current Magnetron Sputtering with Highly Conductive ZnO(ZnAl₂O₄) Ceramic Target. *Journal of Crystal Growth*, 247 : 393–400.
- Fatiatun, 2015. *Pengaruh Suhu Deposisi Terhadap Sifat Fisis Film Tipis Seng Oksida Doping Galium Oksida Dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang : FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Greivenkamp, J. E. 2015. Applications of Thin Film Coating. Tersedia wp.optics.arizona.edu [diakses 22 Februari 2018].
- Guillen, C., & J. Herrero. 2010. Optical, Electrical and Structural Characteristics of Al:ZnO Thin Films eith Various Thicknesses Deposited by DC Sputtering at Room Temperature and Annealed in Air Or Vacuum. *Vacuum*. 84 : 924–929.
- Gupta, N., G. F. Alapatt, R. Podila, R. Singh, & K. F. Poole. 2009. Review Article : Prospects of Nanostructure-Based Solar Cells for Manufacturing Future Generations of Photovoltaic Modules. *International Journal of Photoenergy Volume 2009, Article ID 154059*.
- Haynes, W. M.. 2013. CRC Handbook of Chemistry and Physics 94th Edition. London : CRD Press.
- Henry, J., K. Mohanraj, & G. Sivakumar. 2017. Effect of Annealing Time on The Optical Properties of AZTSe Thin Films. *Materials Letters*, 04(149).
- Hughes, M. 2014. News and Articles : What is Thin Film Deposition. SEMICORE Equipment, Inc. Tersedia www.semicore.com/news/81-what-is-thin-film-deposition [diakses 23 Februari 2018].

- Husain, S., F. Rahman, N. Ali, & P. A. Alvi. 2013. Nickel Sub-lattice Effects on the Optical Properties of ZnO Nanocrystals. *Journal of Optoelectronics Engineering*, 1 : 28-32.
- Ikhmayies, S. J. 2017. Transparent Conducting Oxides for Solar Cell Applications. A. Sayigh (ed.), *Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy*, DOI 10.1007/978-3-319-30746-6_70.
- Ivanova, T., A. Harizanova, T. Koutzarova, & B. Vertruyen. Study of ZnO sol-gel films: Effect of Annealing. *Materials Letters*, 64 : 1147–1149.
- Kahouli, M., A. Barhoumi, A. Bouzid, A. Al-Hajry, & S. Guermazi. 2015. Structural and Optical Properties of ZnO Nanoparticles Prepared by Direct Precipitation Method. *Superlattices and Microstructures*, 85 : 7-23.
- Kim, C.E., K. Moon, S. Kim, J. M. Myoung, H. W. Jang, J. Bang, & I. Yun,. 2010. Effect of Carrier Concentration on Optical Bandgap Shift in ZnO:Ga Thin Films. *Thin Solid Films*, 518 : 6304-6307.
- Kim, D. K., & H. B. Kim. 2016. Effect of post-annealing time on the properties of sputtered Aldoped ZnO thin films. *J Mater Sci: Mater Electron*.
- Kumar, Manjeet, Akshay Kumar, & Ashutosh C. A. 2015. Influence of Texture Coefficient on Surface Morphology and Sensing Properties of W-Doped Nanocrystalline Tin Oxide Thin Films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(6) : 3571-3580.
- Kumarasinghe, P. K. K., A. Dissanayake, B. M. K. Pemasiri, & B. S. Dassanayake. 2016. Variation of Optical, Structural, Electrical, and Compositional Properties of Thermally Evaporated CdTe Thin Films Due to Substrate Temperature. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*. DOI 10.1007/s10854-016-5521-2.
- Kumarasinghe, P. K. K., A. Dissanayake, B. M. K. Pemasiri, & B. S. Dassanayake. 2017. Effect of Post Deposition Heat Treatment on Microstructure Parameters, Optical Constants, and Composition of Thermally Evaporated CdTe Thin Films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 58:51-60.
- Lalanne, M., J. M. Soon, A. Barnabe, L. Presmanes, I. Pasquet, & Ph. Tailhades. 2010. Preparation and Characterization of The Defect-Conductivity

- Relationship of Ga-Doped ZnO Thin Films Deposited by Nonreactive Radio-Frequency–Magnetron Sputtering. *J. Mater. Res.*, 25 : 12.
- Li, X. Y., H. J. Li, Z. J. Wang, H. Xia, Z. Y. Xiong, J. X. Wang, & B. C. Yang. 2009. Effect of Substrate Temperature on The Structural and Optical Properties of ZnO and Al-Doped ZnO Thin Films Prepared by DC Magnetron Sputtering. *Optics Communications*, 282 : 247–252.
- Lundin, D., & K Sarakinos. 2012. An Introduction to Thin Film Processing Using High-Power Impulse Magnetron Sputtering. *J. Mater. Res.*, 27 : 5.
- Macleod, H. A. 2017. *Thin-Film Optical Filters, Fifth Edition*. Arizona : CRC Press.
- Mahadik, M. A., S. S. Shinde, Y. M. Hunge, V. S. Mohite, S. S. Khumbhar, A. V. Moholkar, & K. Y. Rajpure. 2014. UV Assisted Photoelectrocatalytic Oxidation of Phthalic Acid Using Spray Deposited Al Doped Zinc Oxide Thin Films. 611 : 446 - 451.
- Maller, R., Y. Porte, H. N. Alshareef, & M. A. McLachlan. 2013. Probing the Doping Mechanisms and Electrical Properties of Al, Ga, and In Doped ZnO Prepared by Spray Pyrolysis. *Journal of Materials Chemistry C*, 4 : 5953-5961.
- Marwoto, P., Mustaanah, Sugianto, & Sulhadi. 2010. Struktur dan Sifat Optik Film Tipis Galium Oksida Doping ZnO (2%) yang Difabrikasikan dengan DC Magnetron Sputtering. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVII HFI Jateng dan DIY*, ISSN 0853-0823 : 112 – 127.
- Marwoto, P., Sugianto, & E. Wibowo. 2012. Growth of Europium-Doped Gallium Oxide ($\text{Ga}_2\text{O}_3:\text{Eu}$) Thin Films Deposited by Homemade DC Magnetron Sputtering. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 6:17.
- Mazhdi, M., & P. H. Khani. 2011. Structural Characterization of ZnO and ZnO:Mn Nanoparticles Prepared by Reverse Micelle Method. *Int. J. Nano Dim.* Spring ISSN 2008-8868, 2(4): 233-240.
- Merriam-Webster Dictionary. 2017. *Definition of Technology*. Tersedia www.merriam-webster.com/dictionary/technology [diakses pada 20 Desember 2017].
- Mhamdi, A., R. Mimouni, A. Amlouk, M. Amlouk, & S. Belgacem. 2014. Study of Copper Doping Effects on Structural, Optical, and Electrical Properties of

- Sprayed ZnO Thin Films. *Journal of Alloy and Compounds* ISSN : 0925-8388.
- Mitayani, M.. 2013. *Struktur dan Sifat Optik Film Tipis CdS Doping Zn yang Ditumbuhkan dengan DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang : FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Muiva, C. M., T. S. Sathiaraj, & K. Maabong. 2011. Effect of Doping Concentration on the Properties of Aluminium Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis for Transparent Electrode Applications. *Ceramics International*, 37 : 555-560.
- Mukri, M., F. X. Kristianta, & H. Sutjahjono. 2015. Fabrikasi Prototype Touchscreen dengan Lapisan Nano Film Seng Oksida menggunakan Metode Spin Coating. *Jurnal ROTOR*, 8(2).
- Muthukumaran, S., & R. Gopalakrishnan. 2012. Structural, FTIR and Photoluminescence Studies of Cu Doped ZnO Nanopowders by Co-Precipitation Method. *Optical Materials Journal*, 34 : 1946–1953.
- Nasir, E. M.. 2013. Texture Coefficient and Conductivity Dependence on the Annealing and Thicknesses of Thin CdS Films. *International Review of Physics* ISSN 1971-680X, 7(1).
- Noh, W. S., J. A. Lee, J. H. Lee, Y. W. Heo, & J. J. Kim. 2016. Effect of Oxygen Pressure on the P-Type Conductivity of Ga, P Co-Doped ZnO Thin Film Grown by Pulsed Laser Deposition. *Ceramics International*, 42 : 4136–4142.
- Novita, S., Iwantono, & Awidrus. 2017. Karakterisasi Sifat Optik dan Morfologi Nanorod ZnO yang Didoping Galium (Zn_xGa). *Jurnal Komunikasi Fisika Indonesia (KFI)* ISSN.1412-2960.
- Özgür, U., Y. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S.-J. Cho, & H. Morkoç. 2005. Applied Physics Reviews : A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices. *Journal of Applied Physics*, 98 : 041301-103.
- Sahu, B. B., J. G. Han, M. Hori, & K. Takeda. 2015. Langmuir Probe and Optical Emission Spectroscopy Studies in Magnetron Sputtering Plasmas for Al-Doped ZnO Film Deposition. *Journal Of Applied Physics*, 117 : 023301-023313.

- Saleem, M., L. Fang, A. Wakeel, M. Rashad, & C. Y. Kong. 2012. Simple Preparation and Characterization of Nano-Crystalline Zinc Oxide Thin Films by Sol-Gel Method on Glass Substrate. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2 : 10-15.
- Saragi, T., Y. R. Purba, S. Auffa D. U., M. Oktaviani, E. Simanjuntak, T. Susilawati, N. Syakir, M. Kartawijaya, Risdiana, & A. Bahtiar. 2016. Karakteristik Kristal dan Optik Nanopartikel Zinc Oxide : Kajian Efek Moralitas dalam Proses Hidrothermal. *Spektra : Jurnal Fisika dan Aplikasinya ISSN : 251-3384*, 1(2).
- Scienclab.com, Inc. Material Safety Data Sheet - Zinc oxide MSDS. Tersedia : <http://www.scienclab.com/msds.php?msdsId=9927329>.
- Seshan, K. 2002. *Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Technique, Second Edition*. New York : Noyes Publications/William Andre Publishing.
- Shin, H. H., Joung, Y.H., & Kang, S.J.. 2009. Influence of The Substrate Temperature on The Optical and Electrical Properties of Ga-Doped ZnO Thin Films Fabricated by Pulsed Laser Deposition. *J. Mater Sci: Mater Electron*, 20 : 704 – 708.
- Sinaga, P. 2009. Pengaruh Temperatur Annealing terhadap Struktur Mikro, Sifat Listrik dan Sifat Optik dari Film Tipis Oksida Konduktif Transparan ZnO:Al yang Dibuat dengan Teknik Screen Printing. ISSN: 1412-0917. *Jurnal Pengajaran MIPA*, 14(2).
- Singhal, S., J. Kaur, T. Namgyal, & R. Sharma. 2012. Cu-Doped ZnO Nanoparticles: Synthesis, Structural and Electrical Properties. *Physica B*, 407 : 1223–1226.
- Su, W. F., C. W. Chen, J. J. Wu, & Y. Y. Lin. 2016. Method for Forming a Solar Cell with Tree-Like Nanostructure. *United States Patent*, US 9.269,840 B2.
- Sudjatmoko. 2003. Aplikasi Teknologi Sputtering untuk Pembuatan Sel Surya Lapisan Tipis. Workshop : *Sputtering untuk Rekayasa Permukaan Bahan*. Yogyakarta: Puslitbang Teknologi Maju Batan.
- Sugianto, R. Zannah, S. N. Mahmudah, B. Astuti, N. M. D. Putra, A. A. Wibowo, P. Marwoto, D. Ariyanto, & E. Wibowo. 2016. Pengaruh Temperatur

- Annealing Pada Sifat Listrik Film Tipis Zinc Oksida Doping Aluminium Oksida. *Jurnal MIPA*, 39 (2) : 115-122.
- Sulhadi, Fatiatun, P. Marwoto, Sugianto, & E. Wibowo. 2015. Deposition Temperature Variations on The Structure, Optical and Electrical Properties of Zinc Oxide Thin Films Doped Gallium (ZnO:Ga). *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 11(1) : 93-99.
- Suprayogi, D. 2014. *Pengaruh Doping Galium Oksida pada Karakteristik Film Tipis Seng Oksida Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang : FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Suriadi, & M. Syukri. 2010. Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpadu Menggunakan Software PVSYST pada Komplek Perumahan di Banda Aceh. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 9 : 2.
- Suryanarayana, C. & M.G. Norton. 1998. *X-ray Diffraction A Practical Approach*. New York: Plenum Press.
- Tarwal, N. L., & P. S. Patil. 2011. Enhanced Photoelectrochemical Performance of Ag-ZnO Thin Films Synthesized by Spray Pyrolysis Technique. *Electrochimica Acta*, 56 : 6510–6516.
- TedPella.Inc. Microscopy Product for Sceince and Industry. Technical Notes of Soda Lime Glass 0215. Corning Glass Slide e.g. TedPella Laboratory Report. Tersedia di : <http://www.tedpella.com>.
- Tunggadewi, D. A., & F. Hidayanti. 2015. Pembuatan Sel Surya Film Tipis dengan DC Magnetron Sputtering. *Jurnal Ilmiah GIGA*, 18 (1) : 38-42.
- Usriyah, F. 2016. *Pengaruh Temperatur Annealing terhadap Sifat Film Tipis ZnO:Ga dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang : FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Wang, Yaqin, W. Tang, & L. Zhang. 2015. Crystalline Size Effects on Texture Coefficient, Electrical and Optical Properties of Sputter-deposited Ga-doped ZnO Thin Films. *Journal of Material Science and Technology*, 31(2), 175-181.
- Wang, Z., H. Zhang, L. Zhang, J. Yuan, S. Yan, & C. Wang. 2002. Low-Temperature Synthesis of ZnO Nanoparticles by Solid-State Pyrolytic Reaction. *Nanotechnology*, 14 : 11–15.

- Wibowo, A. A., P. Marwoto, & Sulhadi. 2013. Analisis Struktur dan Sifat Optik Film Tipis Galium Oksida Doping Seng Oksida yang Dideposisikan Menggunakan Metode DC Magnetron Sputtering. *Unnes Physics Journal* ISSN 2252-6978, 2 (2) : 18-23.
- Yoshino, K., M. Tanaka, A. Ide, S. A. Boden, D. M. Bagnall, & M. Yoneta. 2014. Surface Morphology of Transparent Conductive ZnO Film Grown by DC Sputtering Method. *Advanced Materials Research*, 894 : 403-407.
- Young, S. J., C.C. Yang, & L. T. Laia. 2017. Review : Growth of Al-, Ga-, and In-Doped ZnO Nanostructures via a Low-Temperature Process and Their Application to Field Emission Devices and Ultraviolet Photosensors. *Journal of The Electrochemical Society*, 164 (5) B3013-B3028.
- Yu, L., S. Liu, B. Yang, J. Wei, M. Lei, & X. Fan. 2015. Sn–Ga Co-Doped ZnO Nanobelts Fabricated by Thermal Evaporation and Application to Ethanol Gas Sensors. *Materials Letters*, 141 : 79–82.
- Zhang, X., S. Dong, X. Zhou, L. Yan, G. Chen, S. Dong, & S. Zhou. 2015. A Facile One-Pot Synthesis Of Er-Al Co-Doped ZnO Nanoparticles with Enhanced Photocatalytic Performance Under Visible Light. *Materials Letters*, 143 : 312-314.