



**PENGARUH DAYA PLASMA TERHADAP STRUKTUR DAN
SIFAT OPTIK FILM TIPIS ZnO DOPING GALIUM YANG
DITUMBUHKAN DENGAN *DC MAGNETRON SPUTTERING***

Skripsi

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

oleh

Sri Mulyani

4211415023

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2019**

PERSETUJUAN PEMBIMBING

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

Semarang, 26 November 2019

Pembimbing,



Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.

NIP 196308211988031004

PERNYATAAN

Dengan ini saya,

nama : Sri Mulyani

NIM : 4211415023

progam studi : Fisika

menyatakan bahwa skripsi berjudul *Pengaruh Daya Plasma terhadap Struktur dan Sifat Optik Film Tipis ZnO Doping Galium yang Ditumbuhkan dengan DC Magnetron Sputtering* ini benar-benar karya saya sendiri bukan jiplakan dari karya orang lain atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku baik sebagian atau seluruhnya. Pendapat atau temuan orang atau pihak lain yang terdapat dalam skripsi ini telah dikutip atau dirujuk berdasarkan kode etik ilmiah. Atas pernyataan ini, saya secara pribadi siap menanggung resiko/sanksi hukum yang dijatuhkan apabila ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya ini.

Semarang, 26 November 2019



Penulis,

Sri Mulyani

4211415023

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul *Pengaruh Daya Plasma terhadap Struktur dan Sifat Optik Film Tipis ZnO Doping Galium yang Ditumbuhkan dengan DC Magnetron Sputtering* karya Sri Mulyani (NIM 4211415023) telah dipertahankan dalam Ujian Skripsi Universitas Negeri Semarang pada tanggal 26 November 2019 dan disahkan oleh Panitia Ujian.

Semarang, 26 November 2019

Panitia



Sugianto, M.Si.

NIP 196102191993031001

Sekretaris,



Dr. Suharto Linuwih, M.Si.

NIP 196807141996031005

Penguji I



Dr. Sulhadi, M.Si.

NIP 197108161998021001

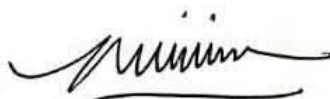
Penguji II



Dr. Budi Astuti, M.Sc.

NIP 197902162005012001

Anggota / Pembimbing



Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.

NIP 196308211988031004

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

Jangan jadi korban dari keadaan tapi jadilah pemenang dari setiap keadaan.
Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan (Al Insyirah:5).

PERSEMBAHAN

Skripsi ini kupersembahkan untuk :
Bapak dan Ibu tercinta.
Mbak dan Masku (Santi, Anto, Sapto).
Almamaterku.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan banyak kesempatan dan kenikmatan dalam hidup ini sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini hingga selesai.

Penulisan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak berupa saran, bimbingan, maupun petunjuk dan bantuan dalam bentuk lain. Dengan penuh ketulusan hati, penulis ucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum., Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Sugianto, M.Si., Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
3. Dr. Suharto Linuwih, M.Si., Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
4. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si., Ketua Prodi Fisika Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
5. Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S. selaku dosen pembimbing yang banyak memberikan koreksi, masukan, motivasi, saran dan dukungan kepada penulis selama penelitian dan penyusunan skripsi ini.
6. Dr. Sulhadi, M.Si. selaku dosen penguji I yang memberikan kritik, saran dan masukan kepada penulis.
7. Dr. Budi Astuti, M.Sc. selaku dosen penguji II yang telah memberikan kritik, saran dan masukan kepada penulis
8. Didik Aryanto, S.Si., M.Sc. yang telah membantu dalam karakterisasi sampel.
9. Pak Rodhotul Muttaqin, S.Si. yang telah memberikan bantuan selama penelitian.
10. Kedua orangtuaku, Bapak Sukardo dan Ibu Sri Wasitah yang telah memberikan doa, motivasi, dan dukungan baik moril maupun materil kepada penulis.

11. Mbak Santi, Mas Anto, dan Mas Sapto yang tak hentinya memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis.
12. Teman sekamarku, Anggun Tri Astuti atas segala kisah dan kebersamaannya untuk menyelesaikan pendidikan ini.
13. Teman-teman Fisika 2015 atas kebersamaan, persahabatan, dukungan, doa, dan semangat yang selalu diberikan.
14. Fina, Tari, Laras, Deska, Mdana, Ika, dan Laely (Ciwi-Ciwiku) untuk kesempatan berbagi cerita baik tentang kuliah, masalah pribadi, dan info hangat lainnya.
15. Teman-teman *Thin Film*, Azizah, Vivian, Deska, dan Nuril untuk kesempatan bertukar pikiran, bantuan dan dukungannya selama penelitian.
16. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih untuk selalu memberikan bantuan moral dan spiritual.

Demikian ucapan terima kasih penulis, semoga skripsi ini dapat memberi manfaat kepada semua pihak. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna karena sesungguhnya kesempurnaan hanya milik Allah SWT.

Semarang, 26 November 2019

Penulis

ABSTRAK

Mulyani, S. (2019). *Pengaruh Daya Plasma terhadap Struktur dan Sifat Optik Film Tipis ZnO Doping Galium yang Ditumbuhkan dengan DC Magnetron Sputtering*. Skripsi, Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama: Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.

Kata Kunci : ZnO:Ga, *Sputtering*, Daya plasma, Struktur, Sifat optik

Film tipis ZnO doping Galium (ZnO:Ga) telah ditumbuhkan di atas substrat *corning glass* menggunakan DC *Magnetron Sputtering* selama 120 menit dengan tekanan gas Argon 500 mTorr dan suhu deposisi 300 °C. Selanjutnya daya plasma dilakukan variasi 30 watt, 35 watt, dan 37 watt. Pengaruh daya plasma terhadap struktur kristal film tipis ZnO:Ga diteliti dengan karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*), morfologi permukaan film diteliti dengan karakterisasi FESEM (*Field Emission Scanning Electron Microscopy*), dan sifat optik film diteliti dengan karakterisasi UV-Vis (*Ultraviolet – Visible*). Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa film tipis ZnO:Ga merupakan polikristalin. Sampel film tipis daya plasma 30 watt teramati puncak bidang orientasi (100), (002), (101), dan (103). Sampel film tipis daya plasma 35 watt teramati puncak bidang orientasi (100), (101), dan (103). Sementara, sampel film tipis daya plasma 37 watt bersifat amorf. Citra FESEM menunjukkan bahwa penggunaan daya plasma 30 watt dan 37 watt menghasilkan permukaan film tipis ZnO:Ga yang lebih rata dibandingkan dengan film tipis dengan daya plasma 35 watt. Film tipis ZnO:Ga dengan daya plasma 30 watt dan 37 watt mencapai transmitansi 80-86% dan energi gap 3,89 eV – 3,92 eV. Penurunan transmitansi terjadi pada film tipis daya plasma 35 watt yaitu 68% dengan energi gap 3,86 eV. Hal ini karena ketebalan film tipis ZnO:Ga daya plasma 35 watt meningkat.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB	
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
II. KAJIAN PUSTAKA	6
2.1 Zinc Oxide (ZnO).....	6
2.2 Galium Oksida (Ga ₂ O ₃).....	8
2.3 <i>Tranparant Conductive Oxide</i> (TCO)	10
2.4 Struktur Kristal.....	10

2.5 Sputtering	13
2.5 DC Magnetron Sputtering	14
2.6 Daya Plasma	15
2.7 Sifat Optik	16
III. METODE PENELITIAN.....	18
3.1 Pelaksanaan Penelitian.....	18
3.2 Alat dan Bahan	18
3.2.1 Bahan	18
3.2.2 Alat.....	18
3.3 Prosedur Penelitian	19
3.3.1 Preparasi Substrat	19
3.3.2 Penumbuhan Film Tipis ZnO:Ga	19
3.4 Karakterisasi Film Tipis ZnO:Ga	20
3.4.1 XRD (X-Ray Diffraction)	21
3.4.2 UV-Vis (<i>Ultraviolet Visible</i>) <i>spectrometry</i>	23
3.4.3 FESEM (<i>Field Emission Scanning Electron Microscopy</i>).....	24
3.5 Diagram Alir Penelitian	24
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Hasil Penelitian	26
4.1.1 Analisis Data <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	26
4.1.2 Analisis Data <i>Field Emission Scanning Electron Microscopy</i> (FESEM)....	30
4.1.3 Analisis Data <i>Ultraviolet Visible</i> (UV-Vis)	32
4.2 Pembahasan.....	34
V. PENUTUP.....	39
5.1 Kesimpulan	39

5.2 Saran	40
DAFTAR PUSTAKA.....	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur Kristal ZnO (a) Rocksalt, (b) Zinc blende, (c) Wurtzite	6
Gambar 2. 2 Struktur kristal ZnO heksagonal <i>wurtzite</i>	7
Gambar 2. 3 Unit sel konvensional monoklinik β -Ga ₂ O ₃	9
Gambar 2. 4 (a) Kristal tunggal, (b) polikristal, (c) amorf.....	11
Gambar 2. 5 Proses <i>sputtering</i> pada permukaan target.....	13
Gambar 2. 6 Skema reaksi dalam DC <i>magnetron sputtering</i>	14
Gambar 2. 7 Skema sistem reaktor DC <i>magnetron sputtering</i>	15
Gambar 3. 1 Hamburan sinar-X pada kristal.....	21
Gambar 3. 2 Diagram alir penelitian deposisi film tipis ZnO:Ga	25
Gambar 4. 1 Spektrum XRD film tipis ZnO:Ga variasi daya plasma	27
Gambar 4. 2 Pergeseran sudut difraksi puncak bidang (100)	29
Gambar 4. 3 Hasil FESEM film ZnO:Ga variasi daya plasma	31
Gambar 4. 4 Grafik transmitansi film tipis ZnO:Ga.	33

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter deposisi film tipis ZnO:Ga	20
Tabel 4. 1 Hasil analisis puncak difraksi film tipis ZnO:Ga	28
Tabel 4. 2 Ukuran kristal, <i>lattice strain</i> , kerapatan dislokasi puncak (100)	30
Tabel 4. 3 Ukuran kristal, <i>lattice strain</i> , kerapatan dislokasi puncak (101)	30
Tabel 4. 4 Nilai ketebalan film tipis ZnO:Ga variasi daya plasma.....	34

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan ukuran kristal puncak (100)	52
Lampiran 2. Perhitungan ukuran kristal puncak (101)	53
Lampiran 3. <i>Tauc Plot</i> energi gap film tipis ZnO:Ga.....	54
Lampiran 4. Data JCPDS No. 01-75-1533.....	55
Lampiran 5. Data JCPDS No. 43-1012.....	56

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan teknologi menuntut adanya penelitian yang semakin meningkat terutama pada penggunaan bahan-bahan dalam bentuk lapisan tipis atau film tipis. Film tipis merupakan material yang transparan terhadap cahaya dan umumnya terbuat dari material organik atau anorganik yang memiliki sifat konduktor, semikonduktor, maupun isolator (Muhammad & Nugroho, 2017). Film tipis banyak digunakan sebagai TCO (*Transparent conductive oxide*) yaitu material dengan transparansi optik tinggi pada panjang gelombang cahaya tampak karena memiliki *band gap* yang lebar (Thirumoorthi & Prakash, 2015). Sebagian besar TCO dibuat dengan struktur mikro polikristalin atau amorf. TCO dalam sel surya harus dioptimalkan dengan baik sehingga memiliki transmitansi cahaya yang tinggi serta resistivitas listrik yang rendah (Islam *et al.*, 2011). TCO digunakan untuk keperluan teknologi yang lebih ekonomis dan efisien dengan tampilan yang sama atau bahkan lebih baik. Aplikasi TCO telah berkembang cepat seperti digunakan sebagai elektroda transparan dalam tampilan panel datar, dioda pemancar cahaya (LED), dan sel surya (Klein *et al.*, 2010).

ZnO atau *Zinc Oxide* merupakan material yang diminati para peneliti sebagai material TCO. Hal ini karena ZnO merupakan material yang ketersediaannya sangat melimpah, murah serta tidak beracun (Sali *et al.*, 2008). ZnO merupakan material semikonduktor dengan celah pita energi yang lebar sekitar 3,37 eV dengan energi ikat exciton 60 MeV (Nafees *et al.*, 2013) serta memiliki sifat magnetik dan optik yang sangat penting, sehingga membuat material ini multifungsi (Haimeur *et al.*, 2018). ZnO baik digunakan sebagai *window layer* pada sel surya karena memiliki transparansi yang tinggi pada rentang cahaya tampak dan *near-IR* (Islam *et al.*, 2011).

Film tipis ZnO banyak ditemukan pada aplikasi sel surya, sensor gas dan kelembaban, transistor, perangkat fotovoltaik, perangkat optoelektronik, dioda pemancar cahaya dan laser (Masih & Srivastava, 2017). Film tipis ZnO telah banyak didoping dengan unsur-unsur dari golongan III A seperti indium (In) (Li *et al.*, 2007), boron (B) (Kerli *et al.*, 2015), aluminium (Al) (Sugianto *et al.*, 2015, Astuti *et al.*, 2018) serta galium (Ga) (Jun *et al.*, 2012, Sulhadi *et al.*, 2015, Marwoto *et al.*, 2016) karena dapat meningkatkan struktur kristal, stabilitas kimia dan transmitansi optik. Salah satu material yang dipilih sebagai doping yaitu galium (Ga). Hal ini karena galium kurang reaktif, tidak mudah teroksidasi, dan dopan tipe-*n* yang efektif untuk ZnO (Khranovsky *et al.*, 2006). Selain itu, jari-jari ion Ga^{3+} (0,062 nm) mendekati jari-jari ion Zn^{2+} (0,074 nm) (Zhong *et al.*, 2012).

Film tipis ZnO doping Galium (ZnO:Ga) memiliki transmitansi optik yang tinggi dan sifat listrik yang cukup baik serta efektif untuk stabilitas sistem kisi dan meningkatkan ionisitas ikatan kimia pada film tipis ZnO (Yu *et al.*, 2005). Proses deposisi lapisan film tipis ZnO:Ga telah dilakukan dengan berbagai metode seperti sol-gel (Cheong *et al.*, 2002), *chemical spray pyrolysis* (Reddy *et al.*, 2002), *RF magnetron sputtering* (Fang *et al.*, 2010) dan *DC magnetron sputtering* (Sahoo *et al.*, 2016, Sugianto *et al.*, 2015, Astuti *et al.*, 2018). Teknik *sputtering* merupakan proses penembakan partikel berenergi tinggi pada atom target sehingga atom target melepaskan diri dari permukaan target. Atom-atom yang terhambur akibat tumbukan tersebut akan menuju ke segala arah termasuk pada substrat dan membentuk film tipis (Wirjoadi *et al.*, 2007). Gas argon umumnya digunakan sebagai gas *sputtering* yang mengalami proses ionisasi dan membentuk plasma. Plasma dapat terbentuk karena adanya beda potensial antara anoda dan katoda sehingga dapat mengionisasi atom-atom gas yang ada (Suprpto *et al.*, 2006). Kelebihan dari *sputtering* adalah peralatan sederhana, laju deposisi tinggi, suhu substrat rendah, dan kerataan permukaan yang baik (Chen *et al.*, 2010). Salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk pembuatan film tipis ialah metode *DC magnetron sputtering*. Metode ini

menggunakan arus searah atau *direct current* (DC) tegangan tinggi yang menghasilkan medan listrik antara katoda dan anoda. Tegangan tinggi yang digunakan bertujuan agar energi penembakan dapat menghasilkan partikel berenergi tinggi.

Hasil penelitian Yen *et al.* (2010) menunjukkan bahwa penambahan suhu annealing dapat meningkatkan kualitas kristal dan sifat optik film tipis ZnO:Ga. Kualitas kristal dan sifat optik yang baik dicapai pada suhu annealing 300 °C dengan nilai transmitansi mencapai 88% dan celah pita optik sebesar 3,82 eV (Yen *et al.*, 2010). Penelitian Ma *et al.* (2007) yang mengkaji pengaruh suhu substrat melaporkan bahwa rata-rata transmitansi film tipis ZnO:Ga lebih dari 90% dengan celah pita optik mencapai 3,65 eV. Transmitansi yang tinggi dikaitkan dengan homogenitas struktur dan kristanilitas yang baik (Ma *et al.*, 2007).

Reaktor DC *magnetron sputtering* yang tersedia di laboratorium Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang telah berhasil menumbuhkan berbagai film tipis ZnO pada penelitian-penelitian sebelumnya, seperti film tipis ZnO:Ga₂O₃ dengan variasi suhu deposisi (Fatiatun, 2015), film tipis ZnO:Al dengan variasi tekanan oksigen pada proses annealing (Mahmudah, 2016), film tipis ZnO:Al dengan variasi temperatur annealing (Zannah, 2016), dan film tipis ZnO:Ga dengan variasi waktu annealing (Khanifah, 2018).

Pada penelitian ini proses deposisi film tipis ZnO:Ga akan dilakukan di atas substrat *corning glass* dengan metode *DC magnetron sputtering* dan difokuskan pada variasi daya plasma. Variasi ini dipilih karena plasma memiliki peran penting pada proses tumbukan ion penumbuk dengan atom-atom target. Karakterisasi film tipis ZnO:Ga dilakukan dengan uji XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui struktur kristal, uji FESEM (*Field Emission Scanning Electron Microscopy*) untuk mengetahui morfologi film, dan uji spektrometri UV-Vis (*Ultraviolet Visible*) untuk mengetahui sifat optik film.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana penumbuhan film tipis ZnO:Ga dengan variasi daya plasma menggunakan *DC magnetron Sputtering*?
2. Bagaimana pengaruh daya plasma terhadap struktur dan sifat optik film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan menggunakan *DC magnetron sputtering*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dituliskan, tujuan penelitian ini adalah

1. Menumbuhkan film tipis ZnO:Ga dengan variasi daya plasma menggunakan *DC magnetron sputtering*.
2. Mengetahui pengaruh daya plasma terhadap struktur dan sifat optik film ZnO:Ga yang ditumbuhkan menggunakan *DC magnetron sputtering*.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dituliskan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain

1. Memberi informasi tentang proses penumbuhan film tipis ZnO:Ga menggunakan *DC magnetron sputtering* dengan variasi daya plasma.
2. Memberi informasi mengenai struktur dan sifat optik film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan menggunakan *DC magnetron sputtering* dengan variasi daya plasma.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari tiga bagian. Bagian awal skripsi ini terdiri dari halaman judul, persetujuan pembimbing, pernyataan, pengesahan, motto dan persembahan, kata pengantar, abstrak, daftar isi,

daftar gambar, daftar tabel, dan daftar lampiran. Bagian kedua merupakan isi yang terdiri dari lima bab. Bab I berisi latar belakang, rumusan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan. Bab II berisi tentang tinjauan pustaka yang menjadi landasan teori dalam penelitian ini. Bab III berisi metode penelitian yang dilakukan meliputi alat, bahan, prosedur penelitian, karakterisasi film tipis, dan diagram alir penelitian. Bab IV berisi analisis data dan pembahasan hasil penelitian yang telah dilakukan. Bab V berisi simpulan hasil penelitian yang dilakukan serta saran untuk penelitian lebih lanjut. Bagian akhir skripsi ini terdiri atas daftar pustaka, bahan kajian referensi penelitian, dan lampiran penelitian.

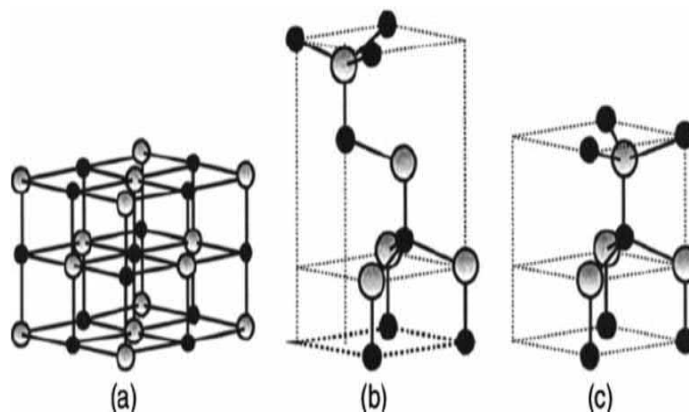
BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Zinc Oxide (ZnO)

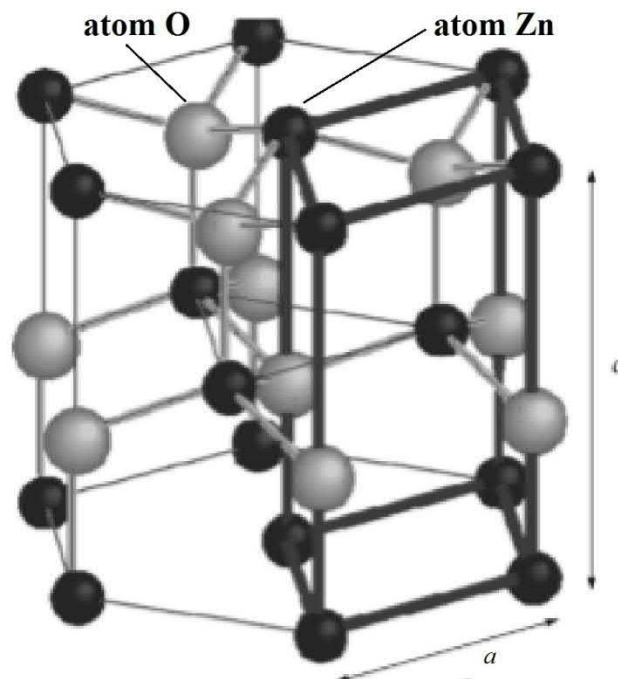
ZnO (Seng Oksida) merupakan bahan paduan dari golongan II A dan IV A antara logam dan oksida serta material semikonduktor tipe-*n* yang unik karena memiliki energi gap sebesar 3,37 eV sehingga transparan pada cahaya tampak dan memiliki energi ikat *exciton* sekitar 60 meV (Ivanova *et al.*, 2015). ZnO intrinsik dianggap sebagai semikonduktor tipe-*n* karena penyimpangan stoikiometri akibat adanya cacat intrinsik seperti kekosongan oksigen (V_O) (Yu *et al.*, 2005).

Pada dasarnya ZnO memiliki 3 tipe struktur kristal yaitu, *zinc blende*, *wurtzite*, dan *rock salt* tetapi dari ketiga struktur tersebut, *wurtzite* diketahui merupakan struktur yang paling stabil. ZnO *wurtzite* memiliki bentuk heksagonal pada suhu ruang. Bentuk heksagonal memiliki dua sub kisi yaitu Zn^{2+} dan O^{2-} yang saling bergantian membentuk bidang dasar (Sutanto & Wibowo, 2015). Dalam kristal wurtzite yang ideal, rasio aksial c/a dan parameter u berkorelasi dengan hubungan $uc / a = (3/8)^{1/2}$, di mana $c/a = (8/3)^{1/2}$ dan $u = 3/8$ untuk kristal yang ideal. Tiga tipe struktur kristal ZnO ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Struktur Kristal ZnO (a) Rocksalt, (b) Zinc blende, (c) Wurtzite
(Sumber : Özgür *et al.*, 2005)

Struktur kristal ZnO heksagonal *wurtzite* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Struktur kristal ZnO heksagonal *wurtzite*.
(Sumber : Rodnyi & Khodyuk, 2011)

ZnO adalah kristal yang banyak dipakai dalam berbagai keperluan, seperti sebagai katalis atau sebagai semikonduktor. Karakteristik kristal ZnO dipengaruhi oleh ukuran dan metode preparasinya. Preparasi kristal ZnO dengan ukuran nano telah dilakukan dengan metode yang berbeda-beda seperti metode sol gel (Aryanto *et al.*, 2017), *spray pyrolysis* (Tecaru *et al.*, 2010), dan *magnetron sputtering* (Arakelova *et al.*, 2016). ZnO juga memiliki sifat optik dan elektronik yang sangat baik, yang memiliki banyak aplikasi dalam fotokatalisis, sel surya, laser UV-VIS, sensor gas, dan LED (Varughese *et al.*, 2015).

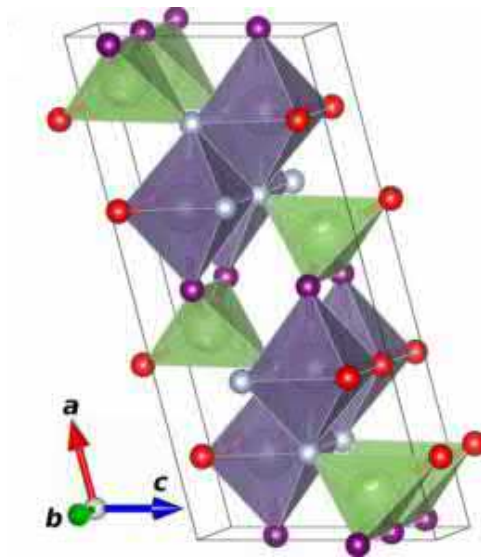
ZnO merupakan material yang berpotensi sebagai aplikasi dalam *transparent conductive oxide* karena memiliki energi gap yang lebar (3,37 eV), mudah didoping, suhu stabil ketika didoping dengan golongan III A (Singh *et al.*, 2001). ZnO dapat ditumbuhkan pada substrat yang tidak mahal seperti kaca pada suhu relatif rendah (Jagadish & Pearton, 2006). ZnO dikaitkan dengan intersisi atom Zn dan elektron yang dihasilkan karena

kekosongan dalam struktur kristal. Material dopan dan tingkat konsentrasi tertentu dapat bertindak sebagai donor elektron pada pita konduksi dalam ZnO sehingga meningkatkan konduktivitas listriknya. ZnO dapat dibuat menjadi semikonduktor tipe-*n* atau tipe-*p* berdasarkan sifat dopan pembentuknya (Salam *et al.*, 2012). Fotoluminesensi ZnO yang baik dan stabil pada rentang suhu yang tinggi menjadikan ZnO bahan yang sangat menjanjikan untuk berbagai aplikasi perangkat optoelektronik (Sharma *et al.*, 2014).

2.2 Galium Oksida (Ga₂O₃)

Galium merupakan unsur golongan III A yang mempunyai lambang Ga dan nomor atom 31 dengan konfigurasi $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$. Galium mempunyai 3 elektron valensi, agar tercapai keadaan stabil, Galium harus melepas elektron valensinya sehingga berubah menjadi Ga³⁺. Ga₂O₃ secara intrinsik bersifat insulator, namun dapat juga bersifat sebagai semikonduktor tipe-*n* karena kekurangan sedikit atom oksigen dalam kekisi kristalnya (Rafique *et al.*, 2016).

Ga₂O₃ menunjukkan lima polimorf yang berbeda (α , β , γ , δ , dan ϵ). Ini dikenal sebagai korundum (α), monoklinik (β), spinel yang rusak (γ), dan ortorombik (ϵ), dengan fase δ yang diterima secara umum sebagai bentuk fase ortorombik. β -Ga₂O₃ merupakan yang paling stabil, baik secara termal dan kimia. Struktur kristalnya berbasis monoklinik berpusat pada kelompok ruang 12 (C₂/m), dengan ion Ga menempati situs oktahedral dan tetrahedral yang terdistorsi, dan ion O dalam kemasan kubik terdistorsi dengan tiga situs yang tidak seimbang (Peelaers & Walle, 2015). Struktur monoklinik dapat dijelaskan dalam sel satuan konvensional seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 dengan parameter kisi *a*, *b*, dan *c* dengan β adalah sudut antara sumbu *a* dan *c*. Sudut antara sumbu lainnya adalah 90° (Peelaers & Walle, 2015).



Gambar 2. 3 Unit sel konvensional monoklinik β -Ga₂O₃
(Sumber : Peelaers & Walle, 2015)

Galium oksida atau Ga₂O₃ merupakan bahan semikonduktor dengan celah pita energi lebar $E_g = 4,8$ eV sehingga transparan dalam sinar UV (Marwoto *et al.*, 2009). Galium memiliki keuntungan sebagai dopan pada ZnO karena Ga³⁺ memiliki jari-jari (0,062 nm) yang mendekati jari-jari Zn²⁺ (0,074 nm) sehingga Ga³⁺ dapat menggantikan Zn²⁺ tanpa mengganggu kisi dan menyebabkan tekanan bebas pada bahan ZnO (Hjiri *et al.*, 2015). Selain itu, panjang ikatan kovalen Ga-O (1,92 Å) lebih kecil dibandingkan panjang ikatan kovalen Zn-O (1,97 Å) mampu untuk meminimalkan deformasi kisi ZnO (Assuncao *et al.*, 2003).

Sifat *luminescence* senyawa Ga₂O₃ tanpa doping pada spektrum UV sebesar 3,40 eV, warna biru sebesar 2,59 eV, dan warna hijau sebesar 2,48 eV (Marwoto *et al.*, 2012). Material Ga₂O₃ banyak diaplikasikan sebagai bahan dielektrik, sensor kimia, *transparent conductive oxide (TCO)*, serta *thin film electroluminescence (TFEL)*. Galium sedang dipertimbangkan untuk pembuatan elektroda transparan karena transmitansi yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, dan adhesi yang baik untuk substrat (Shinde *et al.*, 2012).

2.3 *Tranparant Conductive Oxide (TCO)*

Tranparant Conductive Oxide (TCO) merupakan material dengan transparansi optik tinggi pada panjang gelombang cahaya tampak (Thirumoorthi & Thomas, 2015). TCO memiliki energi *band gap* yang lebar yaitu antara 2,5 - 4,5 eV (Song, 2005) sehingga energi cahaya yang berada pada rentang energi bdangap tersebut yang akan diteruskan atau ditransmisikan oleh TCO. Bahan utama TCO meliputi berbagai logam oksida seperti kadmium, timah, seng, indium, dan paduannya dalam bentuk film tipis, seperti timah oksida (SnO_2), oksida timah indium (In_2O_3 , juga disebut ITO), dan seng oksida (ZnO) (Minami, 2005).

TCO pada dasarnya bersifat konduktif. Hal ini dikarenakan ikatan ionik yang dibentuk oleh unsur penyusunnya yang berupa logam dan oksigen. Ikatan tersebut biasanya terbentuk dari ikatan antara logam dengan oksigen yang memungkinkan atom terlepas dengan sendirinya dari posisi normal ke posisi lain yang menyebabkan elektron terlepas dari struktur oksida.

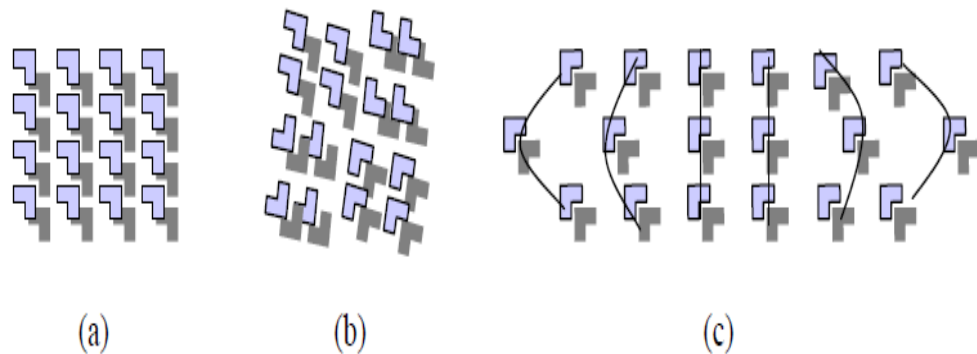
Tranparant Conductive Oxide (TCO) mampu mengangkut muatan listrik dan mentransmisikan foton serta digunakan sebagai *organic electroluminescence (EL)* seperti *touch screen* monitor pada *authomatic tellermachine (ATM)* (Sinaga, 2009), elektroda transparan di layar panel datar seperti *liquid crystal display (LCD)*, dan dioda pemancar cahaya (LED) (Liu *et al.*, 2013).

2.4 Struktur Kristal

Zat padat dapat diklasifikasikan menjadi kristal dan amorf. Disebut sebagai kristal apabila mempunyai susunan atom yang sangat rapi dan teratur, sebaliknya bila susunan atomnya tidak teratur maka disebut sebagai amorf. Kristal adalah suatu padatan dengan molekul atom, atau ion penyusunnya tersusun dalam suatu pola tertentu (Chairunnisa & Wardhana, 2016). Suatu kristal mempunyai jumlah muka (*crystal faces*) tertentu dengan sudut antar muka (*interfacial angle*) yang tertentu pula. Kristal dapat

tumbuh menjadi berbagai macam bentuk dengan tetap mempertahankan jumlah muka, dan sudut antar muka yang sama (Fachry *et al.*, 2008).

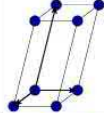
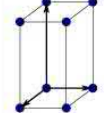
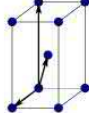
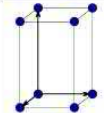
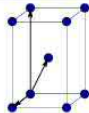
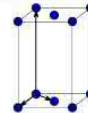
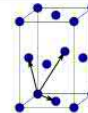
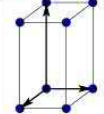
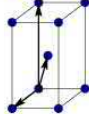
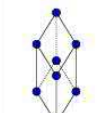
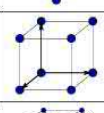
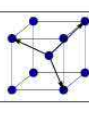
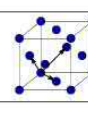

Kristal mempunyai keteraturan atau pengulangan pola dasar sampai tak terhingga batasnya ke segala arah. Pengulangan pola inilah yang menentukan sifat-sifat khas suatu kristal. Suatu benda dengan perulangan pola yang terdapat di dalam seluruh tubuhnya disebut sebagai kristal tunggal. Kristal tunggal dalam ukuran kecil (diameter < 0.1 mm) disebut kristalit, sedangkan kumpulan kristalit yang membentuk pola tertentu disebut sebagai polikristal (Sugianto & Nurbaiti, 2005). Gambaran kristal tunggal, polikristal, dan amorf dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 (a) Kristal tunggal, (b) polikristal, (c) amorf
(Sumber : Sugianto & Nurbaiti, 2005)

Struktur kristal dapat digambarkan dalam bentuk kisi. Kisi yang memiliki titik-titik kisi ekuivalen disebut kisi Bravais sehingga atom-atom akan menempati kisi-kisi tersebut dan membentuk suatu struktur kristal. Menurut anggapan Bravais, kristal memiliki 14 macam kisi dan berdasarkan perbandingan sumbu-sumbu kristal dengan hubungan sudut satu dengan sudut lain, kristal dapat dikelompokkan dalam 7 sistem kristal. Tujuh sistem kristal dan keempat belas macam kisi ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Tujuh sistem kristal dan empat belas kisi Bravais

Bravais lattice	Parameters	Simple (P)	Volume centered (I)	Base centered (C)	Face centered (F)
Triclinic	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} \neq \alpha_{23} \neq \alpha_{31}$				
Monoclinic	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$ $\alpha_{12} \neq 90^\circ$				
Orthorhombic	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				
Tetragonal	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				
Trigonal	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} < 120^\circ$				
Cubic	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				
Hexagonal	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} = 120^\circ$ $\alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				

Susunan kristal pada kenyataannya tidak selalu identik dan berulang di seluruh volumenya. Setiap kristal mengandung cacat (*defect*) yang kebanyakan terjadi pada kisi-kisi kristalnya. Cacat kristal ini kemungkinan terjadi selama proses pertumbuhan kristal, proses pemurnian atau proses laku (*treatment*), dan bahkan cacat kristal sengaja diciptakan untuk menghasilkan sifat-sifat tertentu. Cacat dalam suatu kristal terjadi ketika kehilangan atom, atom yang tidak pada tempatnya, kehadiran atom asing, dan sebagainya.

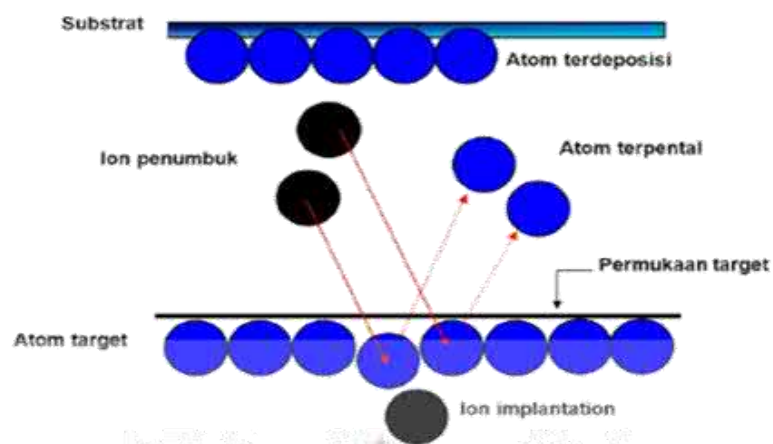
Cacat pada kristal semikonduktor dapat dikelompokkan sebagai cacat titik, cacat garis, cacat planar, dan cacat ruang. Cacat kristal yang paling sederhana adalah cacat titik. Cacat titik atau sering disebut cacat alami dikelompokkan menjadi tiga yaitu kekosongan (*vacancy*), *self*

interstitial, dan *antisite*. Dislokasi adalah jenis cacat kristal yang terjadi karena sebaris atom tidak berada pada kedudukan yang seharusnya. Terdapat dua bentuk dasar dislokasi yaitu dislokasi tepi dan dislokasi sekrup. Cacat planar dan cacat ruang tidak begitu penting dalam kristal tunggal, tetapi menjadi sangat penting pada polikristal.

2.5 Sputtering

Sputtering merupakan proses terlemparnya partikel (atom atau ion) dari suatu permukaan zat padat atau zat cair akibat ditumbuk oleh partikel berenergi tinggi. Atom-atom yang terhambur akibat tumbukan tersebut akan menuju segala arah termasuk pada substrat dan membentuk film tipis (Wirjoadi *et al.*, 2007). Proses ini biasanya dilakukan dalam sebuah *chamber* atau ruang vakum dengan tujuan untuk mengurangi efek tumbukan dengan atom oksigen yang dapat mengganggu hasil proses pelapisan.

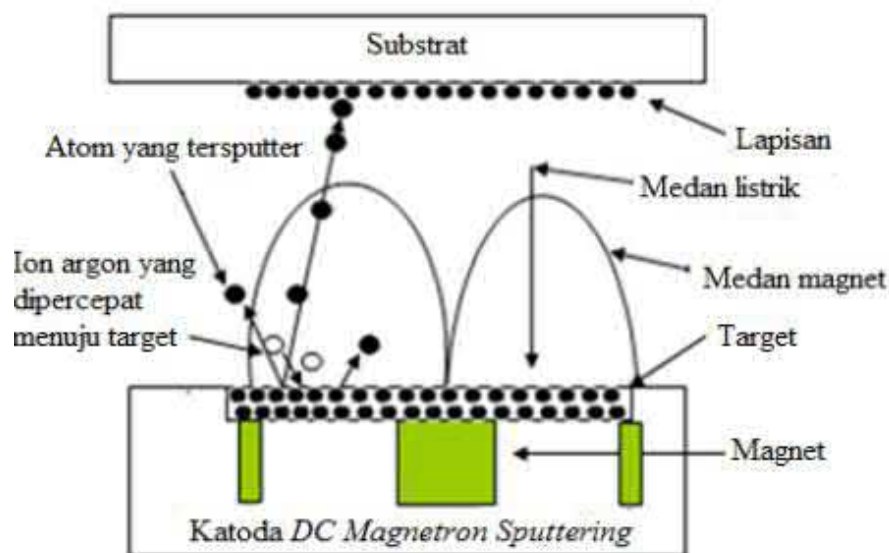
Pada proses *sputtering*, gas akan dialirkan dalam ruang vakum dan diberi beda potensial agar terbentuk plasma yang menghasilkan partikel berenergi tinggi untuk melepaskan atom-atom dari permukaan target sehingga menuju substrat dan membentuk film tipis. Lepasnya atom-atom target dari permukaan disebabkan oleh adanya perpindahan energi dari atom penembak ke atom permukaan (Suprpto *et al.*, 2006). Proses *sputtering* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Proses *sputtering* pada permukaan target

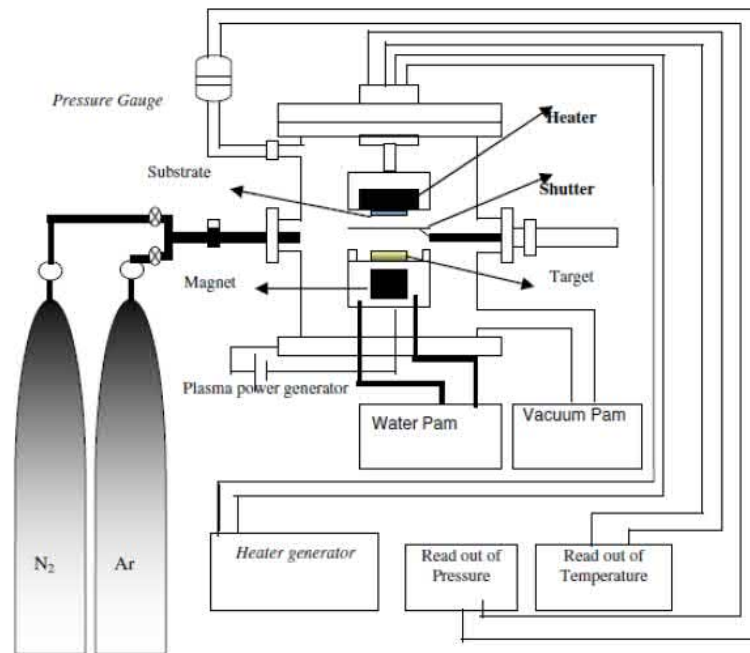
2.6 DC Magnetron Sputtering

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*) dan menembaki bahan pelapis dengan ion berenergi tinggi, umumnya menggunakan gas Argon sehingga bahan pelapis dapat terlepas dengan energi kinetik tinggi dan menempel pada permukaan yang akan dilapisi. Gas Argon dipilih sebagai bahan pembentuk plasma karena merupakan gas mulia yang tidak bereaksi dengan target dan berfungsi membawa atom target menuju anoda (Tunggadewi & Hidayanti, 2015). Skema reaksi dalam *DC magnetron sputtering* ditunjukkan Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Skema reaksi dalam *DC magnetron sputtering*
(Sumber : Joshi, 2003)

Penambahan sistem magnet pada metode *DC magnetron sputtering* yang diletakkan di bawah katoda bertujuan untuk meningkatkan medan magnet sehingga menambah tumbukan ion dengan bahan pelapis. Skema sistem reaktor *DC magnetron sputtering* yang ditunjukkan Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Skema sistem reaktor DC *magnetron sputtering*
(Sumber : Marwoto *et al.*, 2010)

2.7 Daya Plasma

Daya adalah jumlah energi yang diserap atau dihasilkan dalam sebuah sirkuit atau rangkaian (Arizal *et al.*, 2017). Rumus yang digunakan untuk menghitung daya listrik dinyatakan dalam persamaan (2.1)

$$P = V.I \quad (2.1)$$

dengan P adalah daya (watt), V adalah potensial (volt), dan I adalah arus (ampere).

Plasma didefinisikan sebagai gas yang terionisasi dalam keadaan kuasinetral dari partikel yang bermuatan dan partikel netral yang menunjukkan fenomena kolektif. Fenomena kolektif adalah suatu kondisi yang kompleks dengan proses-proses atomis seperti ionisasi, eksitasi serta kombinasi yang terjadinya dalam waktu yang hampir bersamaan (Suprpto *et al.*, 2006).

Plasma dapat terjadi karena adanya beda potensial antara anoda dan katoda sehingga dapat mengionisasi atom-atom gas yang ada. Ion-ion positif yang dihasilkan dari proses ionisasi akan bergerak menuju katoda. Dalam

pergerakannya menuju katoda, ion-ion positif tersebut akan dipercepat oleh medan listrik karena adanya beda potensial antara anoda dan katoda. Tumbukan ion yang telah dipercepat dengan katoda terjadi secara terus-menerus (Suprpto *et al.*, 2006).

2.8 Sifat Optik

Sifat optik menentukan karakteristik film tipis yang ditunjukkan dengan interaksi film tipis dengan cahaya. Ketika cahaya mengenai suatu bahan atau material maka sebagian akan diserap, dipantulkan, atau ditransmisikan. Nilai transmitansi diperoleh dalam bentuk spektrum transmitansi (%) terhadap panjang gelombang (nm) (Doyan & Humaini, 2017).

Transmitansi merupakan perbandingan antara intensitas cahaya setelah dan sebelum melewati material semikonduktor, yang dinyatakan dalam persamaan (2.2)

$$T = \frac{I}{I_0} \times 100\% . \quad (2.2)$$

Intensitas radiasi berkurang secara eksponensial terhadap ketebalan film sehingga persamaan (2.2) dapat dinyatakan dalam persamaan (2.3)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha b} \quad (2.3)$$

dengan b adalah ketebalan film dan α adalah koefisien absorpsi optik. Berdasarkan data energi cahaya dan besarnya koefisien absorpsi optik dapat ditentukan nilai *band gap*.

Pengukuran sifat optik menggunakan gelombang elektromagnetik dari ultraviolet sampai inframerah. Parameternya adalah panjang gelombang (λ) dan energi ($h\nu$). Hubungan antara panjang gelombang dengan energi ditunjukkan pada persamaan (2.4)

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.4)$$

dengan E adalah energi (Joule), h adalah ketetapan Plank ($6,626 \times 10^{-34}$ Js), c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 m/s), dan λ adalah panjang gelombang (nm).

Material semikonduktor dengan celah pita energi langsung (*direct band gap*) memiliki hubungan sederhana antara α dengan $h\nu$, khususnya untuk energi foton yang hampir setara dengan nilai celah pita energi semikonduktor. Absorbansi bahan semikonduktor menyebabkan terjadinya eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi (Agustina *et al.*, 2015). Pada jangkauan tersebut koefisien absorpsi memenuhi persamaan (2.5) (Wang *et al.*, 2011)

$$(\alpha h\nu)^2 = C (h\nu - E_g) \quad (2.5)$$

dengan E_g adalah lebar celah pita energi dan C adalah konstanta yang terkait dengan sifat pita energi.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Film tipis ZnO:Ga ditumbuhkan menggunakan *DC magnetron sputtering* di atas substrat *corning glass* dengan temperatur 300 °C, tekanan Argon 500 mTorr, dan lama penumbuhan 120 menit. Karakterisasi struktur kristal dengan XRD menunjukkan bahwa Film tipis ZnO:Ga yang dihasilkan adalah polikristalin dengan puncak dari ZnO dan Ga₂O₃. Film tipis ZnO:Ga daya plasma 30 watt memiliki nilai FWHM yang lebih kecil dari film tipis daya plasma 35 watt. Daya plasma 35 watt menyebabkan kristalinitas menurun dengan ukuran kristal yang kecil, *lattice strain* dan kerapatan dislokasi yang besar. Sementara, film tipis dengan daya plasma 37 watt bersifat amorf.

Karakterisasi morfologi permukaan film tipis dengan FESEM menunjukkan bahwa film tipis ZnO:Ga daya plasma 30 watt memiliki permukaan yang lebih rata. Pada daya plasma 35 watt terlihat bahwa permukaan film memiliki butiran yang lebih besar. Sedangkan pada daya plasma 37 watt, film memiliki permukaan yang lebih rata disertai dengan munculnya *void* atau kekosongan.

Karakterisasi sifat optik dengan UV-Vis menunjukkan bahwa pemberian daya plasma 30 watt dan 37 watt mengakibatkan terjadinya peningkatan transmitansi film dan energi *gap*. Namun, pemberian daya plasma 35 watt menurunkan transmitansi film. Transmitansi yang rendah disebabkan karena ketebalan film tipis daya plasma 35 watt memiliki nilai yang paling besar. Film tipis ZnO:Ga daya plasma 35 watt juga memiliki energi *gap* yang paling kecil.

5.2 Saran

Penumbuhan film tipis ZnO:Ga daya plasma 30 watt perlu dikembangkan lagi dengan melakukan variasi waktu deposisi, sehingga dapat diketahui lama waktu yang digunakan dalam proses deposisi dan pengaruhnya terhadap kualitas film tipis yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, E., D. Dahlan, dan Syukri. 2015. "Struktur Dan Sifat Optik Lapisan Tipis TiO₂ (Titanium Oksida) Yang Dihasilkan Dengan Menggunakan Metode Elektrodeposisi." *Jurnal Fisika Undan* 2:180–85.
- Aly, S. A. dan Alaa A. Akl. 2015. "Influence of Film Thickness on Optical Absorption dan Energy Gap of Thermally Evaporated CdS_{0.1} Se_{0.9} Thin Films." *Chalcogenide Letters* 12(10):489–96.
- Arakelova, E., A. Khachatryan, A. Kteyan, K. Avjyan, dan S. Grigoryan. 2016. "ZnO Film Deposition by DC Magnetron Sputtering: Effect of Target Configuration on the Film Properties." *Thin Solid Films* 612.
- Arizal, F., Muhammad Hasbi, dan Abd. Kadir. 2017. "Pengaruh Kadar Garam Terhadap Daya Yang Dihasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Air Garam Sebagai Energi Alternatif Terbarukan." *ENTHalPY Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin* 2(1):1–5.
- Aryanto, D., Naimatul Husniya, Toto Sudiro, dan Erna Hastuti. 2017. "Perlakuan Panas Gd₂O₃ Pada Fabrikasi Film Tipis AZO Nanokristal Dengan Teknik Spray : Studi XRD." *Metalurgi* 2:45–52.
- Aryanto, D., W. N. Jannah, Masturi, T. Sudiro, A. S. Wismogroho, P. Sebayang, Sugianto, dan P. Marwoto. 2017. "Preparation dan Structural Characterization of ZnO Thin Films by Sol-Gel Method." *Journal of Physics Conference Series* 817:12025.
- Aryanto, D., Sugianto, Putut Marwoto, dan Sulhadi. 2014. "Karakterisasi Struktur Dan Sifat Listrik Film Tipis Zinc Oxide Didoping Gallium Dan Aluminium." *Jurnal Sains Materi Indonesia* 15:129–32.
- Assuncao, V., E. Fortunato, A. Marques, H. Aguas, I. Ferreira, M. E. V. Costa, dan R. Martins. 2003. "Influence of the Deposition Pressure on the Properties

of Transparent dan Conductive ZnO : Ga Thin-Film Produced by R.f. Sputtering at Room Temperature.” *Thin Solid Films* 427:401–5.

Astuti, B., Sugianto, Siti Nor Mahmudah, Putut Marwoto, Didik Ariyanto, dan Edy Wibowo. 2018. “Oxygen Effect in Annealing Process of Aluminium Doped Zinc Oxide Films.” *EDUCATUM JSMT* 5(2):33–39.

Babar, A. R., P. R. Deshamukh, R. J. Deokate, D. Haranath, C. H. Bhosale, dan K. Y. Rajpure. 2008. “Gallium Doping in Transparent Conductive ZnO Thin Films Prepared by Chemical Spray Pyrolysis.” *Journal of Physics D: Applied Physics* 41.

Chairunnisa, P. S. dan Y. W. Wardhana. 2016. "Karakterisasi Kristal Bahan Padat Aktif Farmasi : Review.” *Suplemen* 14:17–32.

Chen, H., Jijun Ding, dan Shuyi Ma. 2010. “Structural dan Optical Properties of ZnO:Mg Thin Films Grown under Different Oxygen Partial Pressures.” *Physica E* 42:1487–91.

Cheong, K. Y., Norani Muti, dan S.Roy Ramanan. 2002. “Electrical dan Optical Studies of ZnO:Ga Thin Films Fabricated via the Sol-Gel Technique.” *Thin Solid Films* 410:142–46.

Doyan, A. dan Humaini. 2017. “Sifat Optik Lapisan Tipis ZnO.” *Jurnal Pendidikan Fisika Dan Teknologi* III:34–39.

Fachry, A. R., J. Tumanggor, dan NI Putu Endah Yuni L. 2008. “Pengaruh Waktu Kristalisasi Dengan Proses Pendinginan Terhadap Pertumbuhan Kristal Amonium Sulfat Dari Larutannya.” *Jurnal Teknik Kimia* 15(2):9–16.

Fang, L., K. Zhou, F. Wu, Q. L. Huang, X. F. Yang, dan C. Y. Kong. 2010. “Effect of Ga Doping Concentration on Electrical dan Optical Properties of Nano-ZnO:Ga Transparent Conductive Films.” *Journal of Superconductivity dan Novel Magnetism* 23:885–88.

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.

Haimeur, A. E., L. El Gana, M. Addou, dan A. El Kenz. 2018. “Effect of Tuning the Structure on the Optical dan Magnetic Properties by Various Transition Metal Doping in ZnO/TM (TM = Fe, FeCo, Cr, dan Mn) Thin Films.” *Journal of Superconductivity dan Novel Magnetism* 31:569–76.

Hjiri, M., R. Dhahri, L. El Mir, A. Bonavita, N. Donato, S. G. Leonardi, dan G. Neri. 2015. “CO Sensing Properties of Ga-Doped ZnO Prepared by Sol-Gel Route.” *Journal of Alloys dan Compounds* 634:187–92.

Islam, M. M., S. Ishizuka, A. Yamada, K. Matsubara, S. Niki, T. Sakurai, dan K. Akimoto. 2011. “Thickness Study of Al:ZnO Film for Application as a Window Layer in Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ Thin Film Solar Cell.” *Applied Surface Science* 257:4026–30.

Ivanova, T., A. Harizanova, T. Koutzarova, dan B. Vertruyen. 2010. “Study of ZnO Sol-Gel Films: Effect of Annealing.” *Materials Letters* 64:1147–49.

Ivanova, T., A. Harizanova, T. Koutzarova, dan B. Vertruyen. 2015. “Optical Characterization of Sol-Gel ZnO:Al Thin Films.” *Superlattices dan Microstructures* 85:101–11.

Ivanova, T., A. Harizanova, T. Koutzarova, B. Vertruyen, dan B. Stefanov. 2017. “Structural dan Morphological Characterization of Sol-Gel ZnO:Ga Films: Effect of Annealing Temperatures.” *Thin Solid Films*.

Jagadish, C. dan S. J. Pearton. 2006. *Zinc Oxide Bulk, Thin Films dan Nanostructures*. Oxford: Elsevier.

Joshi, Chirag. 2003. *Characterization dan Corrosion of BCC-Tantalum Coating Deposited on Aluminum dan Steel Substrate by DC Magnetron Sputtering*. Tesis. New Jersey : New Jersey Institute of Technology.

Jun, M. C., Sang Uk Park, dan Jung Hyuk Koh. 2012. “Comparative Studies of

- Al-Doped ZnO dan Ga-Doped ZnO Transparent Conducting Oxide Thin Films.” *Nanoscale Research Letters* 7:639.
- Kao, M. C., H. Z. Chen, dan S. L. Young. 2010. “Effects of Preannealing Temperature of ZnO Thin Films on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells.” *Applied Physics A: Materials Science dan Processing* 98:595–99.
- Kerli, S., U. Alver, A. Tanriverdi, dan B. Avar. 2015. “Structural dan Physical Properties of Boron Doped ZnO Films Prepared by Chemical Spray Pyrolysis Method.” *Crystallography Reports* 60(6):946–50.
- Khanifah, Lana. 2018. *Pengaruh Waktu Annealing Terhadap Struktur Kristal Dan Morfologi Film Tipis Zinc Oxide Doping Gallium Dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang : FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Khranovskyy, V., U. Grossner, O. Nilsen, V. Lazorenko, G. V. Lashkarev, B. G. Svensson, dan R. Yakimova. 2006. “Structural dan Morphological Properties of ZnO:Ga Thin Films.” *Thin Solid Films* 515:472–76.
- Klein, A., K. Christoph, Danre Wachau, Frank Sauberlich, Yvonne Gassenbauer, Steven P. Harvey, Diana E. Proffit, dan Thomas O. Mason. 2010. “Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics: Manipulation of Fermi Level, Work Function dan Energy Bdan Alignment.” *Materials* 3:4892–4914.
- Li, H., Erqing Xie, Min Qiao, Xiaojun Pan, dan Yongzhe Zhang. 2007. “Properties of Indium-Doped ZnO Films Prepared in an Oxygen-Rich Plasma.” *Journal of Electronic Materials* 36(9):1219–23.
- Liu, Y., Y. Li, dan H. Zeng. 2013. “ZnO-Based Transparent Conductive Thin Films : Doping , Performance , dan Processing.” *Jurnal of Nanomaterials* 2013.
- Ma, Q. B., Zhi Zhen Ye, Hai Ping He, Jing Rui Wang, Li Ping Zhu, dan Bing Hui

- Zhao. 2007. "Substrate Temperature Dependence of the Properties of Ga-Doped ZnO Films Deposited by DC Reactive Magnetron Sputtering." *Vacuum* 82:9–14.
- Mahmudah, Siti Nor. 2016. *Pengaruh Tekanan Oksigen Pada Proses Annealing Film Tipis Zinc Oksida (ZnO) Doping Aluminium (Al)*. Skripsi. Semarang : FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Maia, A., Marta Ochoa, Antonio Portugal, dan Luísa Durães. 2015. "Nanocrystalline ZnO Thin Films – Influence of Sol-Gel Conditions on the Underlying Chemistry dan Film Microstructure dan Transparency." *Materials Today: Proceedings* 2:49–56.
- Marwoto, P., Ng.Made D.P., Agus Yulianto, Sugianto, dan Sunarno. 2009. "Struktur Morfologi Dan Fotoluminisensi Film Tipis Ga₂O₃: Mn." in *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, dan Penerapan MIPA Fakultas MIPA*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Marwoto, P., Mustaanah, Sugianto, dan Sulhadi. 2010. "Struktur Dan Sifat Optik Film Tipis Galium Oksida Doping ZnO (2%) Yang DIFabrikasikan Dengan DC Magnetron Sputering." Pp. 122–27 in *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng&DIY*. Semarang.
- Marwoto, P., Sugianto, dan E. Wibowo. 2012. "Growth of Europium-Doped Gallium Oxide (Ga₂O₃:Eu) Thin Films Deposited by Homemade DC Magnetron Sputtering." *Journal of Theoretical dan Applied Physics* 6.
- Marwoto, Putut, Fatiatun, Sulhadi, Sugianto, dan Didik Aryanto. 2016. "Effects of Argon Pressure on the Properties of ZnO:Ga Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering." *AIP Conference Proceedings* 1719.
- Masih, V. G. dan Anchal Srivastava. 2017. "Redshift in the UV Emission dan Curtailment in Optical Bdan Gap of Manganese Doped Zinc Oxide Thin Films." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 28:8238–45.

- Minami, Tadatsugu. 2005. "Transparent Conducting Oxide Semiconductors for Transparent Electrodes." *Semiconductor Science dan Technology* 20:35–44.
- Muhammad, B. R. dan Aris Widyo Nugroho. 2017. "Disain Dan Fabrikasi Mesin Sputtering Skala Laboratorium Untuk Penumbuhan Film Tipis." *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika* 20(1):1–7.
- Nafees, M., Wasim Liaqut, Salamat Ali, dan Muhammad Ahsan Shafique. 2013. "Synthesis of ZnO/Al:ZnO Nanomaterial: Structural dan Bdan Gap Variation in ZnO Nanomaterial by Al Doping." *Applied Nanoscience* 3:49–55.
- Özgür, Ü., Ya I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S. Cho, dan H. Morkoç. 2005. "A Comprehensive Review of ZnO Materials dan Devices." *Journal of Applied Physics* 98.
- Peelaers, H. dan C. G. V. de Walle. 2015. "Brillouin Zone dan Bdan Structure of β -Ga₂O₃." *Physica Status Solidi (B) Basic Research* 252(4):828–32.
- Putri, R. K. P. dan N. M. D. Putra. 2014. "Karakterisasi Struktur, Optik, Dan Listrik Film Tipis Polianilin (PANI) Doping HCL Yang Ditumbuhkan Dengan Metode Spin Coating." *Unnes Physics Journal* 3(1).
- Rafique, S., Lu Han, dan Hongping Zhao. 2016. "Synthesis of Wide Bdan Gap Ga₂O₃ (Eg ~4.6–4.7 eV) Thin Films on Sapphire by Low Pressure Chemical Vapor Deposition." *Physics Status Solidi A* 3(4):1002–9.
- Reddy, K. T. R., T. B. S. Reddy, I. Forbes, dan R. W. Miles. 2002. "Highly Oriented dan Conducting ZnO:Ga Layers Grown by Chemical Spray Pyrolysis." *Surface dan Coatings Technology* 151–152:110–13.
- Rezeika, S. H. dan Suprpto. 2015. "Analisis Spektroskopi UV – VIS ‘ Analisis Komponen Secara Simultan .’" *Jurnal Sains Dan Seni ITS* 4(1):1–5.
- Rodnyi, P. A. dan I. V. Khodyuk. 2011. "Optical dan Luminescence Properties of Zinc Oxide." *Optics dan Spectroscopy* 111(5):776–85.

- Sahoo, S. K., Chdanan Ashis Gupta, dan Udai P. Singh. 2016. "Impact of Al dan Ga Co-Doping with Different Proportion in ZnO Thin Film by DC Magnetron Sputtering." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*.
- Salam, S., Mohammad Islam, dan Aftab Akram. 2012. "Sol-Gel Synthesis of Intrinsic dan Aluminum-Doped Zinc Oxide Thin Films as Transparent Conducting Oxides for Thin Film Solar Cells." *Thin Solid Films*.
- Sali, S., M. Boumaour, dan R. Tala-Ighil. 2008. "Preparation dan Characteristic of Low Resistive Zinc Oxide Thin Films Using Chemical Spray Technique for Solar Cells Application The Effect of Thickness dan Temperature Substrate." *Revue Des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse* 201–7.
- Saragih, Horasdia, Hasniah Aliah, Euis Sustini, Albinur Limbong, dan Albert Manggading Hutapea. 2010. "Sifat Optik Lapisan Tipis In_2O_3 yang Ditumbuhkan Dengan Metode MOCVD." *Jurnal Matematika Dan Sains* 15:85–92.
- Sharma, S., Sumit Vyas, C. Periasamy, dan P. Chakrabarti. 2014. "Structural dan Optical Characterization of ZnO Thin Films for Optoelectronic Device Applications by RF Sputtering Technique." *Superlattices dan Microstructures* 75:378–89.
- Shinde, S. S., P. S. Shinde, Y. W. Oh, D. Haranath, C. H. Bhosale, dan K. Y. Rajpure. 2012. "Structural, Optoelectronic, Luminescence dan Thermal Properties of Ga-Doped Zinc Oxide Thin Films." *Applied Surface Science* 258:9969–76.
- Sim, K. U., Seung Wook Shin, A. V. Moholkar, Jae Ho Yun, Jong Ha Moon, dan Jin Hyeok Kim. 2010. "Effects of Dopant (Al, Ga, dan In) on the Characteristics of ZnO Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering System." *Current Applied Physics* 10:463–67.
- 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.” *Jurnal Pengajaran MIPA* 14(2):51–59.

Singh, A. V., Manoj Kumar, R. M. Mehra, Akihiro Wakahara, dan Akira Yoshida. 2001. “Al-Doped Zinc Oxide (ZnO : Al) Thin Films by Pulsed Laser.” *Journal Indian Institute of Science* 81:527–33.

Song, Dengyuan. 2005. *Zinc Oxide TCOs (Transparent Conductive Oxides) dan Polycrystalline Silicon Thin-Films*. Sydney: The University of New South Wales.

Sugianto, Nathan Hendarto, Putut Marwoto, dan Edy Wibowo. 2010. “Pengaruh Daya Plasma Pada Struktur Mikro Dan Sifat Optik Film Tipis CdTe Yang Ditumbuhkan Dengan DC Magnetron Sputtering.” Pp. 134–38 in *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng&DIY*. Semarang.

Sugianto dan Upik Nurbaiti. 2005. *Buku Ajar Fisika Zat Padat*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.

Sugianto, Putut Marwoto, Budi Astuti, Rofiatul Zannah, dan Yanti. 2015. “Pengaruh Temperatur Deposisi Terhadap Struktur Dan Sifat Optik Film Tipis ZnO:Al Dengan Metode DC Magnetron Sputtering.” *Jurnal Fisika* 5(2).

Sugianto, R. Zannah, SN Mahmudah, B. Astuti, NMD Putra, AA Wibowo, P. Marwoto, D. Ariyanto, dan E. Wibowo. 2017. “Pengaruh Temperatur Annealing Pada Sifat Listrik Film Tipis Zinc Oksida Doping Alumunium Oksida.” *Jurnal MIPA* 39:115–22.

Sulhadi, Fatiatun, Putut Marwoto, dan Edi Wibowo. 2015. “Variasi Suhu Deposisi Pada Struktur , Sifat Optik Dan Listrik Film Tipis Seng Oksida Dengan Doping Galium (ZnO : Ga).” *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia* 11:93–99.

Suprpto, Sayono, dan Lely Susita R.M. 2006. “Karburasi Baja ST 40 Dengan

- Teknik Sputtering.” *Jurnal Sains Materi Indonesia* 8:23–30.
- Suryanarayana, C. dan M. Grant Norton. 1998. *X-Ray Diffraction A Practical Approach*. 1st Editio. New York: Plenum Publishing Corporation.
- Sutanto, H. dan S. Wibowo. 2015. *Semikonduktor Fotokatalis Seng Oksida Dan Titania (Sintesis , Deposisi Dan Aplikasi)*. edited by A. Luthfia. Semarang: Penerbit Telescope.
- Syukron, A., D. D. Risanti, dan D. Sawitri. 2013. “Pengaruh Preparasi Pasta Dan Temperatur Annealing Pada Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) Berbasis Nanopartikel ZnO.” *Jurnal Teknik POMITS* 2(2).
- Tahir, D. dan K. H. Jae. 2017. “Effect of Growth Temperature on Structural dan Electronic Properties of ZnO Thin Films.” *AIP Conference Proceedings* 1801.
- Tecaru, A., A. I. Danciu, V. Muşat, E. Fortunato, dan E. Elangovan. 2010. “Zinc Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis.” *Journal of Optoelectronics dan Advanced Materials* 12(9):1889–93.
- Thirumoorthi, M. dan J. Thomas Joseph Prakash. 2015. “Structural, Morphological Characteristics dan Optical Properties of Y Doped ZnO Thin Films by Sol-Gel Spin Coating Method.” *Superlattices dan Microstructures* 85:237–47.
- Timuda, G. E. dan Akhiruddin Maddu. 2010. “Pengaruh Ketebalan Terhadap Sifat Optik Lapisan Semikonduktor Cu₂O Yang Dideposisikan Dengan Metode Chemical Bath Deposition (CBD).” *Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi TELAAH* 28:1–5.
- Tsay, C. Y., Kai Shiung Fan, dan Chien Ming Lei. 2012. “Synthesis dan Characterization of Sol-Gel Derived Gallium-Doped Zinc Oxide Thin Films.” *Journal of Alloys dan Compounds* 512:216–22.
- Tunggadewi, D. A. dan F. Hidayanti. 2015. “Pembuatan Sel Surya Film Tipis Dengan DC Magnetron Sputtering.” *Jurnal Ilmiah GIGA* 18(1):30–34.

- Varughese, G., P. W. Jithin, dan K. T. Usha. 2015. "Determination of Optical Band Gap Energy of Wurtzite ZnO: Ce Nanocrystallites." *Physical Science International Journal* 5(2):146–54.
- Wang, F. H., Yen H. Lee, T. K. Kang, dan H. W. Liu. 2015. "Influence of RF Power on Physical Properties of ZnO : ZnF₂ Thin Films by RF Magnetron Sputtering." *Superlattices dan Microstructures* 83:289–98.
- Wang, T., Yanmei Liu, Qingqing Fang, Mingzai Wu, Xia Sun, dan Fei Lu. 2011. "Low Temperature Synthesis Wide Optical Band Gap Al dan (Al, Na) Co-Doped ZnO Thin Films." *Applied Surface Science* 257:2341–45.
- Wibowo, Agus Dani, Putut Marwoto, dan Sulhadi. 2013. "Analisis Struktur Dan Sifat Optik Film Tipis Galium Oksida Doping Seng Oksida Yang Dideposisikan Menggunakan Metode DC Magnetron Sputtering." *Unnes Physics Journal* 2:18–23.
- Wirjoadi, Yunanto, dan Bambang Siswanto. 2007. "Deposisi Lapisan Tipis (CdS) Tipe-N Di Atas Lapisan Tipis (CuInSe₂) Tipe-P Sebagai Penyangga Untuk Sel Surya CIS." *Ganesha* X(2):33–38.
- Yanlinastuti, Dian Anggraini, S. Fatimah, dan Yusuf Nampira. 2011. "Penentuan Kadar Zirkonium Dalam Paduan U-Zr Menggunakan Spektrofotometer Uv - Vis Dengan Pengompleks Arsenazo III." Pp. 567–76 in *Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir VII*. Yogyakarta.
- Yen, W. .. T., Y. C. Lin, P. C. Yao, J. H. Ke, dan Y. L. Chen. 2010. "Effect of Post-Annealing on the Optoelectronic Properties of ZnO : Ga Films Prepared by Pulsed Direct Current Magnetron Sputtering." *Thin Solid Films* 518:3882–85.
- Yu, X., Jin Ma, Feng Ji, Yuheng Wang, Chuanfu Cheng, dan Honglei Ma. 2005. "Thickness Dependence of Properties of ZnO:Ga Films Deposited by RF Magnetron Sputtering." *Applied Surface Science* 245:310–15.

- Zahedi, F., R. S. Dariani, dan S. M. Rozati. 2013. "Effect of Substrate Temperature on the Properties of ZnO Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis." *Materials Science in Semiconductor Processing* 16:245–49.
- Zannah, Rofiatul. 2016. *Pengaruh Temperatur Annealing Terhadap Struktur, Sifat Listrik Dan Sifat Optik Film Tipis Zinc Oxide Doping Alumunium (ZnO:Al) Dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang : FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Zhang, D., Ping Fan, Xingmin Cai, Jianjun Huang, Lili Ru, Zhuanghao Zheng, Guangxing Liang, dan Yukun Huang. 2009. "Properties of ZnO Thin Films Deposited by DC Reactive Magnetron Sputtering under Different Plasma Power." *Applied Physics A* 97:437–41.
- Zhong, J. B., Jian Zhang Li, Jun Zeng, Xi Yang He, Wei Hu, dan Yue Cheng Shen. 2012. "Enhanced Photocatalytic Performance of Ga³⁺ Doped ZnO." *Materials Research Bulletin* 47:3893–96.