



**PENGARUH TEMPERATUR ANNEALING
TERHADAP STRUKTUR, SIFAT LISTRIK DAN
SIFAT OPTIK FILM TIPIS ZINC OXIDE DOPING
ALUMINIUM (ZnO:Al) DENGAN METODE DC
MAGNETRON SPUTTERING**

SKRIPSI

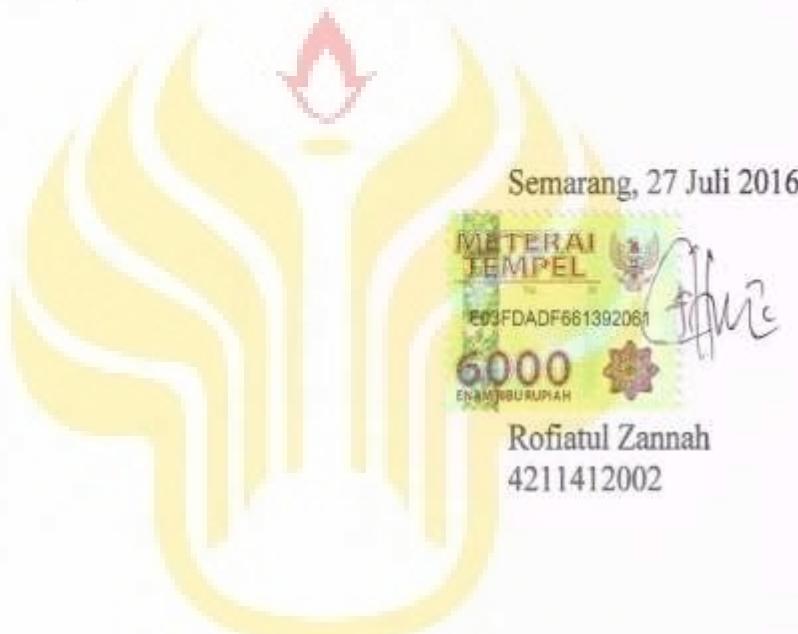
disusun sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika

UNNES
oleh
Rofiatul Zannah
4211412002
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2016**

PERNYATAAN

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



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang ujian skripsi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.



Pembimbing I

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Dr. Sugianto".

Dr. Sugianto, M.Si.

NIP 19610219 199303 1 001

Pembimbing II

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Dr. Budi Astuti".

Dr. Budi Astuti, M.Sc.

NIP. 19790216 200501 2 001

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Pengaruh Temperatur *Annealing* terhadap Struktur, Sifat Listrik dan Sifat Optik Film Tipis Zinc Oxide (ZnO) Doping Aluminium (Al) dengan metode *DC Magnetron Sputtering*

disusun oleh

Rofiatul Zannah

4211412002



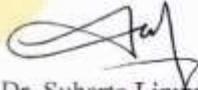
telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada tanggal

Panitia:



Prof. Dr. Zaenuri, S.E, M.Si, Akt
NIP. 19641223 198803 1 001

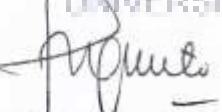
Sekretaris


Dr. Suharto Linuwih, M.Si.
NIP. 19680714 199603 1 005

Ketua Pengaji


Dr. Sulhadi, M.Si.
NIP. 19710816 199802 1 001

Anggota Pengaji/
Pembimbing I


Dr. Sugianto, M.Si.
NIP. 19610219 199303 1 001

Anggota Pengaji/
Pembimbing II


Dr. Budi Astuti, M.Sc.
NIP. 19790216 200501 2 001

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

Nasehat Al-Imam Ibnu Abbas ra:

"Ketahuilah bahwasanya pertolongan itu datang setelah kesabaran. Setelah kesusahan datanglah jalan keluar dan sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan".

. . Alāāā inna nasyrullahi qorīib

"Ingatlah, sesungguhnya pertolongan ALLAH itu sangat dekat"

Meski tak ku mengerti, semua takkan terjadi tanpa kehendakMu. Hanya ucap syukur yang ku lafalkan atas segala rencanaMu yang indah. BudakMu ni hanyalah dapat meminta, tapi Engkaulah yang sesungguhnya mengetahui segala kebutuhan.

. . Illaa man ataALLAta bi qolbin saliim

"Kecuali pertemuan dengan-NYA dengan hati yang tenang"

Tak terkecuali tujuan akhir hanyalah ALLAH semata.

Kupersembahkan skripsi ini untuk Allah SWT sebagai bentuk pengabdian dan rasa Syukur atas Keberkahan dan rahmat IlmuNYA. Mimih dan Mama (ayah) sebagai rasa hormat dari sumber cinta serta kasih sayang yang tulus. Terimakasih atas semua bimbingan, doa, dukungan dan kepercayaannya. Sepuluh serangkai Saudaraku yang selalu memotivasi dan mengarahkan untuk menjadi 'seseorang' yang lebih baik, serta Keponakan-keponakanku yang selalu memberikan kebahagian dan keceriaan. Tak lupa Nenekku yang disana (Almarhumah) yang selalu merawatku, menjagaku, mendidikku dari yang tak mengenal apa arti dari hidup, engkau adalah pembangkit jiwaku.

PRAKATA

Assalamu'alaikum Wr. Wb

الله الرَّحْمَنُ الرَّحِيمُ

اللَّهُمَّ صَلِّ عَلَى سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ ص . م . .

Syukur Alhamdulillah kepada Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Pengaruh Temperatur Annealing terhadap Struktur, Sifat Listrik dan Sifat Optik Film Tipis Zinc Oxide (ZnO) Doping Aluminium (Al) dengan metode *DC Magnetron Sputtering*”.

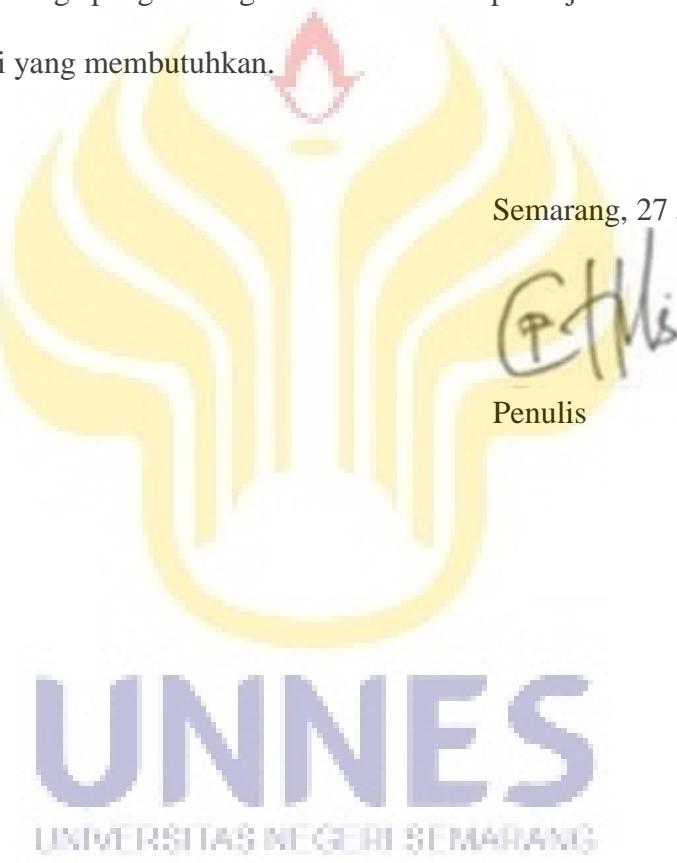
Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan tenaga, pikiran, sarana dan dana dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Rektor Universitas Negeri Semarang
2. Dekan FMIPA Universitas Negeri Semarang
3. Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang
4. Ketua Program Studi Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang
5. Dr. Sugianto, M.Si. selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan dan kritik yang sangat berharga bagi penulis selama penyusunan skripsi ini.
6. Dr. Budi Astuti, M.Sc. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, koreksi serta tambahan ilmu pengetahuan kepada penulis.

7. Drs.Ngurah Made Darma Putra, M.Si. Ph.D. Kepala Laboratorium Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang.
8. Dr. Khumaedi, M.Si. Dosen wali yang selalu memberikan bimbingan dan motivasi selama masa kuliah hingga penyusunan skripsi.
9. Dr. Ian Yulianti, S.Si. M.Eng. Dosen yang selalu memberikan motivasi dan semangat selama masa kuliah hingga penyusunan skripsi.
10. Muttaqin, S.Si., Agus Andi Wibowo, S.Si., Didik Aryanto, M.Sc dan Edy Wibowo, M.Sc. yang telah memberikan banyak bantuan penelitian kepada penulis.
11. Mamaku, Mimiku, Ne' kaji, Teh Ipiri, Teh Iyan, Teh Eni, Teh Syiam, Teh Dilla, Aa Ulul, adikku Rizki, Imron, Saeful dan keponakan-keponakanku atas cinta serta kasih sayang yang tulus. Terimakasih atas semua bimbingan, doa, dukungan dan kepercayaannya.
12. Kawan-kawanku seperjuangan Fisika Material (Saptaria, Nisa, Reza, Farida, Mudah, Nita, Dita, Santo, Sobirin, Margi, dan Fandi) dan Keluarga Fisika 2012 atas bantuan penelitian dan persahabatan yang erat.
13. Keluarga besar Tahfidzul Qur'an (ASWAJA) dan Majelis Rosulullah (Al-Batuul) selalu mendoakan, memotivasi dan dukungan.
14. Seseorang terspesial "disana" (yang belum ALLAH hadirkan) yang selalu mendoakan dan memberikan semangat. Sahabat tercinta Ni'ama Akmalia dan Wisma Nurandi Cost Neng Afidatun, Neng Emy, Neng Devita dan neng-neng yang lain, yang telah memberikan canda, tawa, duka serta dukungan dan motivasi yang tiada henti kepada penulis.

15. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih untuk selalu memberikan bantuan dan spiritual.

Penulis menyadari bahwa tulisan ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang sifatnya membangun dari semua pihak senantiasa penulis harapkan untuk bekal penulis di masa yang akan datang. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pengembangan IPTEK dan dapat dijadikan sebagai sumber informasi bagi yang membutuhkan.



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

ABSTRAK

Rofiatul Zannah. 2016. Pengaruh Temperatur *Annealing* Terhadap Struktur, Sifat Listrik dan Sifat Optik Film Tipis Zinc Oxide (ZnO) Doping Alumunium (Al) dengan Metode *DC Magnetron Sputtering*. Skripsi, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Dr. Sugianto, M.Si, dan Pembimbing Pendamping Dr. Budi Astuti, M.Sc.

Kata kunci: ZnO doping Al, *annealing*, *sputtering*, resistivitas, dan transmitansi.

Penumbuhan film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* di atas substrat *corning glass* telah berhasil dilakukan dengan metode *DC Magnetron Sputtering*. Parameter penumbuhan film diantaranya: tekanan gas argon 500 mTorr, temperatur substrat 400°C, daya plasma 35,65 watt dan waktu penumbuhan 120 menit. Sampel yang dihasilkan adalah film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* (0, 200, 300 dan 400°C). Hasil analisis *X-ray diffraction* (XRD) menunjukkan film tipis ZnO doping Al memiliki struktur *wurtzite* (heksagonal). Analisis sifat optik menggunakan *spectrometer UV-vis* menunjukkan transmitansi film tipis ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 300°C cukup besar yaitu 84,80%. *Band gap* yang dihasilkan sebesar 3,05 eV, 3,25 eV, 3,38 eV dan 3,45 eV untuk masing-masing film. Analisis sifat listrik menggunakan I-V meter menunjukkan film tipis ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 300°C memiliki nilai resistivitas yang optimum yaitu $2,89 \times 10^2$.cm. Hal ini konsisten dengan hasil analisis XRD dan UV-vis yang menyatakan bahwa film tipis ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 300°C memiliki ukuran kristal yang besar, kompak dan homogen serta memiliki nilai transmitansi yang optimum.

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN.....	ii
PERSETUJUAN PEMBIMBING	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
PRAKATA	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	7
1.5 Sistematika Penulisan	7
BAB II KAJIAN PUSTAKA	
2.1 Material Semikoduktor	8
2.1.1 <i>Transparent Conductive Oxide (TCO)</i>	10

2.1.2 ZnO.....	11
2.1.3 Alumunium Oksida	13
2.1.4 ZnO doping Al	14
2.2 Proses <i>Sputtering</i> dan sistem <i>Magnetron Sputtering</i>	15
2.2.1 Fenomena <i>Sputtering</i>	15
2.2.2 Sistem <i>DC Magnetron Sputtering</i>	16
2.3 <i>Treatment Annealing</i>	18
2.4 Struktur Film	19
2.5 Sifat Optik Lapisan Film ZnO	21
2.6 Sifat listrik Lapisan Film ZnO	25
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Alat dan Bahan.....	26
3.1.1 Alat	26
3.1.2 Bahan	27
3.2 Prosedur Penelitian	28
3.2.1 Pembuatan Target ZnO doping Al	28
3.2.2 Preparasi Substrat	29
3.2.3 Penumbuhan Film Tipis ZnO doping Al	29
3.2.4 Karakterisasi Film Tipis ZnO doping Al	31
3.3 Karakterisasi Struktur	32
3.3.1 <i>X-ray Diffraction (XRD)</i>	32
3.4 Karakterisasi Sifat Optik	35
3.4.1 Spektrometer UV-vis	35

3.5 Karakterisasi Sifat Listrik	36
3.5.1 I-V Meter	36

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Struktur Film Tipis	39
4.2 Sifat Optik Film Tipis ZnO doping Al.....	48
4.3 Sifat Listrik Film Tipis ZnO doping Al	53
4.4 Hubungan antara Struktur, Sifat Optik dan Sifat Listrik Film Tipis ZnO doping Al	57

BAB V PENUTUP

5.1 Simpulan	59
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	70



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat fisis material TCO	12
Tabel 3.1 Parameter penumbuhan film tipis ZnO doping Al	31
Tabel 4.1 Hasil analisis XRD film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur <i>annealing</i> pada puncak (002)	43
Tabel 4.2 Nilai <i>lattice strain</i> dan <i>stress</i> film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur <i>annealing</i>	46
Tabel 4.3 Hasil analisis XRD film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur <i>annealing</i> pada puncak (101)	47
Tabel 4.4 <i>Band gap</i> film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur <i>annealing</i>	52
Tabel 4.5 Hasil karakterisasi sifat listrik film tipis ZnO doping Al dengan variasi <i>temperatur annealing</i> menggunakan Metode <i>Two-probe</i>	55



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) Struktur kristal silikon dengan sebuah atom pengotor pentavalen menggantikan posisi salah satu atom silikon dan (b) Struktur pita energi semikonduktor tipe-n	9
Gambar 2.2 (a) Struktur kristal silikon dengan sebuah atom pengotor trivalen menggantikan posisi salah satu atom silikon dan (b) struktur pita energi semikonduktor tipe-p	9
Gambar 2.3 Struktur kristal ZnO	12
Gambar 2.4 Proses <i>sputtering</i> pada permukaan target.....	16
Gambar 2.5 Skema reaksi dalam <i>DC Magnetron Sputtering</i>	18
Gambar 2.6 Pola XRD struktur kristal film ZnO dan ZAO	21
Gambar 2.7 Penentuan celah pita energi TiO ₂ dengan metode <i>touc plot</i>	23
Gambar 2.8 Transmitansi film ZnO:Al dengan variasi power <i>sputtering</i>	24
Gambar 3.1 Sistem Reaktor <i>DC Magnetron Sputtering</i>	28
Gambar 3.2 Diagram alur penelitian	32
Gambar 3.3 Hamburan sinar-X pada kristal	33
Gambar 3.4 (a) Elektron tidak sanggup meloncat dari pita valensi ke pita konduksi. (b) Elektron dapat meloncat dari pita valensi ke pita konduksi	36
Gambar 3.5 Pengukuran resistansi film tipis dengan metode <i>two-probe</i>	37
Gambar 4.1 Spektrum XRD untuk film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur <i>annealing</i> (0, 200, 300 dan 400 °C)	40

Gambar 4.2 Nilai FWHM dan ukuran kristal film tipis ZnO doping Al pada sudut <i>diffraction</i> (002) dengan variasi temperatur <i>annealing</i>	44
Gambar 4.3 Nilai FWHM dan ukuran kristal film tipis ZnO doping Al pada sudut <i>diffraction</i> (101) dengan variasi temperatur <i>annealing</i>	48
Gambar 4.4 Grafik transmitansi film ZnO doping Al dengan variasi temperatur <i>annealing</i>	49
Gambar 4.5 Hubungan antara $(h)^2$ dengan foton energi (eV) film tipis ZnO doping Al temperatur <i>annealing</i> 0°C	51
Gambar 4.6 Resistivitas Film tipis ZnO doping Al variasi temperatur <i>annealing</i>	54

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data standar JCPDS ZnO	70
Lampiran 2. Data standar JCPDS ZnO doping Al	71
Lampiran 3. Perhitungan konsentrasi Al pada target ZnO.....	72
Lampiran 4. Perhitungan FWHM orientasi bidang (002)	73
Lampiran 5. Perhitungan nilai <i>d-space</i>	76
Lampiran 6. Nilai kisi-c	78



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang terus berkembang membawa beberapa pendekatan baru pada penelitian dan pengembangan material oksida konduktif transparan atau *Transparent Conducting Oxide* (TCO). TCO digunakan untuk keperluan teknologi yang lebih efisien dan ekonomis, dengan tampilan yang sama atau bahkan lebih baik. Diantara penggunaan TCO yaitu sebagai lapisan luar pada sel surya. Material TCO memiliki karakteristik resistivitas listrik yang rendah dan transparansi yang tinggi pada panjang gelombang visibel. Aplikasi TCO telah berkembang sangat cepat. Aplikasi ini telah digunakan untuk pembuatan piranti optoelektronik seperti: TV LCD, TV Plasma, *organic electroluminescence* (EL) seperti *touch screen* monitor pada *authomatic tellermachine* (ATM), *ticket vending machines* yang dipasang di stasiun kereta api, *electrochronic windows* (jendela yang bisa diatur menjadi transparan gelap) dan lapisan pertama pada sel surya (Sinaga, 2009).

Material TCO yang sudah banyak digunakan adalah *Indium Tin Oxide* (ITO). ITO mempunyai nilai transparansi 80% dan resistivitas $2,36 \times 10^{-4}$ (ohm.cm) (Patel *et al.*, 2010). ITO juga memiliki karakterisasi yang baik dari segi transmitansi optik, energi *band gap* yang lebar, serta konduktivitas listrik yang tinggi (Sim *et al.*, 2010). Seiring dengan permintaan konsumen terhadap *TV flat* (LCD) dan juga panel surya menyebabkan kebutuhan ITO bertambah, padahal unsur Indium (In)

merupakan unsur tanah sangat sedikit ketersediaannya di bumi. Harga Indium yang mahal menjadi permasalahan dalam pengembangan TCO yang murah. Kondisi ini menuntut perlu adanya penelitian untuk menemukan material TCO yang dapat menggantikan peran dari ITO. Untuk mengatasi hal tersebut, para ilmuwan telah banyak melakukan penelitian untuk mencari material-material TCO seperti *Mangan-doped Zinc Oxide* (Han *et al.*, 2000), *Aluminium-doped Zinc Oxide* (AZO), *Galium-doped Zinc Oxide* (GZO) (Jang *et al.*, 2008), dan *Timah-doped Zinc Oxide* (Tsay *et al.*, 2008).

Material ZnO dipilih sebagai material baru yang diteliti untuk bahan alternatif pengganti ITO karena ZnO merupakan material yang tidak beracun dan sangat berlimpah di bumi (Sali *et al.*, 2008). ZnO memiliki stabilitas yang tinggi dalam plasma hidrogen dan siklus panas serta tahan terhadap radiasi (Shinde *et al.*, 2007). Material *zinc oxide* (ZnO) merupakan oksida konduktif transparan yang banyak diteliti sebagai alternatif pengganti ITO.

ZnO merupakan material semikonduktor tipe-n yang mempunyai struktur kristal *wurtzite*. Film tipis ZnO biasanya menunjukkan resistivitas yang rendah disebabkan kekosongan (vakansi) oksigen dan penyisipan (*interstitial*) Zn karena komposisi yang *nonstoichiometric* (Wirjoadi *et al.*, 2008). ZnO mempunyai *band gap* 3,21 eV pada temperatur ruang (Ye *et al.*, 2003) dan transmitansi yang tinggi ~90% pada panjang gelombang visibel (Kim *et al.*, 2007). Kelebihan ZnO yang lain adalah dapat ditumbuhkan pada temperatur substrat yang relatif rendah sekitar 200-400°C (Yanti, 2013). Hal ini menjadi sifat menarik yang dimiliki oleh ZnO karena pembentukan kristal dapat terjadi pada temperatur di bawah 400°C.

Film tipis Zinc Oxide tanpa doping memiliki karakteristik sifat listrik yang kurang baik, memiliki resistivitas sebesar $0.78 \text{ } \cdot\text{cm}$ (Sim *et al.*, 2010). Nilai konduktivitas film tipis ZnO tanpa doping yaitu sekitar $6,24 \times 10^{-7} (\text{m})^{-1}$ (Suprayogi, 2014). Dan nilai transmitansi film tipis ZnO tanpa doping 70-80% (Sinaga *et al.*, 2009).

Kelemahan ZnO adalah memiliki sifat listrik, sifat optik serta struktur unit yang kurang bagus sehingga diperbaiki dengan cara diberi doping (Kim *et al.*, 2010). Untuk menaikkan konduktivitas listriknya, ZnO seringkali didoping dengan dopan ekstrinsik. Unsur golongan III A khususnya aluminium (Al) banyak digunakan sebagai dopan dan dapat menaikkan konduktivitas listrik film tipis ZnO hingga berorde $10^5 \text{ } \cdot\text{cm}$ (Amara & Mohamed, 2014).

Logam Al merupakan unsur yang paling baik digunakan sebagai doping dibanding baik dibanding Boron (B), Galium (Ga), Indium (In) (Kuo *et al.*, 2006) didasarkan pada mobilitas elektron yang paling tinggi, dan memberikan pembawa muatan level yang tinggi. ZnO doping Al sangat berpotensial untuk diaplikasikan sebagai TCO. Selain karena konduktivitas dan transparansinya tinggi. Al berkontribusi terhadap lebar *band gap* ZnO dikarenakan bertambahnya konsentrasi pembawa muatan, ini telah dikenal sebagai efek Burstein–Moss (Suchea *et al.*, 2007).

Doping Al digunakan untuk mengurangi resistansi kisi. Nilai resistivitas unsur Al yaitu orde $10^{-10} \text{ } \cdot\text{cm}$ dan nilai transmitansinya 80 - 90% (Lin *et al.*, 2003). Hal ini penting karena resistansi TCO harus kecil untuk meminimalkan kehilangan ohmik pada TCO ketika terjadi aliran *photocurrent*. Ketebalan film juga dikontrol

tetap rendah sebagai syarat agar resistansinya tetap kecil dan konduktivitasnya tinggi. Resistivitas ditentukan oleh mobilitas dan konsentrasi pembawa muatan yang dipengaruhi oleh perubahan ukuran butir (Yanti, 2013). Ukuran butir yang besar menyebabkan densitas berkurang dan mobilitas menjadi lebih tinggi. Densitas berpengaruh terhadap stabilitas film seperti tampilan film tipis. Kekasarahan permukaan film menyebabkan cahaya yang ditransmitansikan lebih banyak daripada cahaya yang dipantulkan.

Firmaningsih (2015) melaporkan bahwa penumbuhan film tipis ZnO dengan konsentrasi dopan Aluminium yang optimum 3% pada temperatur 400°C dapat menurunkan nilai resistivitas. Selain pendopingan, sifat listrik dan sifat optik film juga ditentukan oleh teknik pembuatan dan parameter yang lain seperti perlakuan *annealing*. Perlakuan *annealing* biasanya dilakukan setelah penumbuhan film. Sinaga *et al.*,(2009) dan Ming *et al.*, (2015) melaporkan bahwa penumbuhan film ZnO:Al dengan perlakuan *annealing* dapat mempengaruhi nilai transmitansi dari 70-90%.

Pendeposition film tipis dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti *Metal Oxide Vapar Deposition* (MOCVD) (Park *et al.*, 2009), *sol-gel dip-coating* (Zhou *et al.*, 2007), *RF magnetron sputtering* (Kang *et al.*, 2007), *buffer assisted pulsed laser deposition* (Ajimsha *et al*, 2010) dan ada juga dibuat dengan teknik *Screen Printing* (Sinaga, 2009). Metode penumbuhan film tipis ZnO yang baik adalah metode *sputtering* (Chaabouni *et al.*, 2004). Hal tersebut didasarkan pada kelebihan metode *sputtering* seperti dapat menghasilkan film tipis dari bahan yang mempunyai titik leleh tinggi, penghematan bahan yang akan didepositikan,

ketebalan lapisan dapat dikontrol dengan akurat dan temperatur substrat yang rendah. Metode *sputtering* mempunyai beberapa tipe berdasarkan dari sumber penghasilan daya plasmanya yaitu Radio *Frekuency* (RF) *Sputtering* dan *Direct Current* (DC) *Magnetron Sputtering*.

Berdasarkan paparan tersebut pada penelitian ini dilakukan penumbuhan film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* terhadap struktur, sifat optik dan sifat listrik dengan metode *DC Magnetron Sputtering*.

1.2. Perumusan masalah

Penelitian tentang film tipis ZnO doping Al sebagai material dan piranti semikonduktor telah banyak dilakukan oleh para peneliti. Pada penelitian ini telah dilakukan studi pembuatan film ZnO doping Al dengan metode *DC Magnetron Sputtering* pada temperatur *annealing*. Temperatur *annealing* dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan kualitas kristal yang dihasilkan.

Banyak peneliti yang telah menggunakan *treatment annealing* pada penumbuhan film tipis ZnO doping Al, seperti: Byeong-Yun *et al.*, (2005) dan Hyung Jun Cho *et al.*, (2010) yang melaporkan bahwa dengan menggunakan perlakuan *annealing* pada film ZnO:Al dengan metode RF *Sputtering* memiliki resistivitas menurun masing-masing $8,30 \times 10^{-4}$ Ohm.cm dan 2.24×10^{-3} Ohm.cm dengan transmitansi 93.5%. Pada 2 tahun berikutnya Min Chul Jun, *et al.*, (2012) juga melaporkan bahwa berdasarkan analisis *X-ray difraksi* semua film memiliki struktur kristal heksagonal dan nilai transmitansi meningkat menjadi 80% dengan *treatment annealing*. Hasil penelitian yang diperoleh Hamali *et al.*, (2016) pada film ZnO:Al yang ditumbuhkan dengan metode yang sama menggunakan substrat

silika memiliki nilai resistivitas 1×10^{-3} .cm dan transmitansi 85%. Selain pengaruh temperatur *annealing*, dengan variasi Gas *Ambients on Ohmic* dan daya plasma dapat menunjukkan struktur kristal yang baik dan sifat optik yang optimum (Chung *et al.*, Jiang *et al.*, dan Wang *et al.*, 2013). Selain menggunakan metode *sputtering*, Rogachev *et al.*, (2016) melaporkan bahwa dengan metode sol gel, film ZnO yang ditumbuhkan pada variasi temperatur *annealing* 20°C sampai 350°C selama 10 menit dapat meningkatkan nilai mobilitas dari 4,88 sampai 7,86 cm²/V dan menjadikan film ZnO berfungsi sebagai solar sel (Rogachev *et al.*, 2016).

Berdasarkan paparan hasil penelitian sebelumnya bahwa pengkajian pengaruh temperatur *annealing* masih fokus pada sifat listrik dan sifat optik film tipis yang dihasilkan. Struktur dari film tipis juga merupakan hal penting yang perlu dikaji untuk mendapatkan informasi yang lengkap sehingga dapat digunakan untuk aplikasi sel surya. Menurut Seung *et al.*, (2007) bahwa ukuran kristal memiliki pengaruh langsung terhadap konduksi listrik. Dengan demikian pada penelitian ini dikaji bagaimana pengaruh temperatur *annealing* terhadap struktur, sifat listrik dan sifat optik film tipis Zinc Oxide (ZnO) doping Aluminium (Al) dengan metode *DC Magnetron Sputtering*.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menumbuhkan film tipis ZnO doping Al dengan menggunakan metode *DC Magnetron Sputtering* dan variasi temperatur *annealing*. Sifat – sifat film tipis yang dikaji adalah struktur, sifat listrik dan sifat optik.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah untuk mengkaji mengenai pengaruh temperatur *annealing* terhadap struktur film tipis ZnO doping Al sehingga dapat diperoleh sifat listrik dan sifat optik yang optimal untuk aplikasi *windows* sel surya.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri atas lima bab, diawali dengan halaman judul, halaman pengesahan, halaman motto, halaman persembahan, kata pengantar, abstrak, daftar isi, daftar gambar dan daftar tabel. Bab I, berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan skripsi. Bab II, berisi kajian pustaka yang merupakan landasan teori dalam penelitian. Berupa penjelasan mengenai material semikonduktor, *transparent conducting oxide* (TCO), material *zinc oxide* (ZnO), aluminium (Al), *sputtering*, sifat optik material, sifat listrik material dan proses *annealing*. Bab III, berisi metode penelitian yang meliputi, pembuatan target ZnO doping Al, preparasi substrat, penumbuhan film tipis ZnO doping Al, dan *treatment annealing*, kemudian karakterisasi film serta metode analisis data. Bab IV, memaparkan hasil penelitian, análisis data dan pembahasan hasil penelitian. Analisis dan pembahasan tersebut meliputi struktur film, sifat optik dan sifat listrik film tipis ZnO doping Al. Bab V, berisi simpulan hasil penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya. Bagian akhir skripsi berisi daftar pustaka dan lampiran hasil penelitian.

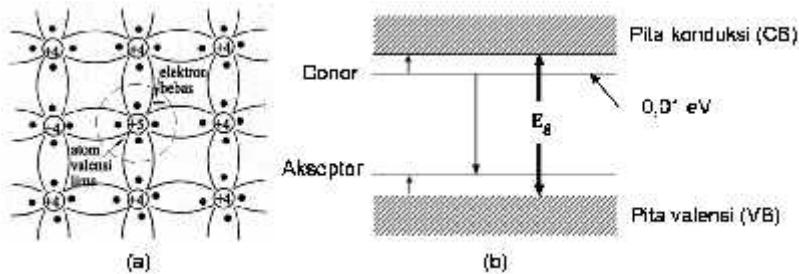
BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1. Material Semikonduktor

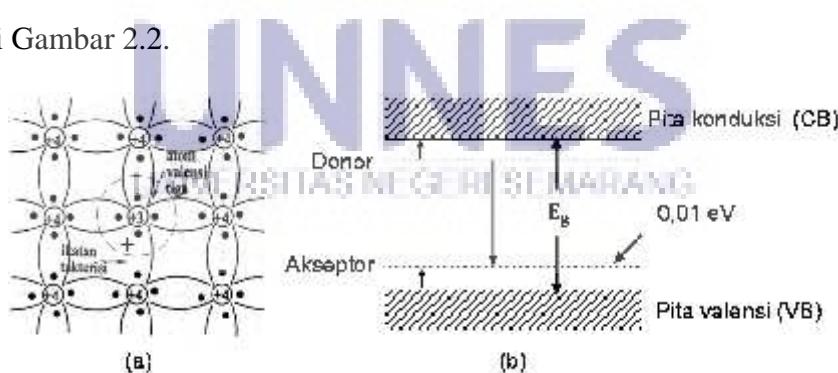
Berdasarkan konduktivitas bahan, material dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam yaitu, (1) konduktor, dengan resistivitas $<10^{-4}$ m, (2) semikonduktor, dengan resistivitas antara 10^{-4} - 10^{12} m, (3) insulator, dengan resistivitas $>10^{12}$ m. Material semikonduktor merupakan material yang paling banyak dimanfaatkan bagi pengembangan teknologi modern seperti perlengkapan elektronik, optoelektronik, dan sensor.

Berdasarkan mayoritas pembawa muatannya, material semikonduktor dapat digolongkan menjadi dua tipe yaitu tipe-n dan tipe-p. Material semikonduktor tipe-n dapat dibuat dengan menambahkan sejumlah kecil atom pengotor pentavalen (antimony, phosphorus atau arsenik) pada semikonduktor murni, misalnya silikon murni. Atom-atom pengotor (dopan) ini mempunyai lima elektron valensi sehingga secara efektif memiliki muatan sebesar $+5q$. Saat sebuah atom pentavalen menempati posisi atom silikon dalam kisi kristal, hanya empat elektron valensi yang dapat membentuk ikatan kovalen lengkap, dan tersisa satu elektron yang tidak berpasangan. Sisa elektron ini akan menjadi elektron bebas dan menjadi pembawa muatan dalam proses hantaran listrik sehingga material ini disebut material semikonduktor tipe-n. Secara skematis semikonduktor tipe-n dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. (a) Struktur kristal silikon dengan sebuah atom pengotor pentavelan menggantikan posisi salah satu silikon dan (b) Struktur pita energi semikonduktor tipe-n

Material semikonduktor tipe-p dapat dibuat dengan menambahkan sejumlah kecil atom pengotor trivalen (Aluminium, Boron, Gallium atau Indium) pada semikonduktor murni, misalnya silikon murni. Atom-atom pengotor (dopan) ini mempunyai tiga elektron valensi sehingga secara efektif hanya dapat membentuk tiga ikatan kovalen. Saat sebuah atom trivalen menempati posisi atom silikon dalam kisi kristal, terbentuk tiga ikatan kovalen lengkap, dan tersisa sebuah muatan positif dari atom silikon yang tidak berpasangan yang disebut *hole*, karena pembawa mayoritas material ini adalah *hole* maka material ini disebut material semikonduktor tipe-p. Secara skematis semikonduktor tipe-n dapat digambarkan seperti Gambar 2.2.



Gambar 2.2. (a) Struktur kristal silikon dengan sebuah atom pengotor trivalen menggantikan posisi salah satu atom silikon dan (b) struktur pita energi semikonduktor tipe-p

2.1.1. *Transparent Conducting Oxide (TCO)*

TCO merupakan semikonduktor dengan *band gap* yang lebar dan karakteristik spektrum yang selektif, sehingga dapat digunakan sebagai lapisan luar (*window layer*) sel surya (Minami *et al.*, 2003). Lebar *band gap* TCO berada pada kisaran 3,3 eV, sehingga hanya foton yang berenergi setara atau lebih besar dari 3,3 eV yang mampu mengeksitasi elektron, sedangkan foton dengan energi lebih kecil dari *band gap* tidak akan mampu mengeksitasi elektron sehingga foton ini hanya akan ditransmitansikan atau diteruskan. Foton yang diteruskan inilah yang berada pada kisaran spektrum cahaya tampak karena cahaya ini energinya lebih kecil dari 3,3 eV.

TCO bersifat konduktif disebabkan oleh karakteristik ikatan kimianya dengan jenis ikatan berupa ikatan ionik (ikatan antara logam dengan oksigen) yang memungkinkan atom terlepas dengan sendirinya dari posisi normalnya ke posisi lain yang akhirnya menyebabkan elektron terlepas pula di dalam struktur oksida tersebut. Jumlah elektron di dalam material TCO dipengaruhi oleh banyaknya atom yang terlepas dari posisi normalnya, semakin banyak atom yang terlepas dari posisi normalnya maka semakin banyak pula jumlah elektron di dalam material TCO. Elektron akan menghantarkan arus listrik apabila arus listrik dialirkkan ke material tersebut, sehingga material ini bersifat konduktif.

TCO ini digunakan di berbagai peralatan optik karena sifatnya yang memiliki konduktivitas dan transparansi yang tinggi. TCO diaplikasikan pada aspek komputasi *liquid crystal displays* (LCD), aspek alternatif energi yaitu *solar cell*, dan aspek teknologi yang berupa sensor gas yang dapat mendekripsi berbagai

macam gas, contohnya yaitu: sensor Gas Dimetil Amin (DMA) yang terlarut pada gas Hidrogen, uap Etanol, dan gas-gas beracun hasil pembakaran dari transportasi darat.

Ada beberapa jenis lapisan tipis konduktif transparan antara lain yaitu SnO₂, ITO, dan TCO. SnO₂ harganya sangat murah dan mempunyai nilai resistivitas jauh lebih tinggi dibanding *Indium Tin Oxide* (ITO). ITO merupakan campuran dari SnO₂ dan In₂O₃ dengan perbandingan Sn:In sekitar 5:95. Keunggulan ITO adalah resistivitas rendah, namun proses pembuatan Indium (In) sangat mahal. Oleh karena itu, saat ini dikembangkan lapisan tipis lain untuk lapisan konduktif transparan (Siswanto, 2008).

2.1.2. Zinc Oxide (ZnO)

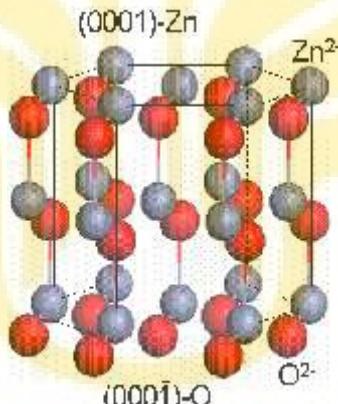
Zinc Oxide (ZnO) sebagai material semikonduktor telah diaplikasikan pada bidang teknologi, salah satu aplikasi yang dibutuhkan saat ini adalah *Transparent Conducting Oxide* (TCO). Aplikasi ZnO sangat luas meliputi LED (*Light-Emitting Devices*) (Huang *et al.*, 2001, Ozguer *et al.*, 2005), Gas Sensor (Pearson *et al.*, 2005), *piezoelectric transducers* (Ko *et al.*, 2003) dan *ultrasonic oscillators* (Devoe *et al.*, 2001).

Zinc Oxide (ZnO) merupakan material semikonduktor tipe-n dengan struktur *wurtzite* karena *nonstoichiometric* (Bao Ma *et al.*, 2007) dan bersifat transparan serta konduktif (Goldsmith *et al.*, 2006). Konduktivitas listrik dalam ZnO dapat ditimbulkan karena *nonstoichiometric* yang disebabkan oleh kelebihan ion-ion zinc (Zn²⁺). Kelebihan kation ini diimbangi oleh muatan negatif dengan jumlah yang sama, yaitu 2 elektron. Elektron-elektron ini bebas bergerak di dalam

kristal di bawah pengaruh medan listrik luar. ZnO memiliki energi gap yang besar ~3,37 eV pada temperatur rendah dan 3,30 eV pada temperatur ruang (Liewhiran *et al.*, 2007).

ZnO merupakan material yang potensial untuk dipertimbangkan sebagai pengganti ITO SnO₂ (Kuo *et al.*, 2010) sebagai aplikasi *Transparent Conducting Oxide* (TCO) karena *band gap* yang lebar, konduktivitas tinggi, mudah didoping, dan suhu stabil ketika didoping dengan golongan III (Singh *et al.*, 2001).

Struktur kristal ZnO ditunjukkan pada Gambar 2.3 dan sifat fisis ZnO dengan tipe kristal *wurtzite* ditunjukkan pada Tabel 2.1.



Gambar 2.3. Struktur kristal ZnO

Tabel 2.1. Sifat fisis material TCO

Sifat fisis	ZnO
Nama material	Zincite
Band gap (eV)	3,4
Melting point (°C)	1975
Densitas (g cm ⁻³)	5,67
Permitivitas relatif	8,1
Dopan	B, Al, In, Ga, Si, Sn, F, Cl
Struktur Kristal	Heksagonal, <i>wurtzite</i>
Parameter kekisi (nm)	a : 0,325 b : 0,207

Film tipis ZnO mempunyai struktur heksagonal dengan tipe kristal *wurtzite*, parameter kisi pada sumbu $a = 3,2495 \text{ \AA}$ dan sumbu $c = 5,2069 \text{ \AA}$. Sifat-sifat yang menarik dari material ZnO lainnya adalah anisotropi dalam struktur kristal, struktur cacat *non-stoichiometric*, transparansi optik dalam daerah cahaya tampak dan indeks biasnya cukup tinggi. Berdasarkan sifat-sifat tersebut, film tipis ZnO dapat dimanfaatkan sebagai *window layer* dan elektroda depan yang sangat konduktif dan transparan pada sel surya.

2.1.3. Aluminium Oksida (Al_2O_3)

Aluminium merupakan unsur kimia golongan IIIA dalam sistem periodik, dengan nomor atom 13 dan massa atom 26,98 u. Struktur Kristal aluminium adalah *Face Center Cubic* (FCC). Aluminium adalah unsur terbanyak ketiga yang ditemukan di bumi setelah oksigen dan silikon. Jumlahnya sekitar 7,6% dari berat kerak bumi dan memiliki sifat tidak beracun.

Aluminium oksida (Al_2O_3) mempunyai konduktivitas dua kali lebih baik dari tembaga hal ini dikarenakan adanya delokalisasi elektron yang bebas bergerak atau berpindah sepanjang padatan. Selain itu aluminium merupakan logam yang bersifat memantulkan cahaya datang dan reflektansinya cukup tinggi di daerah cahaya tampak (*visible*). Dengan keunggulan sifat listrik yang bagus, aluminium dijadikan sebagai dopan.

Material Al_2O_3 memiliki karakteristik sifat fisis yang menarik, sehingga dilanjutkan menjadi objek penelitian. Dan Al_2O_3 merupakan bahan menjanjikan karena mempunyai keuntungan, yaitu ion Al^{3+} mempunyai jejari yang lebih kecil daripada ion Zn^{2+} sehingga dapat menyisip ke dalam kristal ZnO (Kuo *et al.*, 2010).

Aluminium melindungi material dibawahnya dari proses oksidasi sehingga tidak menurunkan nilai material yang dilapisi. Aluminium oksida (Al_2O_3) juga merupakan material yang memiliki *band gap* lebar, serta memiliki sifat optik dan listrik yang baik (Kim *et al.*, 2007). Nilai *Band gap* film tipis Al_2O_3 sekitar 4,7 eV (Yazdanmehr *et al.*, 2012).

2.1.4. ZnO Doping Al

Doping pada film tipis ZnO mempengaruhi ukuran butir dan morfologi permukaan film yang terbentuk. Doping aluminium memberikan peranan penting dalam menentukan struktur kristal dan intensitas puncak difraksi. Doping akan lebih berpengaruh pada temperatur yang tinggi. Film tipis ZnO yang di doping dengan Al mempunyai nilai konduktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan film tipis ZnO tanpa doping.

Pada umumnya penumbuhan ZnO dengan doping Al yang rendah sulit terjadi karena dalam pembuatan *pellet* sukar untuk homogen, sehingga distribusi Al tidak merata pada *pellet*. Doping yang rendah menyebabkan keberadaan Al sulit untuk terdeteksi, sedangkan doping Al signifikan menghambat pertumbuhan butir (Han *et al.*, 2001). Kontribusi dari ion Al^{3+} sebagai donor yang disubstitusikan terhadap Zn^{2+} dapat dijadikan alasan film ZnO doping Al ditumbuhkan di bawah tekanan yang tinggi yang dapat mengurangi konsentrasi pembawa yang menyebabkan konduktivitas listrik lebih rendah. Film ZnO doping Al memiliki perbedaan yang sangat besar dalam sifat kimia. *Chemisorptions* atom oksigen di permukaan film tipis ZnO doping Al menyerap elektron dari pita konduksi, sehingga konsentrasi pembawa muatan berkurang yang menyebabkan

bertambahnya resistivitas ZnO doping Al. Kelebihan ZnO doping Al banyak diteliti sebagai aplikasi TCO, disebabkan oleh ZnO doping Al melimpah di alam sehingga mudah didapat, dan harganya murah. Unsur Al juga bersifat tidak beracun (*nontoxic*), anisotropi dalam struktur kristalnya, dan memiliki struktur cacat *nonstoichiometric*. Kelebihan lain dari ZnO doping Al adalah stabilitas yang bagus (Sim *et al.*, 2010), temperatur deposisi yang rendah (Ajimsha *et al.*, 2010), transmitansi yang tinggi di daerah cahaya tampak (*visible*), dan resistivitas yang rendah (Chen *et al.*, 2000), serta konduktivitas listrik yang tinggi (Chen *et al.*, 2009), sehingga ZnO doping Al menunjukkan sifat listrik dan sifat optik yang baik.

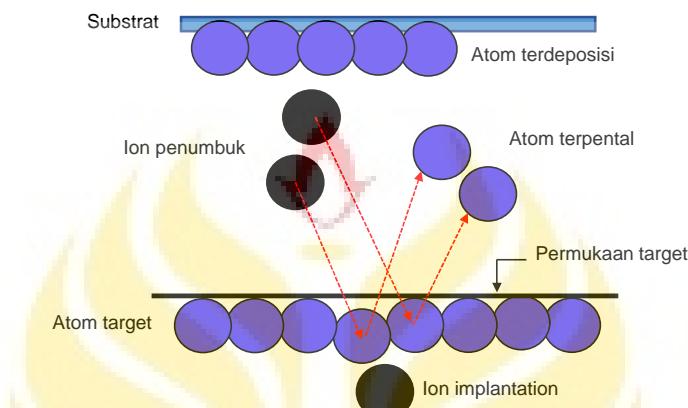
Film tipis ZnO yang didoping dengan Al₂O₃ dengan metode *RF magnetron sputtering* mempunyai sifat listrik yang lebih baik dibandingkan film tipis ZnO tanpa doping, yaitu konduktivitas listriknya menjadi $\sim 10^3$.cm (Kuo *et al.*, 2010). Ini menunjukkan bahwa film tipis ZnO doping Al dapat dikembangkan sebagai bahan TCO yang sangat konduktif dan transparan.

2.2. Proses *Sputtering* dan Sistem *DC Magnetron Sputtering*

2.2.1. Fenomena *Sputtering*

Proses *sputtering* diawali dengan proses ionisasi gas-gas *sputter* seperti Ar (Argon), Xe (Xenon), Kr (Kripton), Ne (Neon) maupun He (Helium). *Sputtering* merupakan proses penembakan partikel-partikel (atom-atom atau ion-ion) berenergi tinggi pada sebuah target sehingga atom-atom individu memperoleh energi yang cukup tinggi untuk melepaskan diri dari permukaan target. Atom-atom yang tersputter terhambur ke segala arah, kemudian difokuskan pada substrat untuk membentuk film tipis (Sudjatmoko, 2009). *Sputtering* terjadi ketika dihasilkan

lucutan listrik dan gas Argon secara listrik menjadi konduktif karena mengalami ionisasi yang menghasilkan ion-ion bermuatan positif dan negatif yang mempunyai jumlah seimbang, dikenal sebagai plasma (Purwaningsih, 2003). Proses *sputtering* secara lengkap di tunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Proses *sputtering* pada permukaan target

Teknik *sputtering* memiliki beberapa kelebihan, antara lain : film yang terbentuk mempunyai komposisi yang serupa dengan bahan target, kualitas, struktur dan keseragaman hasil film dikendalikan oleh tingkat homogenitas target, mempunyai rapat arus yang besar sehingga memungkinkan terjadinya laju deposisi yang tinggi, dan lapisan yang terbentuk mempunyai kekuatan rekat yang tinggi terhadap permukaan substrat (Sudjatmoko, 2009).

2.2.2. Sistem DC Magnetron Sputtering

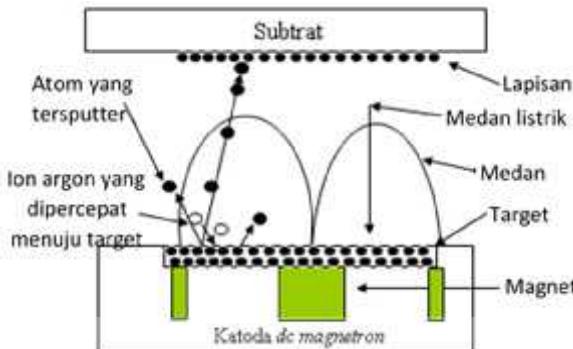
Teknik penumbuhan film tipis paling sederhana adalah dengan metode *DC Magnetron Sputtering*. Sistem *DC Magnetron Sputtering* terdiri dari sepasang elektroda planar. Salah satu dari elektroda tersebut adalah katoda dingin dan lainnya adalah anoda. Pada bagian katoda dipasang sebuah bahan target dan pada bagian

belakangnya didinginkan dengan air pendingin, sedangkan substrat dipasang di anoda.

Apabila tabung *sputter* diisi dengan gas Ar (Argon) dan pada elektroda dipasang beda potensial, maka antara elektroda terjadi lucutan pijar (*glow discharge*). Gas Argon mempunyai massa yang lebih berat dan mudah terionisasi dari pada gas-gas yang lain seperti Neon dan Helium, maka yang dipakai yaitu gas Ar (Argon). Gas Argon yang melalui ruang antara elektroda dipecah menjadi plasma yang mengandung elektron (e^-), ion Ar, sehingga atom-atom permukaan target yang tertumbuk keluar akan menempel pada permukaan substrat sehingga terbentuk film tipis.

DC Magnetron Sputtering ini menggunakan sistem magnet yang diletakkan dibawah katoda. Magnet membentuk lingkungan medan magnet untuk membelokkan partikel bermuatan. Elektron-elektron dikurung dalam lingkungan medan magnet dekat target dan mengakibatkan ionisasi pada gas argon lagi. Jumlah ion-ion yang ditarik ke permukaan target menjadi lebih banyak. Semakin banyak ion-ion yang menumbuk target, hasil sputtering semakin meningkat.

Sistem *DC Magnetron Sputtering* merupakan modifikasi dari sistem *DC Sputtering* dengan menambahkan sistem magnet, sehingga sistem *DC Magnetron Sputtering* terdiri dari tabung plasma berbentuk silinder, sumber tegangan tinggi, sepasang elektroda, sistem pemanas substrat, sistem pendingin target dan magnet, sistem vakum, sistem masukan gas *sputter* dan sistem magnet. Skematik *DC Magnetron Sputtering* secara jelas di tunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Skema reaksi dalam *DC Magnetron Sputtering* (Joshi, 2003)

2.3. Treatment Annealing

Proses *annealing* yaitu proses pemanasan material sampai temperatur tertentu. Kemudian proses tersebut ditahan beberapa waktu kemudian pendinginannya dilakukan perlahan-lahan di dalam tungku. Keuntungan yang didapat dari proses ini diantaranya; menurunkan kekerasan, memperbaiki sifat mekanik, menurunkan atau menghilangkan ketidak homogenan struktur, dan memperhalus ukuran butir.

Berdasarkan kamus besar Fisika, kata *anil* merupakan jenis laku panas pada logam untuk melunakkan dan menghilangkan tegangan dalam ketidakstabilan, sehingga lebih mudah dikerjakan atau dibentuk. Pada proses ini, logam mula-mula dipanaskan hingga suatu temperatur tertentu selama beberapa saat (baik temperatur mupun waktu ini bergantung pada jenis logam tersebut), dan kemudian mendinginkannya secara perlahan-lahan. Proses ini digunakan baik pada logam bersifat besi maupun bukan besi, dan proses yang serupa dapat pula diterapkan pada bahan lain, seperti gelas.

Pada penelitian Legros Anne *et al.*, (1995) dengan meningkatnya temperatur *annealing* juga akan mempengaruhi ukuran butiran kristal menjadi lebih besar,

sehingga terbentuk ukuran butiran yang homogen yang dapat mencapai permukaan sehingga bersentuhan satu sama lain pada permukaan dan meninggalkan daerah *amorf*.

Pada proses *annealing* dalam keadaan vakum dilaporkan sangat efektif untuk meningkatkan ukuran butir, konsentrasi pembawa dan mobilitas film tipis AZO (Guillen *et al.*, 2010). Menggunakan *treatment vacuum annealing*, nilai *band gap* yang dihasilkan saat deposisi film tipis AZO menjadi lebih lebar dan dapat memperbaiki kristalisasinya, peningkatan temperatur *annealing* juga dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik, pembawa konsentrasi, dan nilai absorbsi berubah kearah panjang gelombang yang lebih pendek (Fang *et al.*, 2003).

2.4. Struktur Film

Struktur mikro dari suatu lapisan film tipis dapat ditunjukkan dengan besar butiran-butiran kristal (*grain size*) yang terbentuk dan tebal tipisnya lapisan yang terbentuk. Kristal adalah zat padat yang susunan atom-atomnya atau molekulnya teratur. Partikel kristal tersusun secara berulang dan teratur serta perulangannya mempunyai rentang yang panjang. Struktur kristal terdapat pada hampir semua logam dan mineral. Suatu struktur kristal dibangun oleh sel unit, sekumpulan atom, yang tersusun secara khusus, yang secara periodik berulang dalam tiga dimensi dalam suatu kisi. Spasi antar sel unit dalam segala arah disebut parameter kisi.

Struktur dan kualitas kristal suatu materi dapat dilihat dari besarnya nilai FWHM (*Full Width Half Maximum*) dan orientasi bidang kristal. Orientasi bidang kristal digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal mengarah pada kristal tunggal atau polikristalin. Tinggi rendahnya nilai FWHM digunakan untuk

mengidentifikasi kualitas kristal. Nilai FWHM didapatkan dengan cara mencari dua titik setengah dari intensitas puncak difraktogram XRD. Untuk mendapatkan sudut difraksi dapat memanfaatkan persamaan (2.1). *Grain size* juga dapat diidentifikasi menggunakan formula Scherrer (Cullity, 1978) sebagai berikut:

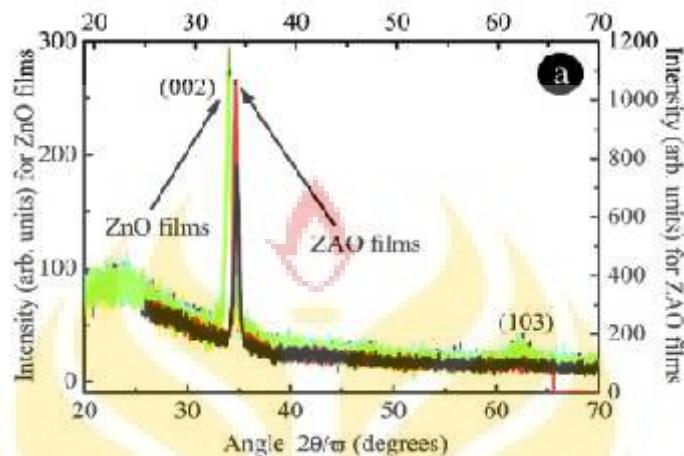
$$D = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta} \quad (2.1)$$

dengan D adalah *grain size*, B adalah *Full Width at Half Maximum* (FWHM) dalam radian ($1^\circ = 1,7452 \times 10^{-2}$ rad), θ adalah sudut difraksi.

Struktur dan simetri suatu zat padat mempunyai peran penting dalam menentukan sifat-sifatnya, seperti struktur pita energi dan sifat optiknya. Pada dasarnya, struktur dan topografi suatu lapisan bahan bergantung pada perlakuan saat penumbuhan, seperti suhu pada saat penumbuhan, sumber dan energi atom-atom pengotor, topografi substrat dan tekanan aliran gas yang dipakai saat penumbuhan film. Parameter-parameter tersebut juga mempengaruhi mobilitas permukaan atom-atom teradsorpsi.

Ukuran butir lateral diharapkan meningkat dengan berkurangnya nilai konsentrasi larutan tekanan uap di atas yang diperlukan untuk berkondensasi menjadi fase padatan pada kondisi kesetimbangan termodinamika, serta diharapkan dapat meningkatkan mobilitas permukaan atom-atom teradsorpsi. Film tipis dengan butiran-butiran besar terbentuk pada suhu substrat tinggi yang diakibatkan mobilitas permukaan yang tinggi. Struktur film tipis ZnO mempengaruhi sifat listrik dan sifat optik. Wirjoadi (2008) melaporkan bahwa struktur kristal lapisan tipis ZnO:Al lebih teratur bila dibandingkan dengan lapisan tipis ZnO. Dan hasil karakterisasi struktur kristal lapisan tipis ZnO dan ZnO:Al terorientasi pada bidang

(002), dengan Sifat optik (transmitansi) lapisan tipis ZnO dan ZnO:Al masing-masing (62 - 80) % dan (20 - 68) %. Gambar 2.6 menunjukkan pola XRD terhadap struktur kristal filim tipis ZnO yang baik.



Gambar 2.6. Pola XRD struktur kristal film ZnO dan ZAO (Suchea, 2007)

2.5. Sifat Optik Lapisan Tipis ZnO

Transmitansi, absorbansi dan reflektansi merupakan sifat optik dari suatu material yang ada kaitannya dengan interaksi antara material dengan gelombang elektromagnetik seperti cahaya, khususnya cahaya tampak. Spektrum refleksi, absorbsi atau transmisinya. Spektrum absorbsi menunjukkan fungsi koefisien absorbsi terhadap energi foton cahaya. Spektrum transmisi menunjukkan fungsi transmisi terhadap panjang gelombang.

Sifat optik dari lapisan film tipis suatu bahan dapat ditunjukkan melalui interaksi film dengan cahaya. Ketika cahaya mengenai suatu bahan maka sebagian akan diserap, dipantulkan dan ditransmisikan. Berdasarkan nilai transmitansi dapat diketahui bagaimana kemampuan material atau bahan tersebut dalam

mentransmisikan cahaya. Pada aplikasi sel surya, nilai transmitansi ini berpengaruh terhadap performa sel surya tersebut.

Pengukuran sifat optik menggunakan gelombang elektromagnetik dari ultraviolet sampai inframerah. Parameternya adalah panjang gelombang (λ), energi ($h\nu$). Hubungan antara energi dan panjang gelombang ditunjukkan pada Persamaan (2.2)

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (2.2)$$

dengan E adalah energi gelombang cahaya (*Joule*), h adalah konstanta *planck* yang besarnya $6,62 \times 10^{-34}$ J.s, c adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa yang besarnya 3×10^8 m/s dan λ adalah panjang gelombang cahaya (m) (Schroder, 2006).

Transmitansi merupakan perbandingan antara intensitas cahaya setelah dan sebelum melewati material semikonduktor yang dinyatakan dengan Persamaan (2.3)

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.3)$$

dengan T adalah besar transmitansi material semikonduktor (%). Intensitas radiasi berkurang secara eksponensial terhadap film sehingga persamaan 2.6 dapat dinyatakan dalam persamaan

$$I/I_0 = e^{-\tau l b} \quad (2.4)$$

dengan b adalah ketebalan film dan τ adalah koefisien absorpsi optik.

Hubungan transmitansi dengan ketebalan dapat dilihat dengan mensubstitusikan persamaan (2.3) dalam persamaan (2.4) sehingga diperoleh

$$T = e^{-\tau l b} \quad (2.5)$$

Nilai ketebalan yang semakin besar menyebabkan nilai transmitansi semakin kecil, ditunjukkan dalam persamaan (2.6) dan (2.7).

$$-\alpha b = \ln T \quad (2.6)$$

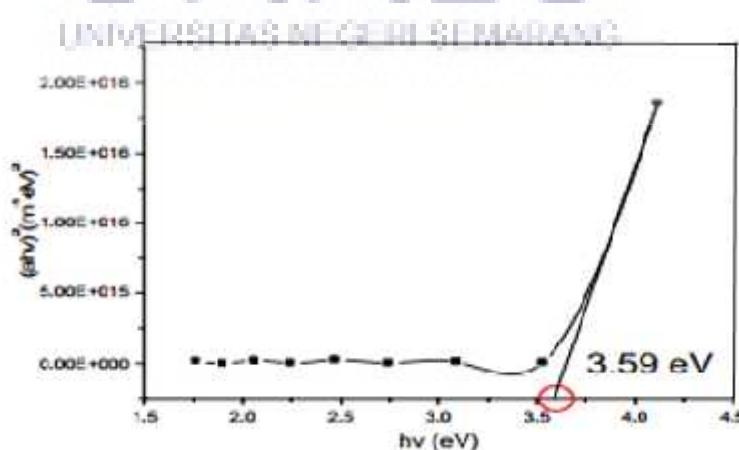
$$\alpha = -\frac{1}{b} \ln T \quad (2.7)$$

Material semikonduktor dengan celah pita energi langsung (*direct band gap*) memiliki hubungan sederhana antara α dan v , khususnya pada energi foton yang hampir setara dengan nilai celah pita energi semikonduktor. Pada jangkauan energi tersebut koefisien absorpsi memenuhi persamaan

$$(\alpha h\nu)^2 = A (h\nu - E_g) \quad (2.8)$$

dengan E_g adalah lebar celah pita energi (energi gap) dan A adalah konstanta yang terkait dengan sifat pita energi.

Menentukan lebar celah pita energi dapat ditentukan menggunakan metode *Tauc Plot* yaitu dengan cara melakukan ekstrapolasi dari grafik hubungan $E_g = h\nu$ sebagai absis dan $(h\nu)^n$ sebagai ordinat hingga memotong sumbu energi sehingga diperoleh nilai celah pita energi. Gambar 2.7 adalah contoh penentuan celah pita energi film tipis TiO_2 menggunakan metode *Tauc Plot* (Bilalodin, 2012).



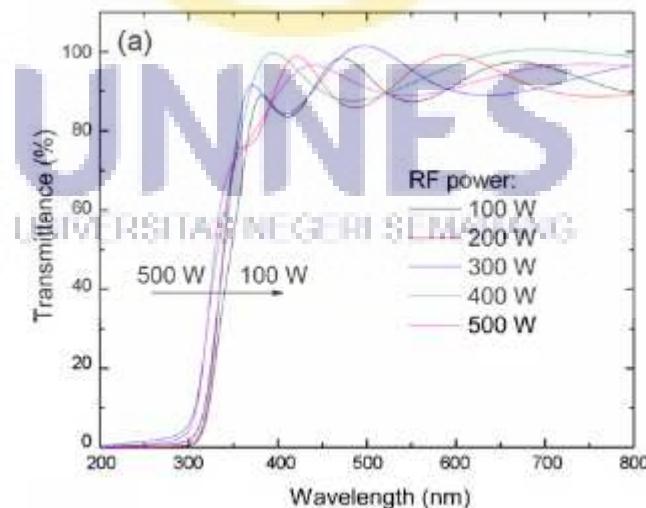
Gambar 2.7. Penentuan celah pita energi TiO_2 dengan metode *touc plot*

Berbeda dengan semikonduktor yang memiliki *indirect band gap*, hubungan antara koefisien absorpsi dengan frekuensi cahaya dapat didekati dengan persamaan

$$\alpha = A (hv - E_g)^2 \quad (2.9)$$

Penentuan besarnya celah pita energi (*band gap*) dari pengukuran absorpsi optik dipengaruhi oleh beberapa hal. Pengaruh yang pertama adalah terbentuknya *band tail* atau energi urbach. Energi urbach terjadi karena adanya keadaan terlokalisasi (*localized states*) pada *band gap* sebagai akibat dari keacakan struktur penyusun film dan ditambah dengan adanya konsentrasi doping yang tinggi (Caricato *et al.*, 2010) atau cacat kristal dan tergabung dalam pita konduksi dan pita valensi. Efek ini menghasilkan tepi eksponensial dalam bahan semikonduktor (Wiyanto *et al.*, 2004).

Gambar 2.8. Menunjukkan kurva transmitansi yang diperoleh pada penelitian film tipis ZnO:Al pada variasi power *sputtering*.



Gambar 2.8. Transmitansi film ZnO:Al dengan variasi power *sputtering* (Weifeng, 2008)

2.6. Sifat Listrik Lapisan Tipis ZnO

Sifat listrik film tipis dapat diketahui dari resistivitas, konduktivitas dan jenis pembawa muatannya. Konduktivitas merupakan kemampuan suatu material dalam mengalirkan panas atau listrik. Bahan semikonduktor mempunyai dua jenis pembawa muatan yaitu elektron dan *hole*. Ketika medan listrik diberikan pada suatu material, elektron dalam material tersebut akan mengalir berlawanan dengan arah medan dan membawa arus listrik, sedangkan *hole* mengalir searah dengan medan. Konduktivitas dari pembawa muatan dapat dinyatakan sebagai berikut (Kittel, 1976).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = nqu \quad \text{atau} \quad \rho = \frac{1}{nq} \quad (2.10)$$

dimana σ adalah konduktivitas dan ρ adalah resistivitas tergantung pada pembawa muatan n , besar muatan q (-e untuk elektron dan +e untuk *hole*), dan mobilitas pembawa muatan μ . Pada hantaran listrik pada bahan semikonduktor intrinsik oleh elektron dan lubang (*hole*), konduktivitas dinyatakan dengan:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad \text{atau} \quad \rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (2.11)$$

Bahan semikonduktor tipe-n pembawa mayoritasnya adalah elektron sedangkan bahan semikonduktor tipe-p pembawa mayoritasnya adalah *hole*. Pada suatu keadaan dimana tidak dapat dibedakan diantara pembawa mayoritas dan pembawa minoritas karena kosentrasi elektron dan *hole* sama maka, semikonduktor ini disebut semikonduktor intrinsik. Karakteristik yang menonjol dari material oksida konduktif transparan (TCO) adalah resistivitas listrik yang rendah dan transparansi yang tinggi pada panjang gelombang visibel.

BAB V

PENUTUP

5.1. Simpulan

Penumbuhan film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* (0, 200, 300 dan 400°C) di atas substrat *corning glass* dengan metode *DC Magnetron sputtering* pada tekanan 500 mTorr, temperatur substrat 400°C, daya plasma 35,65 watt, dan waktu penumbuhan 120 menit telah berhasil dilakukan. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *annealing* menyebabkan film tipis ZnO doping Al mempunyai kualitas kristal yang baik. Struktur kristal yang dihasilkan adalah heksagonal dengan intensitas tertinggi dan dominan pada bidang (002) dan (101). Pada bidang orientasi (002) dapat diaplikasikan sebagai *windows layer* sel surya dan bidang (101) dapat diaplikasikan sebagai *photoanoda single layer* dan *double layer* pada *Dye-Sensitized Solar Cell* (*DSSC*). Film yang ditumbuhkan pada temperatur 300°C memiliki nilai kualitas kristal yang baik dengan nilai resistivitas yang paling kecil sekitar $2,89 \times 10^2$ (.cm) dan nilai transmitansi paling besar 84,80%. Hal ini dapat disimpulkan bahwa film tipis ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 300°C memiliki film yang optimum untuk aplikasi *windows layer* sel surya.

5.2. Saran

Karakterisasi penumbuhan film tipis ZnO doping Al variasi temperatur *annealing* perlu dikembangkan lagi dengan *treatment annealing* dengan dialiri gas oksigen, argon dan hidrogen. Dengan demikian dapat mengetahui lebih jauh pengaruhnya terhadap sifat fisis film tipis ZnO doping Al dengan kualitas yang lebih baik.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., & Khairurrijal. 2009. Review Karakterisasi Nanomaterial. *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi*, Vol. 2 (1) 165-169.
- Ajimsha, R.S, A.K. Das, B.N. Singh, P. Misra, & L.M. Kukreja. 2010. Structural, Electrical and Optical Properties of Dy Doped ZnO Thin films Grown by Buffer Assisted Pulsed Laser Deposition. Elsevier. *Physica* Vol. 42, 1838–1843.
- Al-Kuhaili, S.M.A. Durrani, I.A. Bakhtiari, M. Saleem. 2012. *Optical constants of vacuum annealed radio frequency (RF) magnetron sputtered zinc oxide thin films*. Physics Department, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia. Elsevier. *Optics Communications*, Vol. 285, 4405-4412.
- Bao Ma, Q, Z-Zhen Ye, H-P. He, L-P.Zhu, B-H. Zhao. 2007. Effect of Deposition Pressure on the Properties of Transparent Conductive ZnO:Ga Films Prepared by DC Reactive Magnetron Sputtering. *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol.10 (2) 167-172.
- Bilalodin. 2012. Pembuatan dan Penentuan Cela Pita Optik Film Tipis TiO₂. Purwokerto: Universitas Soedirman. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng & DIY*, Vol.23, 86-89.
- Byeong Yun Oh, Min-Chang Jeong, Doo-Soo Kim, Woong Lee, Jae-Min Myoung. 2005. Post-annealing of Al-doped ZnO films in hydrogen atmosphere. Information & Electronic Materials Research Laboratory, Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University,134 Shinchondong, Seoul Korea. Elsevier, Vol. 2, 120-749
- Cao, H.T, Z.L. Pei, J. Gong, C. Sun, R.F. Huang, & L.S. Wen. 2004. Preparation and Characterization of Al and Mn Doped ZnO (ZnO: (Al, Mn)) Transparent Conducting Oxide Films. Elsevier. *Journal of Solid State Chemistry*, Vol. 177, 1480–1487.

- Chaabouni, F. M. Abaab, & B. Rezig. 2004. Effect of the Substrate Temperatur on the Properties of ZnO Films Grown by RF Magnetron Sputtering. Elsevier. *Materials Science and Engineering B*, Vol.109, 236–240.
- Chen, J.T., J. Wang, R.F. Zhuo, D. Yan, J.J. Feng, F. Zhang, & P.X. Yan. 2009. The Effect of Al Doping on The Morphology and Optical Property of ZnO Nanostructures Prepared by Hydrothermal Process. Elsevier. *Applied Surface Science*, Vol. 255, 3959–3964.
- Chen, M, Z.L. Pei, C. Sun, L.S. We, & X. Wang. 2000. Surface Characterization of Transparent Conductive Oxide Al-Doped ZnO Film. Elsivier. *Journal of Crystal Growth*, Vol. 220, 254 262.
- Cullity. 1978. *Element of X-Ray Diffraction*. Philipines: Addison Wesley Publishing Company Inc.
- Dengyuan, Song (2005). Zinc Oxide TCOs (Transparent Conductive Oxides) And Polycrystalline Silicon Thin-Films For Photovoltaic Applications. *Tesis*. University of New South Wales.
- Devoe D.E. 2002. *Sensors Actuators A*. 88, 263.
- Ellmer, K. 2000. *Magnetron Sputtering of Transparent Conductive Zinc Oxide: Relation between the Sputtering Parameters and the Electronic Properties. J. Phys. D: Appl. Phys.*ethod for transparent electrodes, Vol. 19, 1787-1790.
- Firmaningsih. 2015. Pengaruh Fraksi Mol Alumunium Oxide (Al_2O_3) terhadap Sifat Listrik dan Sifat Optik Film Tipis Zinc Oxide (ZnO) dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes.
- Goldsmith, S. 2006. Filtered Vacuum ARC Deposition of Undoped and Doped ZnO Thin Films: Electrical, Optical, and Structural Properties. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, 3993–3999.
- Guillen C, J. Herrero. 2010. Optical, electrical and structural characteristics of Al:ZnO thin films with various thicknesses deposited by DC sputtering at room temperature and annealed in air or vacuum. Departamento de Energiá, CIEMAT, Av. Complutense 22, 28040. *Elsevier Ltd. All rights reserved* Vol.84, 924–929.

- Hamali El S.O, W.M. Cranton, N. Kalfagiannis, X. Hou, D.C. Koutsogeorgis. 2016. Enhanced electrical and optical properties of room temperature deposited Aluminium doped Zinc Oxide (AZO) thin films by excimer laser annealing. School of Science and Technology, Nottingham Trent University, Clifton Lane, Nottingham NG11 8NS, UK. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 80, 45–51.
- Han, Jiaping, P.Q. Mantas, & A.M.R. Senos. 2000. Effect of Al and Mn doping on the Electrical Conductivity of ZnO. Elsevier. *Journal of the European Ceramic Society* Vol. 21, 1883-1886.
- Han, Jiaping, P.Q. Mantas, & A.M.R. Senos. 2001. Effect of Al and Mn Doping on The Electrical Conductivity of ZnO. Elsevier. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, 1883–1886.
- Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo, P. Yang. 2001. *Science* Vol. 292, 1897.
- Hyung Jun Cho, Sung Uk Lee, Byungyou Hong, Yong Deok Shin, Jin Young Ju ,Mungi Park, Won Seok Choi. 2010. The effect of annealing on Al-doped ZnO films deposited by RF magnetron sputtering method for transparent electrodes. School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Republic of Korea. *Thin Solid Films*, Vol. 518, 2941–2944.
- Jang, M.S., M.K. Ryu, M.H. Yoon, S.H. Lee, H.K. Kim, A. Onodera, & S. Kojima, 2008. A Study on the Raman Spectra of Al-doped and Ga-doped ZnO Ceramics. Elsevier. *Current Applied Physics* Vol. 9, 651-657.
- Jiang, J.G. Lun, Y.L. Yuan, L.W. Sun, X. Wang, Z. Wen, Z.Z. Ye, D. Xiao, H.Z. Ge, Y. Zhao. 2013. Tailoring the morphology, optical and electrical properties of DC-sputtered ZnO:Al films by post thermal and plasma treatments. State Key Laboratory of Silicon Materials, Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. *Materials Letters*, Vol.106, 125–128.
- Jin Hong Lee, Byung-Ok Park. 2004. *Characteristics of Al-doped ZnO thin films obtained by ultrasonic spray pyrolysis: effects of Al doping and an*

- annealing treatment.* Department of Inorganic Materials Engineering, Kyungpook National University, South Korea. *Materials Science and Engineering B*, Vol.106, 242–245.
- Joshi, C. 2003. Charaecterization And Corrosion of BCC-Tantalum Coating Deposited On Aluminium And Stell Substrat by Dc Magnetron Sputtering. *Thesis*. New jeresy:new jeresy institute of technology press.
- Kang, Seong Jun & Yang Hee Joung. 2007. Influence of Substrate Temperature on the Optical and Piezoelectric Properties of ZnO Thin films Deposited by RF Magnetron Sputtering. Elsivier. *Applied Surface Science* Vol.253, 7330–7335.
- Kim, Do-Hyun, Hoonha Jeon, Gheumchae Kim, Suejeong Hwang Boe, Ved Prakash Verma, Wonbong Choi, & Minhyon Jeon. 2007. Comparison of the Optical Properties of Undoped and Ga-doped ZnO Thin Films Deposited using RF Magnetron Sputtering at Room Temperatur. Elsevier. *Optics Comunications*, Vol. 281, 2120-2125.
- Kittel, Charles. 1996. *Introduction to Solid State Physics*. United States of America: Jhon wiley & sons, inc.
- Ko See.C, Y.C. Kim, S.S. Lee, S.H. Choi, S.R. Kim. 2003. *Sensors Actuators A*. Vol. 3, 103-130.
- Kuo, Shou-Yi, Kou-Chen Liu, Fang-I Lai, Jui-Fu Yang, Wei-Chun Chen, Ming-Yang Hsieh, Hsin-I Lin, & Woei-Tyng Lin. 2010. Effect of Power on the Structural, Optical and Electrical Properties of Al-doped Zinc Oxide Fillms. Elsevier. *Microelektronics Reliability*, Vol. 7, 730-733.
- Kuo, Shou-Yi, Wei-Chun Chen, Fang-I Lai, Chin-Pao Cheng, Hao-Chung Kuo, Shing-Chung Wang, & Wen-Feng Hsieh. 2006. Effects of Doping Concentration and Annealing Temperatur on Properties of Highly-Oriented Al-Doped ZnO Films. Elsevier. *Journal of Crystal Growth*, Vol. 2 (287) 78–84.
- Liewhiran, C. & S. Phanichphant. 2007. Improvement of Flame-made ZnO Nanoparticulate Thick Film Morphology for Ethanol Sensing. *Sensors*, Vol. 7, 650-675.

- Liewhiran,C. & S. Phanichphant. 2007. Improvement of Flame-made ZnO Nanoparticulate Thick Film Morphology for Ethanol Sensing. *Sensors*, Vol. 7, 650-675.
- Liu Chaoying, Zhiwei Xu, Yanfang Zhang, Jing Fu, Shuguang Zang, Yan Zuo. 2015. Effect of annealing temperature on properties of ZnO:Al thin films prepared by pulsed DC reactive magnetron sputtering. China Building Materials Academy, Beijing 100024, China. *Materials Letters*. Vol. 139, 279–283.
- Minami, T., Satoshi Ida, Toshihiro Miyata, & Youhei Minamino. 2003. Transparent Conducting ZnO Thin Films Deposited by Vacum ARC Plasma Evaporation. Elsevier. *Thin Solid Films*, Vol. 3 (445) 268-273.
- Min-Chul-Jun, Sang-Uk Park, & Jung-Hyuk Koh. 2012. Comparative Studies of Al doped ZnO and Ga-doped ZnO Transparent Conducting Oxide Thin Films. Springer. *Nanoscale Research Letters*, Vol.7, 639.
- Ming Lin Y, Chien-Hsun Chu, Hung-Wei Wu and Jow-Lay Huang. 2015. Study of AZO Thin Films Under Different Annealing Atmosphere on Structural, Optical and Electrical Properties by rf Magnetron Sputtering. Hong Kong. *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, Vol II IMECS 2015.
- Nafees, M., Liaqut, W., Ali, S., and Shafique, M.A. 2012. Synthesis of ZnO/Al:ZnO nanomaterial: structural and band gap variation in ZnO nanomaterial by Al doping. *Applied Nanoscience*, Vol. 3 (1), 49-55.
- Park, Jong Pil, Sin, Kyu Kim, Jae-Young Park, Kang Min Ok, & II-Wun Shim. 2009. Preparation of ZnO Thin Films Using ZnO-Containing Single Precursor through MOCVD Method. *Bull. Korean Chem. Soc.* Vol.3, 650-675.
- Patel, K. J., M. S. Desai, & C. J. Pancal. 2010. Properties of RF Magnetron Sputtered Indium Tin Oxide Thin Films on Externally Unheated Glass Substrate. Springer Science. *Mater Electron*, Vol.22, 959-965.
- Pearson S.J., D.P. Norton, K. Ip, Y.W. Heo, T. Steiner, Prog. Mater. Sci. 2005. *Physica*, Vol .50, 293.

- Perrenoud, J., L. Kranz S., Buecheler, F. Pianezzi, & A. N. Tiwari. 2011. The Use of Aluminium Doped ZnO as Transparent Conductive Oxide for CdS/CdTe Solar Cells. Elsevier. *Thin Solid Films*, Vol. 519, 7444-7448.
- Puchert, P. Y. Timbrell, and R. N. Lamb. 1996. Postdeposition annealing of radio frequency magnetron sputtered ZnO films. Surface Science and Technology, School of Chemistry, University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia.
- Purwaningsih, S.Y. 2003. Pembuatan Film tipis ZnO:Al pada Substrat Kaca dengan metode DC Magnetron Sputtering dan Karakterisasi Sifat Fisisnya. *Thesis*. Univeritas Gajahmada, Yogyakarta: 8-10.
- Rogachev A, Semchenko, Sidsky, Gaishun, Kovalenko, Gremenok, Zaretskaya and Sudnuk. 2016. Structural, Optical and Electrical Properties of ZnO: Al Thin Films Synthesized by Sol-gel Method. Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus. Springer Science+Business Media Singapore 2016. V. Sontea and I. Tiginyanu (eds.), *3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, IFMBE Proceedings* Vol.55, 978-981.
- Sali, S., M. Boumaour, & R. Tala-Ighil. 2008. Preparation and Characteristic of Low Resistive Zinc Oxide Thin Films Using Chemical Spray Technique for Solar Cells Application The Effect of Thickness and Temperature Substrate. *Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse*, Vol.1, 201-207.
- Schroder, K. D. 2006. *Semiconductor Material and Device Characterization*. Canada: Jhon Wiley & Sons, inc.
- Seung Yeop Myong *et al*. 2007. “Temperature dependence of the conductivity in large - grained boron-doped ZnO films. *Solar energy Material & Solar Cell*, Vol. 91 (2007) 1269-1274.
- Shi, J.H., S.M. Huang, J.B. Chu, H.B. Zhu, Z.A. Wang, X.D. Li, D.W. Zhang, Z. Sun, W.J. Cheng, F.Q. Huang, &X.J. Yin. 2010. Effect of ZnO Buffer Layer on AZO Films Properties and Photovoltaic Applications. Springer. *Mater Elektron*, Vol. 21, 1005-1013.

- Shinde.V.R et. al. 2007. "Studies on growth of ZnO thin films by a novel chemical method". *Solar energy Material & Solar Cell*, Vol. 91, 1055-1061.
- Sim, Kyu Ung, Seung Wook Shin, A.V. Moholkar, Jae Ho Yun, Jong Ha Moon, & Jin Hyeok Kim. 2010. Effect of dopant (Al, Ga, and In) on the Characteristics of ZnO Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering System. Elsevier. *Current Applied Physics*, Vol. 1 (10) 5463-5467.
- Sinaga. 2009. Pengaruh temperatur Annealing terhadap Struktur Mikro, Sifat Listrik, Sifat Optik Dari Film Tipis Oksida Konduktif Transparan ZnO: Al yang dibuat Dengan Teknik Screen Printing. Jurusan Pendidikan Fisika FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia. *Jurnal Pengajaran MIPA*, Vol. 14 (2) 51-58.
- Singh, A.V, M.Kumar, R. M. Mehra, A.Wakahara, A.Yoshida. 2001. Al-doped Zinc Oxide (ZnO:Al) Thin Films by Pulsed Laser Ablation. *J. Indian, InAsLt.-DScOि.P, ESDep Zt.I-NOCc tO. 2X0I0D1E, 8 (Z1, N 5O2:7A-L5)3T3H. I.*
- Suchea, M., S. Christoulakis, N. Katsarakis, T. Kitsopoulos, & G. Kiriakidis. 2007. Comparative study of zinc oxide and aluminum doped zinc oxide transparent thin films grown by direct current magnetron sputtering. Elsevier. *Thin Solid Films*, Vol. 515, 6562– 6566.
- Sudjatmoko. 2003. *Teknologi Sputtering (Diktat Kuliah Workshop Sputtering untuk Rekayasa Permukaan Bahan)*. Yogyakarta: Penerbit BATAN.
- Sudjatmoko. Wirjoadi, & B. Siswanto. 2009. Influence of Substrate Temperature on Structural, Electrical and Optical Properties of ZnO:Al Thin Films. *Atom Indonesia*, Vol. 35 No. 2, 115 – 125.
- Sugianto, & Upik N. 2005. *Bahan Ajar Fisika Zat Padat*. Semarang: UNNES.
- Sugianto. 2009. *Buku Ajar Fisika Zat Padat*. Semarang: UNNES.
- Suprayogi Dwi. 2014. Pengaruh doping galium oksida pada karakteristik film tipis seng oksida ditumbuhkan dengan metode dc magnetron sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes.
- Suryanarayana C, dkk. 1998. *X-ray Diffraction A Partical Approach*. New York: plenum Press.

- Sutanto. 2016. Fabrikasi Semikonduktor Zinc Oxide (ZnO) Nanofiber dengan doping Al sebagai Photoanoda Single Layer dan Double Layer Pada DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC). *Skripsi*. Surakarta: FT Universitas Sebelas Maret.
- Syukron, A, Doty Dewi Risanti, dan Dyah Sawitri. 2013. Pengaruh Preparasi Pasta dan Temperatur Annealing pada Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) Berbasis Nanopartikel ZnO. Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). *JURNAL TEKNIK POMITS* Vol. 2 (2013) 252-256.
- Tao, R., Tomita, T., Wong, R.A., and Waki, K., 2012, *Electrochemical and structural analysis of Al-doped ZnO nanorod arrays in dye-sensitized solar cells*, Journal of Power Sources, Vol. 214 pp. 159-165.
- Tsay, Chien-Yie, Hua-Chie Cheng, Yen-Ting Tung, Wei-Hsing Tuan, & Chung-Kwei Lin. 2008. Effect of Sn-doped on Microstructural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Sol Gel Method. Elsevier. *Thin Solid Films*, Vol.517, 1032-1036.
- U Ozgur, Y.I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M.A. Reschikov, S. Do UO gan, V. Avrutin, S.-J.Cho, H. Morkoc- , J. 2005. *Appl. Phys.* Vol.98, 41-49.
- Wang, M.Z. Wu, Y.Y. Wang, Y.M. Yu, X.M. Wu, L.J. Zhuge. 2013. Influence of thickness and annealing temperature on the electrical, optical and structural properties of AZO thin films. Department of Physics, Soochow University, Suzhou 215006, China. *Vacuum*, Vol. 89, 127-131.
- Weifeng Yang, Zhuguang Liu, Dong-Liang Peng, Feng Zhang, Huolin Huang, Yannan Xie, Zhengyun. 2008. Room-temperature deposition of transparent conducting Al-doped ZnO films by RF magnetron sputtering method. Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, PR China.
- Wirjoadi & Bambang Siswanto. 2008. Sifat Optik, Struktur Kristal dan Struktur Mikro Lapisan Tipis ZnO:Al pada Substrat Kaca sebagai Bahan TCO. Yogyakarta: Penerbit BATAN.

- Wiyanto, Sugianto, I. Supomo. 2004. Pengaruh Anneling pada Film Tipis Ta₂O₅ dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses*. ISSN 1411-4216, 1-5.
- Yanti. 2013. Penumbuhan dan Karakterisasi Sifat Fisis Film Tipis ZnO doping Al dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes.
- Yazdanmehr, Mohse, Saeis Jalali Asadabadi, Abolghasem N., M. Ghasemzadeh. 2012. Electronic Structure and Bandgap of -Al₂O₃ Compound using mBJ Exchange Potential. Springer. *Nanoscale Research Letters*, Vol. 7, 488.
- Yeong-Der Yao, Mao-Yi Chen, Chii-Ruey Lin, Yueh-Chung Yu Chung-Hua Chao, and Da-Hua Wei. 2013. Post annealing Effect at Various Gas Ambients on Ohmic Contacts of Pt/ZnO Nanobilayers toward Ultraviolet Photodetectors. Institute of Manufacturing Technology and Graduate Institute of Mechanical and Electrical Engineering, National Taipei University of Technology, Taipei 106, Taiwan. *Mechanical and Electrical Engineering*, Vol. 515, 64–69.
- Yu, R., Lin, G., Leung, S.-F., and Fan, Z. 2011. Nanomaterials and nanostructures for efficient light absorption and photovoltaics. *NanoEnergy*, Vol. 1, 57–72.
- Zhou, Hong-ming, Dan-qing Yi, Zhi-ming Yu, Lai-rong Xiao, & Jian Li. 2007. Preparation of Aluminum Doped Zinc Oxide Films and The Study of Their Microstructure, Electrical and Optical Properties. Elsevier. *Thin Solid Films*, Vol. 515, 6909–6914.