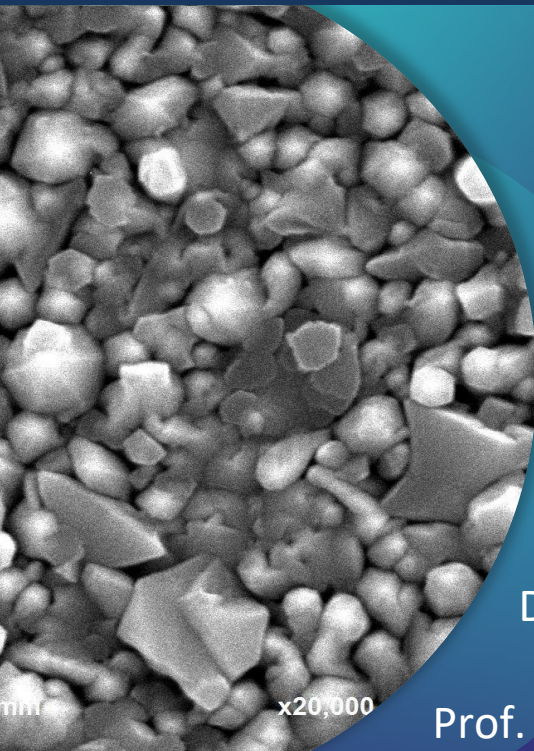


FABRIKASI FILM TIPIS ZnO:Ga
DENGAN METODE
DC MAGNETRON SPUTTERING
Pengaruh Daya Plasma dan Suhu
Annealing



Dr. Sulhadi, M.Si.
Dr. Siti Wahyuni, M.Sc.
Sri Mulyani, S.Si.
Vivian Aida Carieta, S.Si.
Didik Aryanto, S.Si., M.Sc.
Dr. Sugianto, M.Si.
Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.

FABRIKASI FILM TIPIS ZnO:Ga
DENGAN METODE
DC MAGNETRON SPUTTERING
Pengaruh Daya Plasma dan Suhu *Annealing*

Editor: Dr. Masturi, M.Si

FABRIKASI FILM TIPIS ZnO:Ga
DENGAN METODE
DC MAGNETRON SPUTTERING

Pengaruh Daya Plasma dan Suhu
Annealing

Dr. Sulhadi, M.Si.

Dr. Siti Wahyuni, M.Sc.

Sri Mulyani, S.Si.

Vivian Aida Carieta, S.Si.

Didik Aryanto, S.Si, M.Sc.

Dr. Sugianto, M.Si.

Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.

Penerbit

LPPM UNNES

Gedung Prof. Retno Sriningsih Satmoko
Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229

Hak Cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang Penerbitan
Hak Penerbitan pada LPPM UNNES.

Gedung Prof. Retno Sriningsih Satmoko, Kampus UNNES Sekaran, Gunungpati,
Semarang 50229

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh buku ini dalam bentuk apapun tanpa
izin dari penerbit.

Fabrikasi Film Tipis ZnO:Ga dengan Metode *DC Magnetron Sputtering* Pengaruh Daya Plasma dan Suhu *Annealing*

Dr. Sulhadi, M.Si.

Dr. Siti Wahyuni, M.Sc.

Sri Mulyani, S.Si.

Vivian Aida Carieta, S.Si.

Didik Aryanto, S.Si, M.Sc.

Dr. Sugianto, M.Si

Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.

Fabrikasi Film Tipis ZnO:Ga dengan Metode *DC Magnetron Sputtering*
Pengaruh Daya Plasma dan Suhu *Annealing*/ Dr. Sulhadi, M.Si.; Dr. Siti
Wahyuni, M.Sc.; Sri Mulyani, S.Si.; Vivian Aida Carieta, S.Si.; Didik
Aryanto. S.Si. M.Sc.; Dr. Sugianto, M.Si.; Prof. Dr. Putut Marwoto, M.S.-
Cet. 1-illus-Semarang: Lppm Unnes, 2019;

viii + 58 hlm; 14,8 x 21 cm

Keanggotaan IKAPI No. 175/ALB/JTE/2019

ISBN : 978-623-6686638

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh daya plasma dan suhu *annealing* pada struktur dan sifat optik film tipis ZnO:Ga yang difabrikasi dengan metode *dc magnetron sputtering*. Film ditumbuhkan di atas substrat kaca corning pada tekanan gas argon 500 mtorr, dan suhu substrat 300 °C dengan kondisi; (1) lama penumbuhan 120 menit dengan daya plasma 30, 35 dan 37 watt untuk mengetahui pengaruh daya plasma struktur dan sifat optik film; (2) lama penumbuhan 60 menit dan daya plasma 30 watt dengan variasi suhu *annealing* 250, 350 dan 450°C. Seluruh film dikarakterisasi struktur kristalnya dengan XRD dan struktur morfologinya dengan FESEM, sedangkan sifat optik dikarakterisasi dengan spektrofotometer UV-Vis. Seluruh film yang ditumbuhkan dengan variasi daya plasma menunjukkan struktur polikristal. Meskipun lemah, kehadiran puncak (002) pada sampel film tipis ZnO:Ga yang dideposisikan pada daya plasma 30 watt memperlihatkan terbentuknya struktur heksagonal *wurtzite* dalam arah sumbu-*c* yang tegak lurus pada substrat, dengan struktur morfologi yang lebih rata dan rapat dibandingkan dengan film yang ditumbuhkan pada daya plasma 35 dan 37 watt. Film ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan variasi daya plasma 30, 35 dan 37 watt masing-masing memiliki transmitansi sebesar 80, 68 dan 86% dengan *band gap* sebesar 3,89, 3,86, dan 3,92 eV. Selanjutnya, film yang diberi perlakuan *annealing* pada suhu 250, 350 dan 450°C juga menunjukkan struktur polikristal. Namun demikian, film telah mengalami rekristalisasi dengan puncak (002) yang dominan. Intensitas puncak (002) tertinggi dengan FWHM terkecil diperoleh pada film dengan *annealing* pada suhu 250°C. Film tipis ZnO:Ga dengan *annealing* pada suhu 250°C cenderung mempunyai permukaan yang relatif kurang rata dibandingkan dengan film yang diberi perlakuan *annealing* pada suhu 350 dan 450°C. Transmitansi tertinggi ~88% diperoleh pada film ZnO:Ga dengan suhu *annealing* 450°C. *Band gap* pada suhu *annealing* 250°C, 350°C dan 450°C diperoleh masing-masing secara berturut-turut 3,12 eV, 3,69 eV dan 3,94 eV.

Kata Kunci: ZnO:Ga, *dc magnetron sputtering*, struktur, sifat optik

PRAKATA

Buku monograf ini merupakan luaran penelitian yang didanai oleh DIPA FMIPA Universitas Negeri Semarang yang berjudul **Pengaruh Daya Plasma dan Suhu Annealing pada Sifat Fisis Film Tipis ZnO Doping Galium yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering**, dengan kontrak No. 64.31.5/UN37/PPK 4.4/2019. Buku ini diharapkan dapat menjadi salah satu rujukan yang bermanfaat bagi para peneliti dan mahasiswa di bidang sains dan teknologi material yang berminat menekuni film tipis, khususnya film tipis ZnO:Ga yang difabrikasi dengan *DC Magnetron Sputtering*. Penelitian yang dilakukan ini merupakan sebagian dari rangkaian penelitian tentang film tipis ZnO:Ga yang difabrikasikan dengan *DC magnetron sputtering* yang telah dilakukan oleh Kelompok Bidang Keahlian (KBK) Fisika Material Jurusan Fisika UNNES.

Meskipun belum sempurna, reaktor *DC magnetron Sputtering (homemade)* yang dirancang/bangun oleh Dr. Sugianto dkk. di sekitar tahun 2000-an telah menghasilkan banyak publikasi, baik yang berskala nasional maupun internasional. Tim Penulis sengaja menggunakan bahasa yang sederhana agar buku ini mudah dipahami pembaca dari berbagai lapisan.

Tim Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pimpinan FMIPA UNNES yang telah memberikan dana penelitian dengan skema Penelitian Kompetensi Terapan Non Pendidikan, FMIPA UNNES tahun 2019. Tim Penulis juga menyampaikan ucapan

terima kasih kepada pihak LIPI Serpong yang telah memberikan bantuan dalam karakterisasi sampel. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pimpinan Jurusan Fisika FMIPA UNNES yang telah berkenan memfasilitasi pelaksanaan penelitian. Demikian juga kepada KBK Fisika Material Jurusan Fisika UNNES, Tim Penulis mengucapkan banyak terima kasih atas diskusi dan sumbang saran dalam kegiatan penelitian hingga selesainya penulisan buku monograf ini.

Tim Penulis menyadari sepenuhnya bahwa buku monograf ini memiliki sejumlah kekurangan meskipun kami telah berusaha untuk menyusun buku ini sesempurna mungkin. Kritik dan saran dari pengguna buku ini sangat dinantikan.

Semarang, Oktober 2020

Tim Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	v
Prakata	vi
Daftar Isi	vii
1. Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
2. Film Tipis ZnO:Ga	6
2.1 Seng Oksida (ZnO)	6
2.2 Galium Oksida (Ga_2O_3)	8
2.3 Struktur Film Tipis ZnO:Ga	9
2.4 Sifat Optik Film Tipis ZnO:Ga	10
3. Fabrikasi dan Karakterisasi Film Tipis ZnO:Ga	11
3.1 DC <i>Magnetron Sputtering</i>	11
3.2 Fabrikasi Film Tipis ZnO:Ga	14
3.3 Karakterisasi Film Tipis ZnO:Ga	15
4. Struktur dan Sifat Optik Film Tipis ZnO:Ga	23
4.1 Pengaruh Daya Plasma	23
4.2 Pengaruh Suhu <i>Annealing</i>	33
4.3 Pembahasan	39
5. Penutup	51
Daftar Pustaka	52

1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

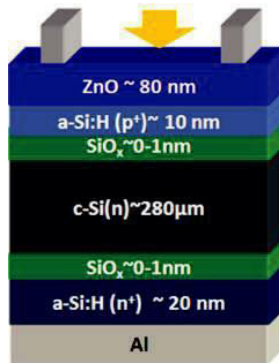
Perkembangan teknologi saat ini tidak terlepas dari rekayasa penggunaan bahan-bahan dalam bentuk lapisan tipis atau film tipis. Film tipis merupakan material oksida yang transparan terhadap cahaya dan umumnya terbuat dari material organik atau anorganik yang memiliki sifat konduktor, semikonduktor, maupun isolator (Muhammad & Nugroho, 2017). Film tipis banyak digunakan sebagai *transparent conductive oxide* (TCO) yaitu material dengan transparansi optik tinggi pada panjang gelombang cahaya tampak (Thirumoorthi & Prakash, 2015).

TCO merupakan material dengan transparansi optik tinggi pada panjang gelombang cahaya tampak (Thirumoorthi & Prakash, 2015). TCO mempunyai nilai transmisi yang mencapai 85-98%. TCO memiliki band gap sekitar 2,5 - 4,5 eV (Song, 2005) sehingga energi cahaya yang berada pada rentang energi band gap tersebut 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).

TCO pada dasarnya bersifat konduktif. Hal ini terjadi karena terbentuknya ikatan ionik yang 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. TCO mampu mengangkut muatan listrik dan mentransmisikan foton serta digunakan sebagai organic electroluminescence (EL) seperti *touch screen* monitor pada *automatic teller machine* (ATM), elektroda transparan di layar panel datar seperti *liquid crystal display* (LCD), dioda pemancar cahaya (LED) (Liu *et al.*,2013).

Salah satu material TCO yang sering digunakan adalah *indium thin oxide* (ITO). Material ITO merupakan oksida konduktor transparan yang paling banyak digunakan karena dua sifat utamanya, yaitu konduktivitas listrik dan transparansi optiknya (Stadler, 2012). Namun indium merupakan unsur tanah yang ketersediaannya di bumi sangat jarang dan mahal (Wang *et al.*,2015), sehingga tidak dapat memenuhi kebutuhan produksi yang terus meningkat. Oleh karena itu diperlukan adanya penelitian mengenai material pengganti ITO. *Zinc oxide* (ZnO) merupakan material yang diminati para peneliti sebagai pengganti ITO. 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 (Nafees *et al.*, 2013) dengan energi ikat 60 MeV serta memiliki sifat magnetik dan optik yang sangat

penting, yang membuat material ini bersifat multifungsi (Haimeur *et al.*,2018). Salah satu konfigurasi ZnO sebagai *windows layer* pada sel surya ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema sel surya dengan ZnO sebagai window layer (Lu *et al.*, 2014).

Film tipis ZnO tanpa doping mempunyai nilai konduktivitas yang rendah yaitu $6,24 \times 10^{-7} (\Omega\text{cm})^{-1}$ serta resistivitasnya sebesar $0,78 \Omega\text{cm}$ (Sim *et al.*,2010), sehingga perlu diperbaiki dengan cara didoping. Material dopan yang sering digunakan sebagai doping film tipis ZnO yaitu unsur-unsur dari golongan III A seperti indium (In) (Li *et al.*,2007), boron (B) (Kerli *et al.*,2015), aluminium (Al), serta galium (Ga) (Jun *et al.*,2012) karena dapat menurunkan resistivitas listrik film tipis ZnO hingga $1,4 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$, dapat meningkatkan struktur kristal, stabilitas kimia dan transmitansi optik. Galium banyak digunakan sebagai dopan, karena Ga bersifat kurang reaktif,

tidak mudah teroksidasi, dan merupakan dopan tipe-n yang efektif untuk ZnO (Khranovskyy *et al.*,2006), dan Ga³⁺ memiliki jejari ~ 0,062 nm yang mendekati jejari Zn²⁺ ~ 0,074 nm (Zhong *et al.*, 2012). Namun demikian, kualitas kristal film ZnO:Ga akan menurun ketika konsentrasi doping Ga lebih dari 2% (Marwoto *et al.*,2016).

Film tipis ZnO doping galium (ZnO:Ga) memiliki transmitansi optik yang tinggi dan sifat listrik yang cukup baik, serta efektif dalam stabilisasi sistem kekisi dan meningkatkan ionisasi ikatan kimia pada film tipis ZnO (Yu *et al.*, 2005a). Proses deposisi film tipis ZnO:Ga dilakukan dengan berbagai metode antara lain metode 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).

Metode *DC magnetron sputtering* merupakan metode yang paling banyak digunakan dalam fabrikasi material film tipis. Dalam metode ini digunakan arus searah atau *direct current* (DC) bertegangan tinggi yang menghasilkan medan listrik antara katoda dan anoda. Tegangan tinggi yang digunakan bertujuan agar energi penembakan dapat menghasilkan partikel berenergi tinggi. Fabrikasi film tipis ZnO:Ga dengan metode *DC magnetron sputtering* telah dilaporkan oleh Marwoto *et al.*(2014), Sulhadi, *et al.*(2015), dan Marwoto, *et al.* (2016) dengan berbagai variasi parameter penumbuhan. Selanjutnya dengan menggunakan reaktor *DC magnetron sputtering*, Astuti *et al.* (2018) telah memfabrikasi film tipis ZnO:Al dengan variasi daya plasma, sedangkan pengaruh waktu

annealing sebagai perlakuan pasca penumbuhan film tipis ZnO:Ga yang difabrikasi dengan *DC magnetron sputtering* juga telah dilaporkan oleh Marwoto *et al.*(2019). Proses *annealing* merupakan proses re-kristalisasi yang bertujuan agar atom-atom yang telah ditumbuhkan dapat tertata sehingga struktur kristal dapat tersusun merata dan homogen. Sebagai tindak lanjut, maka perlu dikaji pengaruh daya plasma dan suhu *annealing* pada film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan metode *dc magnetron sputtering*. Penelitian ini perlu dilakukan agar diperoleh informasi yang lebih lengkap tentang parameter penumbuhan film tipis ZnO:Ga yang difabrikasi dengan metode *dc magnetron sputtering* sehingga dapat diperoleh parameter optimum penumbuhan.

Dalam kertas kerja ini dilaporkan pengaruh daya plasma pada film tipis ZnO:Ga yang difabrikasi dengan *DC magnetron sputtering* dan pengaruh variasi suhu *annealing* pasca penumbuhan pada film tipis ZnO:Ga yang difabrikasi dengan *DC magnetron sputtering*.

1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah diutarakan, penelitian ini bertujuan: (1) Mempelajari pengaruh daya plasma pada sifat fisis film tipis ZnO:Ga yang difabrikasi dengan *DC magnetron sputtering*; (2) Mempelajari pengaruh suhu *annealing* pasca penumbuhan pada sifat fisis film tipis ZnO:Ga yang difabrikasi dengan *DC magnetron sputtering*

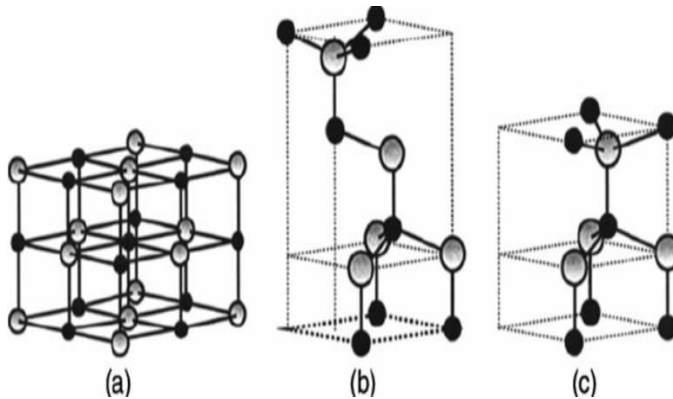
2

FILM TIPIS ZnO:Ga

2.1 Seng Oksida (ZnO)

ZnO (seng oksida) merupakan material paduan golongan II dan IV antara logam dan oksida serta material semikonduktor tipe-n yang unik karena memiliki energi gap sebesar 3,37 eV dan energi ikat eksiton ~ 60 meV (Ivanova *et al.*, 2015). Salah satu ciri khas dari ZnO adalah senyawa kimianya yang dapat berpadu dengan senyawa lain. ZnO intrinsik dianggap sebagai semikonduktor tipe-n karena cacat donor seperti intersisial Zn dan kekosongan oksigen (Yu *et al.*, 2005a; Yu *et al.*, 2005b).

Pada dasarnya ZnO memiliki 3 tipe struktur kristal yaitu, *zinc blende*, *wurtzite*, dan *rock salt*. Namun, dari ketiga struktur tersebut, stuktur *wurtzite* 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. Tiga tipe struktur kristal ZnO ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur Kristal ZnO (a) Rocksalt, (b) Zinc blende, (c) Wurtzite

ZnO merupakan kristal yang banyak dipakai dalam berbagai keperluan, antara lain sebagai katalis dan sebagai semikonduktor. Karakteristik kristal ZnO bergantung pada ukuran dan metode penumbuhannya. Kristal ZnO dengan ukuran nano telah ditumbuhkan dengan berbagai metode, 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, dan banyak diterapkan sebagai material fotokatalisis, sel surya, laser Uv-Vis, sensor gas, dan LED (Varughese *et al.*, 2015).

ZnO merupakan material yang berpotensi diaplikasikan sebagai material TCO karena memiliki energi gap yang lebar (3,37 eV), mudah didoping, dan stabil ketika didoping dengan golongan III (Singh *et al.*,2001). Material dopan dengan konsentrasi tertentu dapat bertindak sebagai donor elektron dalam pita konduksi pada ZnO sehingga meningkatkan konduktivitas listriknya. ZnO dapat bersifat

semikonduktor tipe-n atau tipe-p bergantung pada sifat dopan (Salam *et al.*,2012). Fotoluminesensi ZnO yang baik dan stabil pada rentang suhu yang tinggi menjadikan ZnO sebagai bahan yang sangat menjanjikan untuk berbagai aplikasi perangkat optoelektronik (Sharma *et al.*,2014).

2.2 Galium Oksida (Ga_2O_3)

Galium merupakan unsur golongan III A yang mempunyai lambang Ga dan bernomor atom 31. Ga mempunyai 3 elektron valensi. Agar tercapai keadaan stabil, Ga harus melepas elektron valensinya sehingga berubah menjadi Ga^{3+} . Di alam, unsur Ga banyak dijumpai dalam bentuk senyawa galium oksida atau Ga_2O_3 . Material Ga_2O_3 ini merupakan bahan semikonduktor dengan celah pita energi lebar $E_g = 4,8$ eV (Marwoto *et al.*,2009). Galium memiliki keuntungan sebagai dopan karena Ga^{3+} memiliki jari-jari (0,062 nm) dan ikatan kovalen (1,26 Å) yang mendekati jari-jari serta ikatan kovalen Zn^{2+} (0,074 nm dan 1,34 Å) sehingga Ga^{3+} dapat menggantikan Zn^{2+} tanpa mengganggu struktur kekisi dan menyebabkan tekanan bebas pada bahan ZnO (Hjiri *et al.*, 2015; Yang *et al.*,2009). Selain itu, panjang ikatan kovalen Ga-O (1,92 Å) lebih kecil dari panjang ikatan kovalen Zn-O (1,97 Å) mampu meminimalkan deformasi struktur kekisi ZnO (Assuncao *et al.*, 2003).

Sifat luminesensi (*luminescence*) film tipis Ga_2O_3 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

Ga_2O_3 banyak diaplikasikan sebagai bahan dielektrik, sensor kimia, transparant conductive oxide (TCO), serta *thin film electroluminescence* (TFEL). Galium juga dipertimbangkan untuk pembuatan elektroda transparan karena transmitansi yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, dan adhesi yang baik untuk substrat.

2.3 Struktur Film Tipis ZnO:Ga

Untuk meningkatkan konduktivitas ZnO, unsur-unsur golongan III seperti B, In, Al dan Ga biasa digunakan sebagai material doping (Fang, *et al.*, 2010). Galium (Ga) merupakan unsur yang sering digunakan sebagai doping pada film tipis ZnO. Sebagaimana telah diutarakan, hal ini terjadi karena jejari atom Ga hampir sama dengan jejari atom Zn, sehingga hanya menyebabkan sedikit deformasi kekisi meskipun konsentrasi Ga cukup tinggi pada film tipis ZnO:Ga.

Eksperimen menunjukkan bahwa spektrum XRD film tipis ZnO:Ga yang difabrikasi dengan *DC magnetron sputtering* menunjukkan puncak (002) yang kuat dan puncak (101) yang lemah (Marwoto, *et al.*, 2016). Hal ini menunjukkan bahwa film tipis ZnO:Ga yang difabrikasikan dengan *DC magnetron sputtering* berstruktur polikristal dan mempunyai struktur *wurtzit* dan memiliki dan memiliki arah orientasi dalam sumbu-*c* yang tegak lurus terhadap substrat. Namun demikian, spektrum XRD yang diperoleh tidak menunjukkan kehadiran fase Ga_2O_3 , sehingga dapat dikatakan bahwa atom-atom Ga pada film tipis ZnO yang difabrikasikan cenderung menggantikan atom Zn yang kosong. Hasil eksperimen juga

menunjukkan bahwa film tipis ZnO:Ga dengan konsentrasi Ga 1 dan 2% mempunyai struktur kristal yang relatif lebih baik dibandingkan dengan film tipis ZnO:Ga dengan konsentrasi Ga 3%. Spektrum EDX film tipis ZnO:Ga dengan Ga 2% menunjukkan kandungan unsur Ga sebesar 2,95%, sehingga dapat dikatakan bahwa film yang difabrikasi merupakan film tipis ZnO dengan doping Ga (Marwoto, *et al.*, 2014).

2.4 Sifat Optik ZnO:Ga

Kajian sifat optik film tipis ZnO telah dilakukan. Film tipis ZnO tanpa doping yang ditumbuhkan dengan *DC magnetron sputtering* menunjukkan transmitansi optik sebesar 76-92% untuk film yang difabrikasi pada suhu kamar dengan daya plasma 40 dan 30 watt (Marwoto *et al.*, 2014b). Transmitansi optik film tipis ZnO:Ga yang dideposisikan pada suhu 350°C mencapai 85% (Marwoto *et al.*, 2014a). Nilai transmitansi ini sama dengan transmitansi ITO dan ZnO:Ga yang difabrikasi dengan *rf magnetron sputtering*. Nilai transmitansi optik film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan suhu 300°C lebih tinggi dibandingkan dengan film tipis Zn:Ga yang ditumbuhkan pada suhu 400°C. Dengan melakukan plotting koefisien absorpsi terhadap energi foton dan mengekstrapolasi kurva hasil plotting tersebut dapat ditentukan nilai *band gap* (E_g). Berdasarkan hasil plotting tersebut didapatkan nilai *band gap* masing-masing 3,27 eV dan 3,23 eV untuk film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan pada 350 dan 400°C.

3

FABRIKASI DAN KARAKTERISASI FILM TIPIS ZnO:Ga

3.1 DC Magnetron Sputtering

3.1.1 Plasma

Plasma dapat dipandang sebagai fase ke empat setelah fase padat, cair dan gas. Plasma merupakan gas yang terionisasi. Suatu gas dikatakan terionisasi apabila terdiri dari atom-atom terionisasi yang bermuatan positif (ion) dan elektron yang bermuatan negatif dalam jumlah yang hampir sama. Dengan demikian muatan total plasma bersifat hampir netral, sehingga masih bersifat konduktif. Plasma dapat terjadi ketika temperatur atau energi suatu gas dinaikkan sehingga atom-atom gas terionisasi melepaskan elektron yang mengelilingi intinya (Nur, 2011).

Plasma mudah dipengaruhi oleh medan listrik dari luar. Ketika partikel bermuatan bergerak, maka akan terjadi konsentrasi muatan positif atau negatif di suatu titik tertentu yang mengakibatkan timbulnya medan listrik. Gerakan partikel bermuatan akan menimbulkan arus listrik yang mengakibatkan timbulnya medan

magnet. Medan listrik dan medan magnet ini akan mempengaruhi gerak partikel muatan lain yang berada di tempat yang jauh. Jika dimasukkan elektroda penghantar yang dihubungkan dengan sumber tegangan ke dalam plasma, maka kedua elektroda akan menarik partikel yang mempunyai muatan berlawanan.

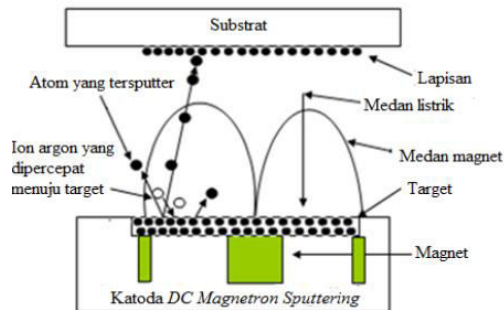
3.1.2 DC Magnetron Sputtering.

Proses *sputtering* dapat dijelaskan sebagai fenomena terhamburnya partikel-partikel mikroskopis material padatan (atom atau ion) dari permukaannya, setelah material itu tertumbuk oleh partikel-partikel berenergi tinggi yang berasal dari plasma. Atom-atom yang terhambur akibat tumbukan akan menuju ke segala arah, termasuk pada substrat dan membentuk film tipis (Wirjoadi *et al.*, 2007). Proses sputtering biasanya dilakukan dalam reaktor vakum untuk mengurangi pengaruh tumbukan dengan atom oksigen. Jika digunakan gas argon, ion Ar^+ yang berenergi tinggi akan mendominasi proses tumbukan dengan material target. Tumbukan antara ion dengan target mengakibatkan atom-atom target yang tertumbuk akan terpental dan terhambur dari permukaannya dan sebagian akan terdeposisi di atas substrat.

Di dalam plasma, gaya elektromagnetik memegang peranan yang cukup penting, sehingga tumbukan antara partikel bermuatan dengan partikel netral tidak berpengaruh. Dalam kesetimbangan termodinamika fluks elektron jauh lebih besar dari pada fluks ion. Hal ini disebabkan oleh massa elektron yang lebih kecil dibandingkan

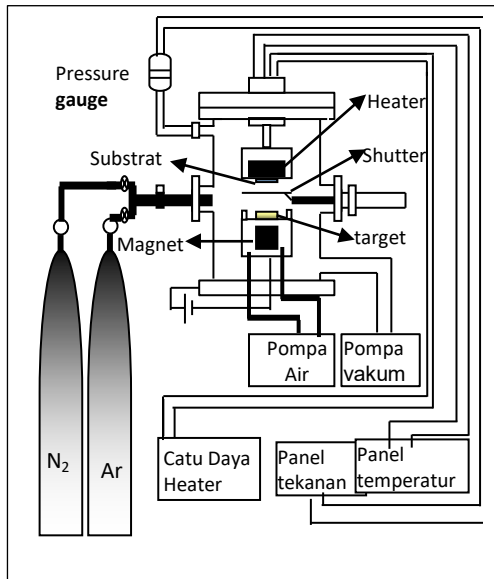
dengan massa ion, sehingga pergerakan elektron lebih cepat dari pada pergerakan ion.

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, yang umumnya digunakan gas argon (Ar). Bahan pelapis dapat terlepas akibat ditumbuk atom-atom Ar dengan energi kinetik tinggi dan menempel pada permukaan substrat. Gas Argon dipilih sebagai bahan pembentuk plasma karena merupakan gas mulia yang tidak bereaksi (inert) dengan target dan berfungsi membawa atom target menuju anoda (Tunggadewi Hidayanti, 2015). Skema reaksi dalam DC magnetron sputtering ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema reaksi dalam DC magnetron sputtering (Joshi, 2003)

Sistem reaktor yang digunakan untuk fabrikasi film tipis ZnO:Ga merupakan reaktor *DC magnetron sputtering (homemade)* yang dimiliki oleh Laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang dengan skema seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema reaktor *DC magnetron sputtering*

3.2 Fabrikasi Film Tipis ZnO:Ga

Bahan yang digunakan untuk deposisi film tipis ZnO doping Ga yaitu serbuk ZnO dan serbuk galium oksida dengan kemurnian 99,999% yang dibuat sebagai target dengan diameter 2,5 cm, substrat corning glass sebagai tempat tumbuhnya film, aseton dan metanol sebagai

pencuci substrat, gas nitrogen sebagai pengering substrat, pasta perak sebagai perekat substrat pada anoda dalam *DC magnetron sputtering*, serta gas argon sebagai gas pen-sputter.

3.2.1 Preparasi Substrat

Substrat yang digunakan pada penumbuhan film tipis ZnO:Ga adalah *corning glass*. Sebelum substrat digunakan terlebih dahulu substrat dipotong dengan ukuran kurang lebih (1×0,8) cm. Setelah dipotong, substrat kemudian dicuci dengan aseton dan metanol masing-masing selama 10 menit dan 5 menit dalam *ultrasonicbath*. Pencucian bertujuan untuk menghilangkan kotoran yang menempel pada substrat. Kemudian dikeringkan dengan menyemprot gas nitrogen secara merata ke permukaan substrat.

3.2.2 Deposisi Film Tipis ZnO:Ga

Proses deposisi film tipis ZnO:Ga dilakukan dengan reaktor *DC magnetron sputtering*. Langkah-langkah yang dilakukan dalam penumbuhan film tipis ZnO:Ga pada substrat kaca *corning* adalah membersihkan reaktor *DC magnetron sputtering* dengan aseton. Kemudian substrat yang telah dicuci dan dikeringkan dilekatkan pada anoda dengan pasta perak sedangkan target ZnO:Ga dipasang pada katoda. Substrat dipanaskan dengan menghidupkan catu daya *heater* hingga temperatur 100 °C. Pemanasan ini bertujuan untuk merekatkan substrat pada anoda. Setelah pasta perak mengering dan substrat merekat dengan sempurna, kemudian *chamber* ditutup kembali.

Selanjutnya *chamber* divakum disertai dengan menghidupkan sistem pendingin. Ketika *chamber* sudah dalam keadaan vakum, temperatur dinaikkan hingga 300 °C lalu ditunggu hingga stabil.

Gas argon dialirkan ke dalam *chamber* hingga tekanan 500 mTorr dan ditunggu hingga stabil. Setelah tekanan gas Argon stabil, plasma dibangkitkan dengan menghidupkan catu daya tegangan DC, saat kondisi plasma sudah stabil, *shutter* dibuka dan proses deposisi dimulai. Suhu deposisi diatur pada 300°C dengan waktu deposisi 120 menit. Setelah proses deposisi selesai, *shutter* ditutup kembali diikuti penurunan daya plasma, kemudian laju alir argon ditutup. Dalam eksperimen film ditumbuhkan masing-masing pada daya plasma 30, 35 dan 37 watt.

3.2.3 Proses Annealing

Annealing merupakan proses pengaturan panas material pada temperatur dan waktu tertentu dilanjutkan dengan pendinginan secara perlahan dalam tungku. Treatment annealing biasanya dilakukan setelah proses deposisi. Temperatur *annealing* dapat mempengaruhi struktur kristal (Sugianto *et al.*, 2017), morfologi permukaan film (Sinaga, 2009), sifat optik (Ma *et al.*, 2007) dan resistivitas listrik suatu bahan (Gromov *et al.*, 2013). Pengaturan temperatur *annealing* yang tepat selain agar pelarut yang terdapat dalam film tipis menguap dapat pula memperhalus ukuran butir. Penghalusan ukuran butir tersebut disebabkan butir satu dengan butir lainnya bersentuhan satu sama lain pada permukaan dan

meninggalkan daerah amorf sehingga struktur kristal lebih merata atau homogen (Zannah, 2016). Peningkatan ukuran butir menimbulkan proses densifikasi (*densification*) yang mengakibatkan penyusutan ketebalan film tipis sehingga dapat menurunkan resistivitas listrik. Keuntungan lain dari proses *annealing* adalah menurunkan kekerasan dan memperbaiki sifat mekanik (Mahmudah *et al.*, 2016).

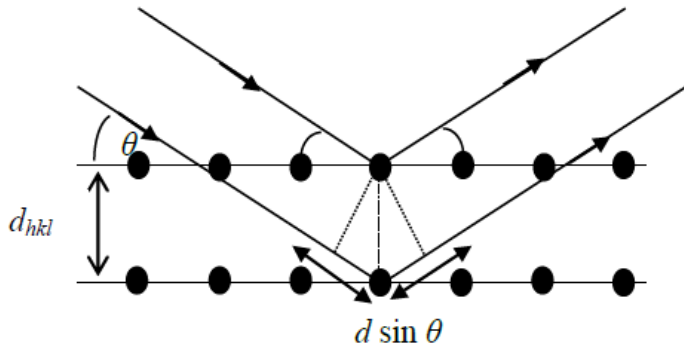
Dalam eksperimen, film yang diberi perlakuan *annealing* ditumbuhkan pada tekanan 500 mTroom, suhu deposisi 300°C dengan waktu deposisi 60 menit. Proses *annealing* dilakukan selama 40 menit dalam *chamber* yang telah divakumkan dengan melakukan variasi suhu 250°C, 350°C, dan 450°C untuk masing-masing sampel. Setelah mencapai suhu yang ditentukan, kemudian mengatur ulang suhu *chamber* hingga suhu ruang sebelum sampel dikeluarkan dari *chamber*. Pompa air dan pompa vakum dimatikan ketika suhu dalam *chamber* sudah turun, dan saluran udara kemudian dibuka. Selanjutnya penutup tabung dibuka dan film tipis yang ditumbuhkan dia atas substrat dilepaskan dari anoda.

3.3 Karakterisasi Film Tipis ZnO:Ga

Sampel film tipis ZnO doping Ga yang diperoleh akan dikarakterisasi sifat fisisnya, baik sebelum maupun setelah dilakukan *annealing*. Karakterisasi yang dilakukan meliputi karakterisasi struktur dan sifat optik.

3.3.1 Karakterisasi Struktur

Struktur kristal dianalisis dengan menggunakan difraksi sinar-X atau *X-ray diffraction* (XRD). Difraksi sinar-X atau *X-ray diffraction* merupakan suatu teknik yang digunakan untuk karakterisasi struktur kristal dan arah bidang orientasi suatu material. Sinar-X adalah radiasi elektromagnetik berenergi tinggi. Gambar 3.3 menunjukkan bahwa seberkas sinar-X dipantulkan dari sehimpunan bidang kristal yang berjarak antara d . Berkas sinar yang dipantulkan dari bidang kedua menempuh jarak $2d \sin \theta$ lebih panjang dari pada berkas yang dipantulkan dari bidang pertama, dengan θ adalah sudut datang yang diukur terhadap permukaan kristal.



Gambar 3.3 Hamburan sinar-X pada kristal

Difraksi akan saling menguatkan jika terpenuhi persamaan Bragg (3.1)

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

Hasil tersebut dikenal sebagai hukum Bragg bagi difraksi sinar-X, dengan d merupakan jarak antar bidang (hkl) untuk sebuah kristal, θ adalah sudut Bragg, λ adalah panjang gelombang radiasi, dan bilangan bulat $n = 1, 2, 3, \dots$

Uji sampel dilakukan dengan XRD *Smartlab Rigaku* dengan radiasi $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.541862 \text{ \AA}$), voltage = 40 kV dan arus = 30 mA. Setiap sinar yang mengenai sampel akan didifraksikan dan ditangkap oleh detektor. Hasil karakterisasi XRD mengandung informasi besaran-besaran yang menggambarkan karakteristik setiap sampel seperti 2θ , jarak antar bidang Bragg (d), intensitas relatif, dan *full width at half maximum* (FWHM).

Struktur morfologi sampel dianalisis dengan menggunakan *Field Emission Scanning Electron Microscope* (FESSEM). FESEM digunakan untuk memvisualisasikan rincian topografi yang sangat kecil di permukaan atau seluruh objek dari benda. FESEM bekerja berdasarkan prinsip *scan* sinar elektron pada permukaan sampel, yang selanjutnya informasi yang didapatkan diubah menjadi gambar. Pada FESEM gambar dibuat berdasarkan deteksi elektron baru (elektron sekunder) atau elektron pantul yang muncul dari permukaan sampel ketika permukaan sampel tersebut discan dengan sinar elektron. Elektron sekunder atau elektron pantul yang terdeteksi selanjutnya diperkuat sinyalnya, kemudian besar amplitudonya ditampilkan dalam gradasi gelap-terang pada layar monitor CRT (*cathode ray tube*). Di layar CRT inilah gambar struktur obyek yang sudah diperbesar dapat diamati.

3.3.2 Karakterisasi Sifat optik

Sifat optik sampel dianalisis dengan menggunakan spektrofotometer Ultraviolet Visible (UV-Vis). Spektrometer UV-Vis merupakan alat karakterisasi untuk yang menghasilkan data berupa spektrum untuk mengetahui nilai transmitansi sehingga didapatkan nilai absorbansi dan *band gap* (celah pita energi). 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 (3.2)

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (3.2)$$

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). Material semikonduktor dengan celah pita energi langsung (*direct band gap*) memiliki hubungan sederhana antara E dan ν , khususnya pada energi foton yang hampir setara dengan nilai celah pita energi semikonduktor.

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 (3.3)

$$T = \frac{I}{I_0} \times 100\% \quad (3.3)$$

Intensitas radiasi berkurang secara eksponensial terhadap ketebalan film sehingga persamaan (3.4) dapat dinyatakan dalam persamaan (3.4)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha b} \quad (3.4)$$

dengan b adalah ketebalan film dan α adalah koefisien absorpsi optik. Berdasarkan data energi cahaya dan besarnya koefisien absorpsi optik dapat ditentukan nilai *bandgap*. Berdasarkan spektrum transmitansi, dapat ditentukan nilai absorpsi film. Setelah mendapatkan nilai absorpsi, kemudian data hasil transmitansi diolah untuk mendapatkan *band gap* film dengan mengetahui tebal film yang ditumbuhkan. Ketebalan film dapat diketahui dengan menggunakan metode *swaneopel*. Dari metode tersebut dapat diketahui tebal film dan koefisien absorpsi, sehingga didapatkan nilai band gap dengan mem-ploting $(ahv)^2$ terhadap hv (Plot Tauc) sehingga dapat ditentukan lebar *band gap* (E_g) film tersebut.

Material semikonduktor dengan celah pita energi langsung (*direct bandgap*) memiliki hubungan dengan energi foton yang hampir setara dengan nilai celah pita energi semikonduktor.

Absorbansi bahan semikonduktor menyebabkan terjadinya eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Pada jangkauan tersebut koefisien absorpsi memenuhi persamaan (3.6)

$$(\alpha h\nu)^2 = C (h\nu - E_g) \quad (3.6)$$

dengan E_g adalah lebar celah pita energi (*band gap*) dan C adalah konstanta yang terkait dengan sifat pita energi. *Band gap* menunjukkan pergerakan elektron dalam melintasi pita valensi menuju pita konduksi (Doyan & Humaini, 2017). Jika suatu material semikonduktor intrinsik diberi energi yang lebih besar daripada nilai *band gap*, maka elektron yang terdapat pada level valensi akan mampu melewati *band gap* untuk menuju pita konduksi (Timuda & Maddu, 2010).

4

STRUKTUR DAN SIFAT OPTIK FILM TIPIS ZnO:Ga

Film tipis ZnO:Ga telah ditumbuhkan di atas substrat corning glass dengan metode DC magnetron sputtering. Film yang telah ditumbuhkan kemudian dikarakterisasi dan dianalisis untuk mengetahui sifat fisisnya. Karakterisasi film tipis ZnO:Ga yang dihasilkan, dilakukan dengan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) dan spektrofometer *Ultraviolet Visible* (UV-Vis).

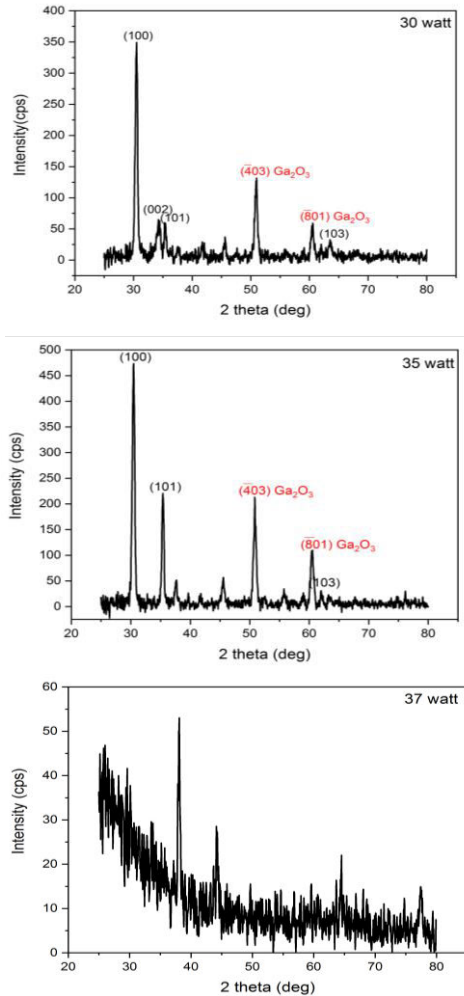
4.1 Pengaruh Daya Plasma

Untuk mengetahui pengaruh daya plasma pada sifat fisis film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan *DC magnetron sputtering*, telah ditumbuhkan film tipis ZnO:Ga dengan parameter deposisi: suhu 300°C, tekanan *chamber* 500 mtorr, waktu deposisi selama 120 menit dan daya plasma masing-masing 30, 35 dan 37 watt. Struktur sampel film tipis yang diperoleh telah dikarakterisasi dengan menggunakan *X-Ray Diffractogram*. Pola difraksi sinar-X pada bidang kristal film tipis ZnO:Ga dengan variasi daya plasma diperlihatkan pada Gambar 4.1. Pola difraksi pada Gambar 4.1, menunjukkan keberagaman

puncak yang terjadi pada film yang terdeposisi. Berdasarkan pola difraksi yang diperoleh, diketahui bahwa film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan pada daya plasma 30 dan 35 watt bersifat polikristalin. Pada sampel film tipis yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 watt teramati puncak dengan sudut $2\theta = 30,51^\circ, 34,41^\circ, 35,52^\circ, \text{ dan } 63,45^\circ$ yang sesuai dengan bidang orientasi *hkl* (100) yang kuat, dan puncak-puncak (002), (101), dan (103) yang lemah. Puncak-puncak orientasi ini menunjukkan tumbuhnya film ZnO pada substrat. Selain puncak-puncak tersebut, muncul pula puncak (403) dan (801) yang merupakan bidang orientasi Ga₂O₃ dengan fase monoklinik – sesuai dengan JCPDS 43-1012. Pola spektrum XRD sampel film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan pada daya plasma 35 watt, menunjukkan hilangnya puncak (002), namun puncak (101) menjadi lebih tinggi intensitasnya, sedangkan puncak-puncak (100) dan (103) relatif tetap.

Seperti halnya pada sampel film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan pada daya plasma 30 watt, pada sampel film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 35 watt juga teramati puncak (403) dan (801). Sebagaimana telah diutarakan, kedua puncak tersebut diduga menunjukkan terbentuknya struktur Ga₂O₃ pada film. Sementara itu, sampel film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 37 watt menunjukkan sifat amorf karena tidak menunjukkan puncak difraksi. Meskipun lemah, kehadiran puncak (002) pada sampel film tipis ZnO:Ga yang dideposisikan pada daya plasma 30 watt memperlihatkan

terbentuknya struktur heksagonal *wurtzite* dengan arah orientasi sumbu-*c* yang tegak lurus pada substrat.



Gambar 4.1 Spektrum XRD film tipis ZnO:Ga dengan variasi daya plasma

Posisi puncak difraksi film tipis dapat digunakan untuk menentukan nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM), jarak antar kekisi (*d-spacing*), *crystal size* dan parameter kekisi *a* dan *c* dari setiap puncak difraksi yang terbentuk. Hasil analisis posisi puncak difraksi film tipis ZnO:Ga dengan variasi daya plasma ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Pada Tabel 4.1 tampak puncak difraksi (100) film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan pada 30 dan 35 watt mengalami pergeseran sudut difraksi dari 30,51 ke 30,44° yang diikuti dengan pelebaran FWHM.

Tabel 4.1 Parameter kekisi film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma yang berbeda

Daya Plasma (watt)	<i>hkl</i>	2θ (°)	<i>d-spacing</i>	FWHM	<i>a</i> (Å)	Konstanta kekisi <i>c</i> (Å)
30	100	30,51	2,928	0,44	3,38328	-
	002	34,41	2,604	0,89	-	5,21267
	101	35,52	2,526	0,33	-	-
35	100	30,44	2,934	0,47	3,39088	-
	002	-	-	-	-	-
	101	35,41	2,533	0,37	--	-
37	-	-	-	-	-	-

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa puncak difraksi (100) film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 watt memiliki nilai *lattice strain* yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan film yang ditumbuhkan dengan daya plasma 35 watt. Penyusutan *crystal size* yang memiliki puncak difraksi (100) dan (101) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.1 pada film ZnO:Ga

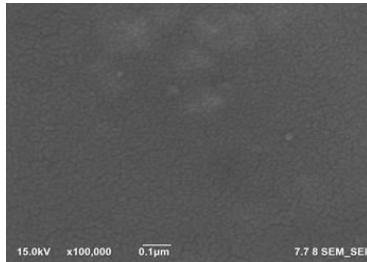
yang ditumbuhkan dengan daya plasma 35 watt diikuti dengan peningkatan nilai *lattice strain* dan lebar garis dislokasi (ρ) (Lihat Tabel 4.1).

Pada daya plasma 35 watt, sudut difraksi puncak bidang (100) dan (101) bergeser ke kiri (semakin kecil). Pergeseran sudut difraksi juga meningkatkan nilai FWHM pada daya plasma 35 watt. Hal ini sesuai dengan hasil eksperimen sebelumnya yang menunjukkan bahwa nilai FWHM semakin besar ketika daya plasma dinaikkan (Sugianto *et al.*, 2010). Nilai *d-spacing* dan konstanta kisi α dari film tipis ZnO:Ga juga mengalami peningkatan ketika digunakan daya plasma 35 watt.

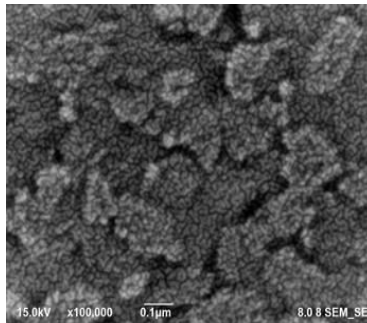
Tabel 4.3 *Lattice strain, crystal size, kerapatan dislokasi* dari puncak difraksi (100) dan (101) film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 dan 35 watt

Daya plasma (watt)	<i>hkl</i>	<i>lattice strain</i> (%)	<i>crystal size</i> (nm)	ρ ($\frac{\text{garis}}{\text{m}^2}$)
30	100	0,007040	18,72995	$4,45 \times 10^{15}$
	101	0,004496	17,60643	$2,44 \times 10^{15}$
35	100	0,007506	25,29901	$5,03 \times 10^{15}$
	101	0,005057	22,55706	$3,07 \times 10^{15}$

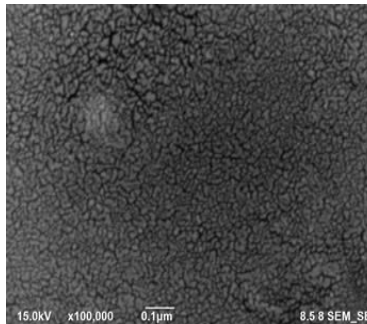
Karakterisasi dengan *field emission scanning electron microscopy* (FESEM) dilakukan untuk mengetahui pengaruh daya plasma terhadap morfologi permukaan film tipis ZnO:Ga. Hasil FESEM film tipis ZnO:Ga dengan variasi daya plasma ditunjukkan



(a) 30 watt



(a) 35 watt



(c) 37 watt

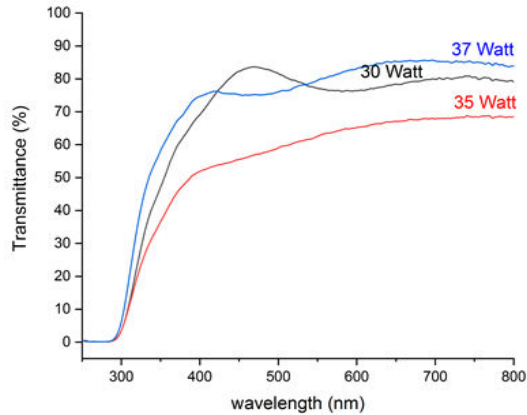
Gambar 4.3 Struktur morfologi film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma yang berbeda yang diobservasi dengan FESEM

pada Gambar 4.3. Film yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 watt mempunyai ukuran butiran (*grain*) yang relatif kecil dan rapat dengan jejari ~ 20 nm (Gambar 4.3a). Butiran-butiran tersebut teraglomerasi membentuk *cluster-cluster* yang terlihat menonjol dan tebal dengan jejari $\sim 200 - 300$ nm, sehingga morfologinya tampak kasar ketika daya plasma ditingkatkan menjadi 35 watt (Gambar 4.3b). Namun demikian, *cluster-cluster* tersebut menghilang dan menjadi butiran-butiran yang relatif jauh lebih kecil pada film yang ditumbuhkan pada daya plasma 30 watt. Tampak dari Gambar 4.3c, bahwa film tipis yang ditumbuhkan dengan daya plasma 37 watt mempunyai struktur yang lebih renggang dan menonjol.

Transmitansi film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan variasi daya plasma sebagai fungsi panjang gelombang dalam range antara 200–1000 nm telah diukur dengan menggunakan spektrofotometer UV-vis. Spektrum transmitansi film tipis yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30, 35 dan 37 watt diperlihatkan pada Gambar 4.4. Pola spektrum menunjukkan bahwa daya plasma berpengaruh pada transmitansi film tipis ZnO:Ga.

Pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa film tipis ZnO:Ga yang dideposisikan dengan daya plasma 30 watt mempunyai transmitansi $\sim 80\%$. Transmitansi film tipis ZnO:Ga yang dideposisikan dengan daya plasma 35 watt menurun menjadi 68%. Namun demikian, transmitansi film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 37 watt meningkat kembali menjadi 86%. Rendahnya transmitansi pada film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya

plasma 35 watt terjadi karena film tersebut memiliki struktur permukaan yang kasar sebagaimana tampak pada hasil observasi dengan FESEM (Gambar 4.3).



Gambar 4.4 Grafik transmitansi film tipis ZnO:Ga variasi daya plasma

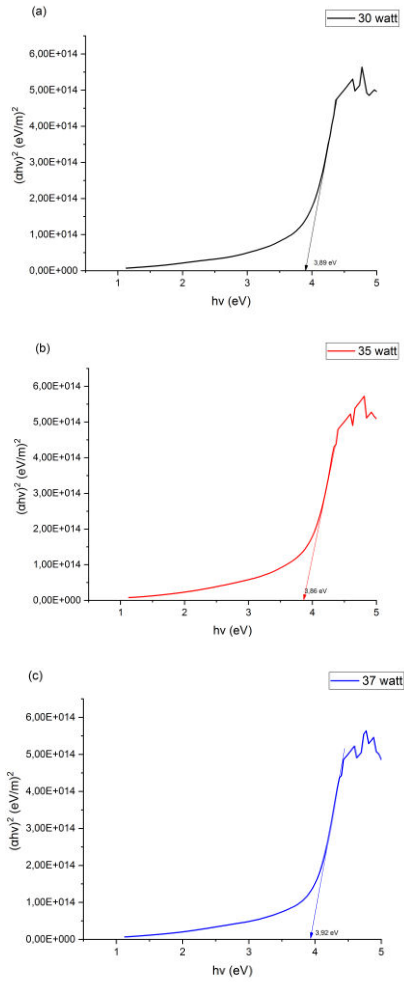
Energi *band gap* (E_g) film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan variasi daya plasma diperlihatkan pada Gambar 4.5. Nilai E_g diperoleh dengan menggunakan plot *Tauc*, yaitu melakukan plotting α^2 terhadap $h\nu$, kemudian mengekstrapolasi kurva plotting tersebut, dengan α adalah koefisien absorpsi dan $h\nu$ adalah energi foton, kemudian mengekstrapolasi kurva plotting tersebut. Perpotongan garis lurus hasil ekstrapolasi dengan sumbu energi menghasilkan energi *band gap* film tipis ZnO:Ga yang dideposisikan. Plot *Tauc* yang diperoleh dari hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 4.5. Ketebalan fil tipis ZnO:Ga yang dideposisikan ditentukan dengan

menggunakan metode *Swaneopoel*. Ketebalan film dan energi gap dari film tipis ZnO:Ga ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Ketebalan film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan variasi daya plasma

Variasi daya plasma (watt)	Ketebalan Film (nm)	<i>Band gap</i> (eV)
30	323,568	3,89
35	771,190	3,86
37	493,347	3,92

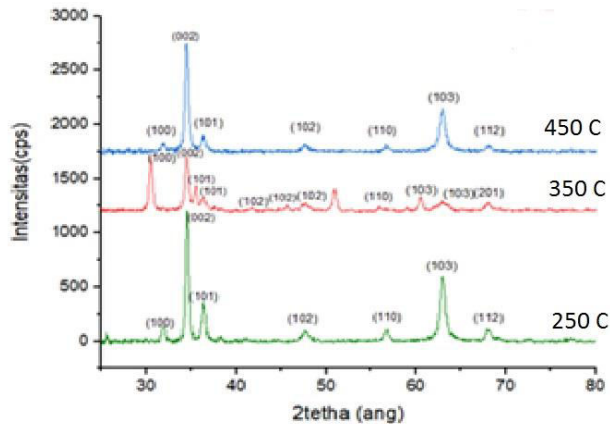
Tabel 4.4 memperlihatkan bahwa ketebalan film tipis ZnO:Ga meningkat dari 323,568 nm menjadi 771,190 nm ketika daya plasma ditingkatkan dari 30 watt menjadi 35 watt. Peningkatan ketebalan film ini sesuai dengan hasil observasi FESEM, bahwa film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 35 watt tampak lebih tebal dibandingkan dengan film yang ditumbuhkan dengan daya 30 watt (Gambar 4.3). Meskipun tidak signifikan, berdasarkan Gambar 4.5 dan Tabel 4.4 dapat diketahui bahwa ketebalan film diikuti oleh berkurangnya nilai *band gap* dari 3,89 eV menjadi 3,86 eV dan *band gap* meningkat kembali secara signifikan (3,92 eV) ketika daya plasma 37 watt. Penurunan nilai band gap akibat bertambahnya ketebalan film juga telah dilaporkan (Yu *et al.* 2005a).



Gambar 4.5 *Band gap* film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan variasi daya plasma

4.2 Pengaruh Suhu *Annealing*

Untuk mengetahui pengaruh suhu *annealing* pada sifat fisis film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan *DC magnetron sputtering*, telah ditumbuhkan film tipis ZnO:Ga dengan parameter deposisi: suhu 300°C, tekanan *chamber* 500 mtorr, daya plasma 30 watt dengan waktu deposisi selama 60 menit. Proses *annealing* dilakukan masing-masing pada suhu 250, 350 dan 450°C.



Gambar 4.6 Spektrum XRD Film Tipis ZnO:Ga Variasi Suhu *Annealing*

Struktur film tipis ZnO:Ga telah dianalisis dengan menggunakan X-Ray Difraktogram. Pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa film ZnO:Ga yang diberikan *annealing* mempunyai struktur yang berbeda dengan film ZnO:Ga yang ditumbuhkan tanpa *annealing* (Gambar 4.1). Pola difraksi film tipis ZnO:Ga yang diberi

annealing memiliki puncak difraksi yang dominan pada orientasi *hkl* bidang (002). Hal ini menunjukkan bahwa film tipis yang diberi *annealing* mempunyai struktur heksagonal *wurtzite* dengan arah pertumbuhan dalam arah sumbu *c*. Selain puncak (002) film tipis ZnO:Ga yang diberi *annealing* masih menunjukkan puncak (100), (101), (102), (103), dan (112). Hal ini menunjukkan bahwa film tipis ZnO:Ga mempunyai struktur polikristal.

Intensitas puncak (002) tertinggi diperoleh pada suhu *annealing* 250°C pada sudut $2\theta = 34,56^\circ$. Intensitas puncak (002) pada sudut $2\theta = 34,50^\circ$ menurun secara signifikan ketika suhu *annealing* ditingkatkan pada suhu 350°C, dan meningkat kembali secara signifikan pada sudut $2\theta = 34,43^\circ$ ketika diberikan suhu *annealing* 450°C. Pola-pola difraksi tersebut memberikan informasi data parameter kekisi seperti ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil analisis posisi puncak difraksi XRD film tipis ZnO:Ga dengan variasi suhu *annealing*

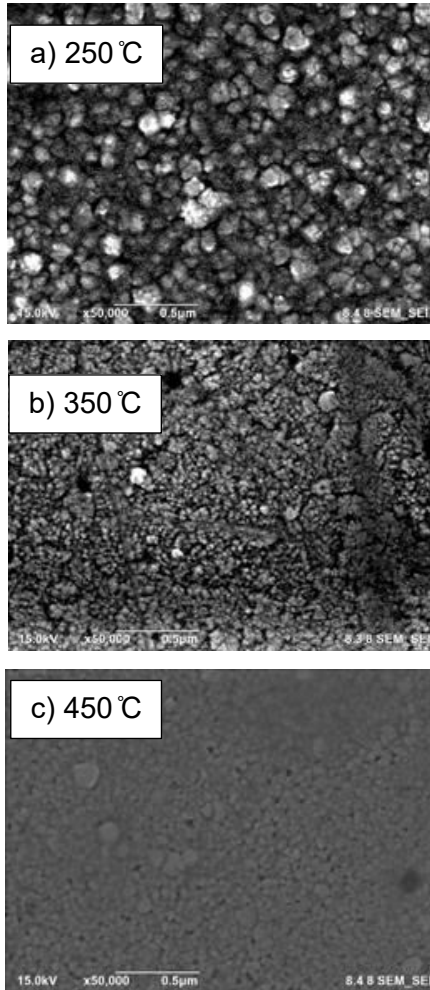
Suhu <i>annealing</i> (°C)	2θ (°)	FWHM (°)	Intensitas puncak (cps)	<i>d-spacing</i> (Å)	Konstanta kekisi <i>c</i> (Å)
250	34,56	0,407	1194,8	2,597	5,1907
350	34,50	0,459	516,15	2,601	5,1995
450	34,43	0,432	1002,0	2,603	5,2103

Tabel 4.5 *Crystal size, lattice strain, lattice stress* dan kerapatan dislokasi film tipis ZnO:Ga dengan variasi *annealing*

Suhu annealing (°C)	<i>Crystal size</i> (nm)	<i>lattice strain</i> (%)	<i>lattice stress</i> (Gpa)	Kerapatan dislokasi ρ ($\frac{\text{garis}}{\text{m}^2}$)
250	65,76	0,005709	-1,33012	$1,16 \times 10^{15}$
350	58,00	0,006450	-1,50284	$1,47 \times 10^{15}$
450	62,19	0,006084	-1,41767	$1,30 \times 10^{15}$

Tabel 4.4 memperlihatkan bahwa film tipis ZnO:Ga yang diberikan suhu *annealing* 250 °C, 350 °C dan 450 °C menunjukkan peningkatan nilai *d-spacing* dan parameter kekisi-*c*. FWHM film mengalami pelebaran ketika suhu *annealing* dinaikkan dari 250 °C menjadi 350 °C, namun FWHM kembali menyusut ketika suhu *annealing* 450 °C. Nilai FWHM tersebut berpengaruh terhadap *crystal size*, regangan kisi/*lattice strain* (ϵ), *lattice stress* (σ) dan kerapatan dislokasi (ρ) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.5. Film tipis ZnO:Ga mengalami penyusutan *crystal size* ketika diberi *annealing* pada suhu 250 °C, 350 °C dan 450 °C.

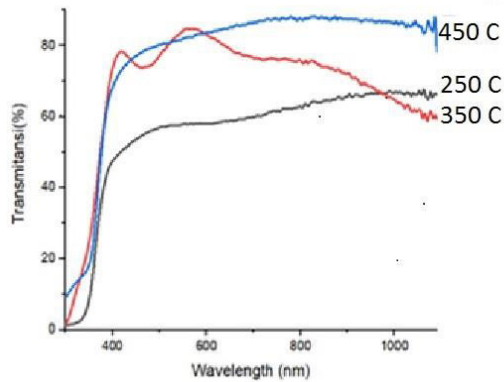
Karakterisasi FESEM pada film tipis dengan variasi *annealing* ditunjukkan pada Gambar 4.7. *Grain size* film tipis ZnO:Ga yang diberikan *annealing* pada suhu 450 °C tampak lebih kecil dengan struktur yang rapat dibandingkan dengan *grain size* pada film yang diberikan suhu *annealing* yang lain. Tampak bahwa film yang diberikan suhu *annealing* 250 °C memiliki ukuran *grain size* yang terlihat relative paling besar (~ 100 nm) dengan struktur yang kurang



Gambar 4.7 Hasil FESEM film tipis ZnO:Ga dengan variasi suhu annealing

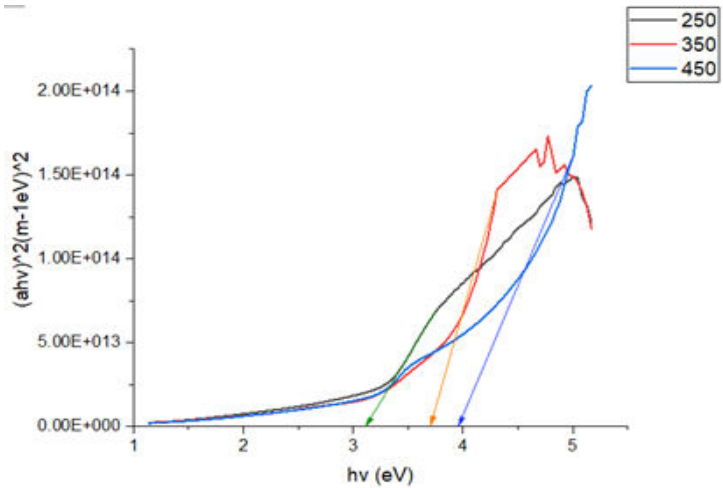
homogen dibandingkan film dengan suhu *annealing* 350 °C dan 450 °C. Selain itu, pada film ZnO:Ga yang diberikan *annealing* pada suhu 250°C memiliki permukaan dengan banyak *void* yang cukup besar.

Sifat optik film tipis ZnO:Ga dengan variasi suhu *annealing* ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dapat dilihat pada Gambar 4.6 bahwa transmitansi meningkat dari ~60% hingga lebih dari 80% pada rentang panjang gelombang 400 – 500 nm ketika suhu ditingkatkan dari 250, 350 dan 450°C. Film tipis ZnO:Ga dengan suhu *annealing* 250°C mencapai transmitansi 61,6% pada cahaya tampak di panjang gelombang 742 nm. Transmitansi tertinggi film tersebut mencapai 67,8% pada panjang gelombang 1062 nm (cahaya inframerah). Film tipis ZnO:Ga dengan suhu *annealing* 350°C mencapai transmitansi ~ 84,9% pada panjang gelombang 560 nm. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kurva transmitansi tertinggi 88,2% diperoleh pada film tipis ZnO:Ga dengan suhu *annealing* 450°C di daerah 830 nm (cahaya inframerah), sedangkan pada cahaya tampak 742 nm mencapai transmitansi hingga 87,4%. Berdasarkan hasil eksperimen, dapat ditentukan ketebalan film ZnO:Ga yang diberikan suhu *annealing* 350°C sebesar 583 nm dengan menggunakan metode *Swaneopoel*.



Gambar 4.6 Transmittansi Optik Film Tipis ZnO:Ga dengan variasi suhu *annealing*

Telah diutarakan sebelumnya, bahwa dari spektrum transmittansi sebagai fungsi panjang gelombang sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6 dapat diperoleh spektrum absorbansi film. *Band gap* dapat diperoleh dengan menggunakan plot $Tauc$ sebagaimana telah diutarakan di depan. Gambar 4.7 menunjukkan grafik energi gap yang didapat dari hasil plot $(ahv)^2$ terhadap hv . Grafik tersebut menunjukkan peningkatan energi gap ketika suhu *annealing* ditingkatkan. Energi gap pada suhu *annealing* 250°C, 350°C dan 450°C masing-masing berturut-turut 3,12 eV, 3,69 eV dan 3,94 eV.



Gambar 4.7 *Band gap* Film Tipis ZnO:Ga dengan Variasi Suhu *Annealing*

4.2 Pembahasan

Hasil karakterisasi yang dilakukan menunjukkan bahwa film tipis ZnO:Ga telah terdeposisi pada permukaan substrat *corning glass* dengan variasi daya plasma. Peningkatan intensitas puncak difraksi bidang (100) dan (101) pada daya plasma 35 watt menunjukkan banyaknya bidang pemantul pada orientasi *hkl* (Sugianto *et al.*,2017). Intensitas puncak yang relatif tinggi dihasilkan ketika terjadi interferensi konstruktif. Intensitas puncak bidang (002) yang relatif rendah dibanding intensitas puncak bidang (100) dan (101) pada film yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 dan 35 watt menunjukkan bahwa film yang tumbuh cenderung memiliki arah orientasi sepanjang sumbu-*a*. Hasil-hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan *dc magnetron*

sputtering memiliki struktur wurtzite heksagonal dengan arah orientasi sepanjang sumbu c yang tegak lurus substrat (Marwoto *et al.*, 2014; Marwoto *et al.*, 2016a; Marwoto *et al.*, 2016b; Sulhadi *et al.*, 2017). Hasil yang sama juga dilaporkan oleh Sim *et al.* (2010) dan para peneliti lainnya.

Pelemahan intensitas puncak (002) diduga terjadi karena film ditumbuhkan pada waktu yang cukup lama (120 menit). Pada waktu tertentu (< 120 menit), film yang telah terdeposisi mengalami proses *re-sputtering*, sehingga molekul-molekul ZnO maupun atom-atom Zn terlepas dari film tipis ZnO:Ga yang telah terbentuk. Massa atom Zn relatif lebih kecil dibandingkan dengan massa atom Ga, sehingga atom-atom Zn relatif lebih mudah terlepas dari film. Hal ini menyebabkan atom-atom Ga menjadi dominan sehingga menghasilkan fase β -Ga₂O₃ pada film yang dihasilkan. Hal ini didukung oleh fakta dengan kehadiran puncak-puncak (403), (801), dan (402) dengan intensitas cukup tinggi, yang diduga disebabkan oleh konsentrasi ion Ga³⁺ yang tinggi pada film tipis ZnO:Ga yang terbentuk. Puncak (403) yang muncul pada spektrum XRD dapat menunjukkan terbentuknya fase β -Ga₂O₃ pada film. Puncak (402) yang menunjukkan fase β -Ga₂O₃ dari film tipis Ga₂O₃ yang ditumbuhkan dengan *rf sputtering* telah dilaporkan oleh Kalygina *et al.* (2019). Demikian juga Goyal *et al.* (2014) juga memperoleh terbentuknya puncak (400) dan (401) dari fase β -Ga₂O₃ pada film tipis yang ditumbuhkan dengan metode *Pulse Laser Deposition* (PLD). Sampel film tipis ZnO:Ga dengan daya plasma 30 watt mempunyai

morfologi yang lebih rata dengan butiran yang kecil. Kondisi ini dikarenakan atom-atom atau molekul-molekul yang mengalami proses *sputtering* memiliki energi kinetik yang relatif lebih rendah dan menumbuk substrat secara kontinu yang diimbangi dengan terlepasnya sebagian atom dari permukaan substrat (Wibowo *et al.*, 2013). Hasil perhitungan dengan metode *swaneopoel* telah diperoleh bahwa film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 watt mempunyai ketebalan sebesar 323,568 nm.

Hilangnya puncak (002) pada sampel yang ditumbuhkan pada daya plasma 35 watt menunjukkan bahwa peningkatan daya plasma telah menyebabkan rusaknya struktur *wurzite* dengan arah orientasi sumbu-*c* yang tegak lurus kristal. Menurut Ma *et al.* (2007), energi yang cukup besar menyebabkan arah orientasi pertumbuhan kristal berubah dan menyebabkan menurunnya kristalinitas film ZnO:Ga yang terdeposisi. Tumbukan antara partikel dengan substrat atau tumbukan antar partikel berenergi tinggi diduga dapat menyebabkan terputusnya ikatan Zn-O maupun Ga-O sehingga orientasi kristal dalam bidang (002) menjadi rusak. Namun demikian, kerusakan struktur (002) justru diikuti dengan penguatan intensitas puncak orientasi (100) dan (101). Munculnya orientasi bidang (100) dan (101) juga dilaporkan oleh Rakhsani (2005) pada film ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan metode *chemical solution deposition*.

Peningkatan daya plasma dari 30 menjadi 35 watt menyebabkan peningkatan *d-spacing* film tipis ZnO:Ga pada orientasi (100) dan (101), yang menunjukkan terjadinya pelebaran kekisi kristal. Akibat

dari pelebaran kekisi, terjadi peningkatan *lattice strain* (peregangan kekisi) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.3. Daya plasma yang tinggi juga dapat menyebabkan terputusnya ikatan antar atom dalam film sehingga menurunkan kualitas kristal (Marwoto *et al.*, 2010). Daya plasma yang tinggi akan meningkatkan mobilitas ion-ion yang ter-*sputter* sehingga laju penumbuhan meningkat, namun cenderung menghasilkan kristal yang kurang homogen dan menghasilkan film dengan struktur polikristalin (Sugianto *et al.*, 2010).

Peningkatan daya plasma dari 30 menjadi 35 watt menyebabkan terjadinya peningkatan *crystal size* dan peningkatan kerapatan dislokasi. Besarnya kerapatan dislokasi menyatakan banyaknya *defect* pada suatu kristal. Semakin kecil nilai kerapatan dislokasi, maka semakin sempurna suatu kristal dalam menempati kisi pada susunan kristal tersebut (Ivanova *et al.*, 2010). Peningkatan kerapatan dislokasi pada film yang ditumbuhkan dengan daya plasma 35 watt menunjukkan peningkatan kecacatan pada film. Pada daya plasma yang lebih tinggi, molekul-molekul, atom-atom maupun ion-ion yang menumbuk substrat memiliki energi yang cukup untuk meningkatkan *crystal size*. Namun sebaliknya, energi ion Ar^+ yang lebih tinggi dapat mengakibatkan terputusnya ikatan Zn-O dan Ga-O sehingga meningkatkan pembentukan ion-ion Zn^{2+} dan Ga^{3+} pada proses *sputtering*. Telepasnya atom-atom oksigen pada film menyebabkan terjadinya peningkatan kecacatan. Selain itu, terbentuknya ion-ion tersebut menyebabkan resultan gaya tolak antar ion positif menjadi

bertambah besar. Hal ini memberikan kontribusi pada peningkatan peregangan antar kekisi, sehingga *lattice strain* meningkat. Peningkatan *lattice strain* menyebabkan film tampak lebih tebal dibandingkan dengan film ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 watt, sebagaimana ditunjukkan pada hasil observasi dengan FESEM. Berdasarkan hasil perhitungan dengan metode *swaneopoe*, telah diperoleh bahwa film tipis ZnO yang ditumbuhkan dengan daya plasma 35 watt memiliki ketebalan 771,190 nm. Pada daya plasma 35 watt, film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan mempunyai ukuran butir lebih besar. Hal ini terjadi karena penambahan daya plasma ketika deposisi menyebabkan bertambahnya energi kinetik dan momentum atom-atom target yang menuju substrat, sehingga meningkatkan mobilitas permukaan. Mobilitas permukaan yang tinggi dapat menyebabkan terbentuknya lapisan tipis dengan ukuran butiran lebih besar (Sugianto *et al.*, 2010).

Sampel film tipis ZnO:Ga dengan daya plasma 37 watt menunjukkan struktur film yang bersifat amorf. Hal ini kemungkinan terjadi karena peningkatan daya plasma yang tinggi mengakibatkan peningkatan energi dan jumlah ion Ar⁺, sehingga semakin banyak atom oksigen yang terlepas dari Zn maupun Ga ketika ion-ion menumbuk molekul-molekul ZnO dan Ga₂O₃. Tumbukan tersebut dapat terjadi pada target, molekul-molekul yang menuju substrat, maupun pada film yang telah terdeposisi. Hal ini berakibat pada rusaknya struktur film, sehingga film ZnO:Ga yang terdeposisi menjadi berstruktur amorf. Daya plasma yang tinggi mengakibatkan

film yang telah terdeposisi dapat mengalami proses *resputtering* sehingga ketebalan film menjadi berkurang sebagaimana ditunjukkan hasil karakterisasi dengan FESEM. Film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 37 watt mempunyai ketebalan 493,347 nm yang ditentukan dengan metode *swaneopel*. Pada permukaan film terdapat *void* yang kemungkinan diakibatkan oleh tumbukan antar partikel bertenaga tinggi, khususnya ion Ar dalam plasma karena tumbukan antara ion Ar^+ dan partikel yang tersputter menyebabkan atom oksigen dapat dilepaskan dari ikatan Zn-O atau Ga-O (Marwoto *et al.*, 2016).

Karakterisasi dengan menggunakan spektrofotometer pada film tipis ZnO:Ga dengan daya plasma yang ditingkatkan dari 30 menjadi 35 watt menunjukkan penurunan transmitansi dari 88% menjadi 68% yang disebabkan oleh bertambahnya ketebalan film sebagaimana dilaporkan oleh Aly dan Akl (2015), bahwa nilai transmitansi semakin berkurang dengan penambahan tebal film. Hal ini terjadi karena semakin tebal lapisan yang terbentuk, akan meningkatkan jumlah molekul yang terlibat dalam penyerapan energi cahaya yang diberikan, sehingga fraksi energi yang dapat dilewatkan akan berkurang yang berakibat semakin kecil nilai transmitansinya (Timuda & Maddu, 2010). Transmitansi film tipis ZnO:Ga meningkat menjadi 86% ketika daya plasma ditingkatkan menjadi 37 watt. Hal ini sesuai dengan morfologi permukaan film yang menunjukkan bahwa film yang ditumbuhkan dengan daya plasma 37 watt relatif

lebih rata dan lebih rapat sehingga transmitansinya mengalami peningkatan.

Celah pita film tipis dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti: cacat struktural, ukuran kristal, dan regangan kisi (Ivanova *et al.*, 2017). Film tipis ZnO:Ga mengalami penurunan energi gap dari 3,89 eV menjadi 3,86 eV ketika daya plasma ditingkatkan dari 30 watt menjadi 35 watt. Penurunan energi *gap* ini terjadi karena kurva transmitansi film ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 35 watt mengalami *redshift* (pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih besar) dari kurva transmitansi film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 watt. Film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 37 watt mengalami peningkatan energi *gap* dengan *band gap* 3,92 eV. Hal ini terjadi karena kurva transmitansi film tipis ZnO:Ga dengan daya plasma 37 watt bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih kecil (*blueshift*) atau memiliki nilai absorpsi yang kecil dari kurva transmitansi film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 dan 35 watt. Nilai absorpsi kecil ini disebut *absorbtion tail* yang umumnya disebabkan oleh hadirnya fraksi amorf pada lapisan dan atau hadirnya unsur-unsur pengotor (*impurity*) (Saragih *et al.*, 2010). Nilai energi gap dari film ZnO:Ga ini lebih besar dari celah pita ZnO murni yaitu 3,37 eV (Ivanova *et al.*, 2015).

Film tipis ZnO:Ga yang diberi variasi suhu *annealing* juga menunjukkan struktur polikristalin dengan puncak difraksi yang dominan pada orientasi *hkl* bidang (002). Orientasi bidang tersebut

menunjukkan kristal berbentuk heksagonal *wurtzite* yang tumbuh pada sumbu-*c* (Sulhadi *et al.*, 2015). Struktur kristal dengan orientasi (002) ini sesuai dengan hasil-hasil penelitian sebelumnya. Hasil ini menunjukkan bahwa proses *annealing* telah mengubah orientasi kristal dari arah sumbu-*a* ke arah sumbu-*c*. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa pada suhu tertentu atom-atom yang telah terdeposisi mengalami rekristalisasi yang menyebabkan atom-atom yang terdislokasi memiliki peluang untuk tersusun kembali pada keadaan suhu tertentu menjadi film tipis yang lebih rata atau homogen (Sugianto *et. al.*, 2017).

Pemberian suhu *annealing* dari 250, 350 dan 450 °C pada film tipis ZnO:Ga mengakibatkan *d-spacing* mengembang sesuai dengan peningkatan suhu *annealing*. Namun demikian, *crystal size* film menyusut dari ~66 nm menjadi ~58 nm ketika suhu *annealing* ditambah dari 250 menjadi 350 °C, dan *crystal size* menjadi ~62 nm ketika suhu *annealing* ditingkatkan menjadi 450 °C. Telah diperoleh bahwa *crystal size* berbanding lurus dengan tegangan kekisi (*stress*). Hal ini terjadi karena peningkatan *crystal size* menyebabkan jarak antar bidang atom (*d-spacing*) menjadi lebih pendek sehingga kekisi menjadi lebih rapat atau tegang (*stress*).

Berdasarkan data FWHM, tampak bahwa pemberian suhu *annealing* 350 °C berakibat pada penurunan kualitas kristal film ZnO:Ga. Namun, kualitas kristal meningkat kembali ketika suhu *annealing* ditingkatkan menjadi 450 °C.

Karakterisasi FESEM pada film tipis ZnO:Ga dengan suhu *annealing* 250°C memiliki *grain size* atau ukuran butir relatif lebih besar dibandingkan dengan film tipis ZnO:Ga yang diberikan suhu *annealing* yang lain. Hal ini menunjukkan, bahwa pada suhu *annealing* tersebut terdapat energi termal yang menyebabkan adanya proses difusi atom, sehingga dapat menghasilkan kualitas film yang relatif lebih baik. Pada suhu *annealing* 350°C terbentuk *void* yang kemungkinan disebabkan oleh aktivitas oksigen yang lepas dari ikatan Zn-O akibat aktivitas termal.

Berdasarkan eksperimen dapat dikatakan bahwa peningkatan suhu *annealing* menyebabkan peningkatan transmitansi film tipis ZnO:Ga. Transmitansi terendah diperoleh pada suhu *annealing* 250°C. Menurut Muchuwani (2018), transmitansi yang rendah disebabkan oleh permukaan film yang tidak rata atau tidak homogen sehingga banyak bidang pemantul yang menyebabkan sinar datang lebih banyak yang tereflektasikan dan sedikit yang ditransmisikan. Transmitansi yang rendah tersebut kemungkinan disebabkan proses oksidasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transmitansi meningkat ketika suhu *annealing* ditingkatkan. Telah diperoleh bahwa film tipis ZnO:Ga yang diberikan *annealing* pada suhu 450°C mempunyai transmittansi yang tinggi (~88,2%). Film tipis ZnO:Ga dengan transmitansi yang relatif tinggi ini dapat diaplikasikan untuk sel surya (Parthiban *et.al.*, 2009).

Film tipis ZnO:Ga yang diberi suhu *annealing* 250°C, 350°C dan 450°C masing-masing berturut-turut mempunyai energi gap sebesar

3,12 eV, 3,69 eV dan 3,94 eV. Pelebaran celah pita (*band gap*) berbanding lurus dengan suhu *annealing*, yaitu nilai *band gap* semakin lebar dengan kenaikan suhu *annealing*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa *band gap* film tipis ZnO:Ga paling lebar diperoleh dari film dengan suhu *annealing* 450 °C yang juga memiliki nilai transmitansi paling tinggi. Tapi penyerapan suhu *annealing* 450 °C memiliki bentuk paling curam dibandingkan dengan yang lainnya. Tapi penyerapan yang lebih curam menunjukkan permukaan film tipis yang lebih halus (Yu *et al.*, 2005). Tapi penyerapan juga bergeser ke kiri atau menjauhi gelombang inframerah sesuai dengan kenaikan suhu *annealing* yang disebabkan adanya pelebaran celah pita (*band gap*). Pelebaran *band gap* dan peningkatan transmitansi ketika suhu *annealing* ditingkatkan, menunjukkan bahwa proses *annealing* merupakan kondisi re-kristalisasi. Film tipis ZnO dengan bidang orientasi (002) biasanya digunakan untuk aplikasi *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) berbasis nanopartikel ZnO sebagai *windows layer* sel surya.

5

PENUTUP

Pengaruh daya plasma pada pada struktur dan sifat optik film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan metode *DC magnetron sputtering* telah dipelajari. Film tipis ZnO:Ga ditumbuhkan di atas substrat kaca *corning* pada temperatur 300 °C, tekanan argon 500 mTorr, dan waktu penumbuhan 120 menit dengan variasi daya plasma 30, 35 dan 37 watt. Karakterisasi struktur kristal dengan XRD menunjukkan bahwa film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan mempunyai struktur polikristalin. Dari seluruh sampel, hanya film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 watt yang menunjukkan puncak (002). Meskipun lemah, kehadiran puncak (002) pada sampel film tipis ZnO:Ga yang dideposisikan pada daya plasma 30 watt memperlihatkan terbentuknya struktur heksagonal *wurtzite* dengan arah orientasi sumbu-*c* yang tegak lurus pada substrat. Pengaruh daya plasma terhadap morfologi permukaan film tipis ZnO:Ga telah dianalisis dengan FESEM. Hasil analisis dengan FESEM menunjukkan bahwa film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 watt memiliki permukaan yang relatif lebih rata dibanding film yang ditumbuhkan dengan daya plasma 35 dan 37 watt. Hasil karakterisasi sifat optik film tipis ZnO:Ga dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis menunjukkan bahwa

film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30 watt mempunyai transmitansi optimum $\sim 85\%$ pada rentang panjang gelombang antara 400 – 500 nm. Film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan daya plasma 30, 35 dan 37 watt masing-masing mempunyai *band gap* sebesar 3,89 eV, 3,86 eV, dan 3,92 eV.

Pengaruh suhu *annealing* pada struktur dan sifat optik film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan dengan metode *DC magnetron sputtering* juga telah dipelajari. Film tipis ZnO:Ga yang ditumbuhkan di atas substrat di atas *corning glass* dengan temperatur 300 °C, tekanan argon 500 mTorr, dan waktu penumbuhan 60 menit telah diberikan perlakuan *annealing* masing-masing pada suhu 250°C, 350°C dan 450°C. Pola spektrum XRD yang diperoleh menunjukkan bahwa seluruh film ZnO:Ga telah mengalami proses rekristalisasi struktur dan bersifat polikristalin dengan intensitas puncak yang dominan pada (002). Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh film mempunyai struktur heksagonal *wurtzite* dengan arah orientasi sumbu-*c* yang tegak lurus pada substrat. Intensitas puncak (002) optimum dan FWHM minimum diperoleh pada film ZnO:Ga yang diberikan suhu *annealing* 250°C. Karakterisasi struktur morfologi dengan FESEM memperlihatkan bahwa film tipis ZnO:Ga yang diberikan *annealing* pada suhu 250°C memiliki *grain size* atau ukuran butir paling besar dibandingkan dengan film tipis ZnO:Ga yang diberikan *annealing* 350 dan 450°C. Film tipis ZnO:Ga yang diberi *annealing* 450°C mempunyai struktur morfologi yang rapat dan homogin. Analisis dengan spektrofotometer UV-Vis menunjukkan bahwa nilai

transmitansi 88,2% diperoleh dari film tipis ZnO:Ga yang diberi *annealing* pada suhu 450°C. Energi gap pada suhu *annealing* 250°C, 350°C dan 450°C masing-masing berturut-turut 3,12 eV, 3,69 eV dan 3,94 eV. Film tipis ZnO:Ga dengan transmitansi yang relatif tinggi ini berpotensi diaplikasikan untuk sel surya sebagai *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) sebagai *windows layer* sel surya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aly, S. A. and A. A. Akl. (2015) "Influence of Film Thickness on Optical Absorption and 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, and S. Grigoryan. (2016) "ZnO Film Deposition by DC Magnetron Sputtering: Effect of Target Configuration on the Film Properties." *Thin Solid Films* 612.
- Aryanto, D., W. N. Jannah, Masturi, T. Sudiro, A. S. Wismogroho, P. Sebayang, Sugianto, and P. Marwoto. (2017) "Preparation and Structural Characterization of ZnO Thin Films by Sol-Gel Method." *Journal of Physics Conference Series* 817:12025.
- Assuncao, V., E. Fortunato, A. Marques, H. Aguas, I. Ferreira, M. E. V. Costa, and R. Martins. 2003. "Influence of the Deposition Pressure on the Properties of Transparent and Conductive ZnO : Ga Thin-Film Produced by R.f. Sputtering at Room Temperature." *Thin Solid Films* 427:401–5.
- Astuti, B., Sugianto, I Maftuchah, N. A. Firmahaya, P. Marwoto, F.D. Ratnasari, R.Muttaqin, N.E.Setyaningsih, D. Aryanto and Isnaeni (2019). "Photoluminescence study of ZnO:Al thin films with different power plasma". *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1321. 022009.
- Cheong, K. Y., N. Muti, and S. R. Ramanan (2002) "Electrical and Optical Studies of ZnO:Ga Thin Films Fabricated via the Sol-Gel Technique." *Thin Solid Films* 410:142–46.
- Doyan, A. and Humaini (2017) "Sifat Optik Lapisan Tipis ZnO." *Jurnal Pendidikan Fisika Dan Teknologi* III:34–39.
- Fang, L., K. Zhou, F. Wu, Q. L. Huang, X. F. Yang, and C. Y. Kong (2010) "Effect of Ga Doping Concentration on Electrical and Optical Properties of Nano-ZnO:Ga Transparent Conductive Films." *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 23:885–88.
- Fang, D., LinSahoo, K., Xue, T., Cui, C., Chen, X., Yao, P., & Li, H. (2014) Influence of Al doping on structural and optical properties of Mg–Al co-doped ZnO thin films prepared by sol–gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 589, 346–352.
- Goyal A., Brajesh S. Y., O. P. Thakur, A. K. Kapoor (2014) "Structural and Optical Characterization of β -Ga₂O₃ Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition". *Physics of Semiconductor Devices* pp 77-80

- Gromov, D. G., Koz'min, A. M., Shulyat'ev, A. S., Polomoshnov, S. A., Bogolyubova, D. N., & Shamanaev, S. V. (2013) "Effect of the formation conditions on the properties of ZnO: Ga thin films deposited by magnetron-assisted sputtering onto a cold substrate". *Semiconductors*, 47 (13), 1687-1691.
- Haimeur, A. El, L. El Gana, M. Addou, and A. El Kenz (2018) "Effect of Tuning the Structure on the Optical and Magnetic Properties by Various Transition Metal Doping in ZnO/TM (TM = Fe, FeCo, Cr, and Mn) Thin Films." *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 31:569–76.
- Hjiri, M., R. Dhahri, L. El Mir, A. Bonavita, N. Donato, S. G. Leonardi, and G. Neri (2015) "CO Sensing Properties of Ga-Doped ZnO Prepared by Sol-Gel Route." *Journal of Alloys and Compounds* 634:187–92.
- Ivanova, T., A. Harizanova, T. Koutzarova, and B. Vertruyen (2010) "Study of ZnO Sol-Gel Films: Effect of Annealing." *Materials Letters* 64(10):1147-1149
- Ivanova, T., A. Harizanova, T. Koutzarova, and B. Vertruyen (2015). "Optical Characterization of Sol-Gel ZnO:Al Thin Films." *Superlattices and Microstructures* 85:101–11.
- Ivanova, T., A. Harizanova, T. Koutzarova, B. Vertruyen, and B. Stefanov (2017) "Structural and Morphological Characterization of Sol-Gel ZnO:Ga Films: Effect of Annealing Temperatures." *Thin Solid Films*. 636: 132 - 142
- Jun, M. C., S. U. Park, and J. H. Koh (2012) "Comparative Studies of Al-Doped ZnO and Ga-Doped ZnO Transparent Conducting Oxide Thin Films." *Nanoscale Research Letters* 7:639.
- Joshi, C. (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.
- Kalygina, V.M., T.Z. Lygdenova, V.A. Novikov, Y. S. Petrova, A.V. Tsymbalov and T.M. Yaskevich, (2019). "Structure and Properties of Gallium-Oxide Films Produced by High-Frequency Magnetron-Assisted Deposition". *Semiconductors* **53**, 388–394
- Kerli, S., U. Alver, A. Tanriverdi, and B. Avar (2015) "Structural and Physical Properties of Boron Doped ZnO Films Prepared by Chemical Spray Pyrolysis Method." *Crystallography Reports* 60(6):946–50.
- Khranovskyy, V., U. Grossner, O. Nilsen, V. Lazorenko, G. V. Lashkarev,

- B. G. Svensson, and R. Yakimova. (2006) "Structural and Morphological Properties of ZnO:Ga Thin Films." *Thin Solid Films* 515:472–76.
- Li, H., E. Xie, M. Qiao, X. Pan, and Y. 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, and H. Zeng (2013) "ZnO-Based Transparent Conductive Thin Films : Doping , Performance , and Processing." *Journal of Nanomaterials* / 196521.
- Lu W., C. Leendertz, L. Korte, J. A. Töfflinger, H. Angermann (2014). "Passivation properties of subnanometer thin interfacial silicon oxide Films". 4th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2014. *Energy Procedia* Vol. 55 pp. 805 – 812
- Ma, Q. B., Ye, Z. Z., He, H. P., Wang, J. R., Zhu, L. P., & B.H. Zhao (2007) "Substrate temperature dependence of the properties of Ga-doped ZnO films deposited by DC reactive magnetron sputtering". *Vacuum*, 82(1), 9-14.
- Mahmudah, S. N., B. Astuti, Sugianto, & P. Marwoto (2016) "Pengaruh Tekanan Oksigen pada Proses Annealing terhadap Struktur dan Sifat Listrik Film Tipis Zinc Oksida Doping Aluminium (ZnO:Al)". *Prosiding Seminar Nasional Quantum*. ISSN : 2477 - 1511.
- Marwoto, P., Ng. M. D. Putra., A. Yulianto, Sugianto, and 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, and 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., S. Sugianto, and E. Wibowo (2012) "Growth of Europium-Doped Gallium Oxide (Ga₂O₃:Eu) Thin Films Deposited by Homemade DC Magnetron Sputtering." *Journal of Theoretical and Applied Physics* 6.
- Marwoto, P., Fatiatun, Sulhadi (2014a). "Pengaruh Suhu Deposisi pada Struktur dan Sifat Optik Film Tipis ZnO:Ga". *Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Terapannya IV*, 15 November 2014.
- Marwoto, P., Sulhadi, Sugianto, D. Aryanto, E. Wibowo, and K.

- Wahyuningsih (2014b) “Room Temperature Deposition of ZnO Thin Films by Using DC Magnetron Sputtering”. *Advanced Materials Research* Vol. 896 pp. 237 -240.
- Marwoto, P. Sugianto, Sulhadi, Didik Aryanto, Edy Wibowo, Yanti (2015). “Highly Oriented ZnO:Al Thin Films as an Alternative Transparent Conducting Oxide (TCO) for Windows Layer of Solar Cells.” *Advanced Materials Research* Vol. 1123 (2015) pp 364-367.
- Marwoto, P., Fatiatun, Sulhadi, Sugianto, and D. Aryanto (2016) “Effects of Argon Pressure on the Properties of ZnO:Ga Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering.” *AIP Conference Proceedings* 1719.
- Marwoto, P., L. Khanifah, Sulhadi, Sugianto, B. Astuti and E. Wibowo (2019) Influence of annealing time on the morphology and oxygen content of ZnO:Ga thin films *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1321, Issue 2
- Muchuweni, E., Sathiaraj, T. S., & Nyakoty, H. (2018). “Effect of annealing on the microstructural, optical and electrical properties of ZnO nanowires by hydrothermal synthesis for transparent electrode fabrication”. *Materials Science and Engineering: B*, 227, 68-73.
- Muhammad, B.R. dan A. W. Nugroho (2017) “Disain dan Fabrikasi Mesin Sputtering Skala Laboratorium Untuk Penumbuhan Film Tipis.” *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik* 20(1):1-7.
- Nafees, M., W. Liaqut, S. Ali, and M. A. Shafique. (2013) “Synthesis of ZnO/Al:ZnO Nanomaterial: Structural and Band Gap Variation in ZnO Nanomaterial by Al Doping.” *Applied Nanoscience* 3:49-55.
- Nur, Muhammad (2011) *Fisika Plasma Dan Aplikasinya*. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- Parthiban, S., Gokulakrishnan, V., Ramamurthi, K., Elangovan, E., Martins, R., Fortunato, E., & Ganesan, R. (2009). “High near-infrared transparent molybdenum-doped indium oxide thin films for nanocrystalline silicon solar cell applications”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(1), 92-97.
- Rakhsani E. (2005). “Thin ZnO films prepared by chemical solution deposition on glass and flexible conducting substrate”. *Appl. Phys. A* 81, 1497-1502
- Reddy, K. T. Ramakrishna, T. B. S. Reddy, I. Forbes, and R. W. Miles (2002). “Highly Oriented and Conducting ZnO:Ga Layers Grown by Chemical Spray Pyrolysis.” *Surface and Coatings Technology* 151-152:110-13.
- Sahoo, S. K., C. A. Gupta, and U. P. Singh (2016). “Impact of Al and Ga Co-

- Doping with Different Proportion in ZnO Thin Film by DC Magnetron Sputtering.” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*.
- Salam, Shahzad, Mohammad Islam, and Aftab Akram (2012) “Sol-Gel Synthesis of Intrinsic and Aluminum-Doped Zinc Oxide Thin Films as Transparent Conducting Oxides for Thin Film Solar Cells.” *Thin Solid Films*.
- Sali, S., M. Boumaour, and 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* 201–7.
- Saragih, H., H. Aliah, E. Sustini, A. Limbong, and A. M. Hutapea (2010) “Sifat Optik Lapisan Tipis In 2 O 3 yang Ditumbuhkan Dengan Metode MOCVD.” *Jurnal Matematika Dan Sains* 15:85–92.
- Sharma, Shashikant, Sumit Vyas, C. Periasamy, and P. Chakrabarti (2014) “Structural and Optical Characterization of ZnO Thin Films for Optoelectronic Device Applications by RF Sputtering Technique.” *Superlattices and Microstructures* 75:378–89.
- Sim, K. U., S. W. Shin, A. V. Moholkar, J. H. Yun, J. H. Moon, and J. H. Kim (2010) “Effects of Dopant (Al, Ga, and 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.
- Singh, A. V., Manoj Kumar, R. M. Mehra, Akihiro Wakahara, and Akira Yoshida (2001) “Al-Doped Zinc Oxide (ZnO:Al) Thin Films by Pulsed Laser.” *Journal Indian Institute of Science* 81:527–33.
- Song, D. (2005) “*Zinc Oxide TCOs (Transparent Conductive Oxides) and Polycrystalline Silicon Thin-Films*”. Sydney: The University of New South Wales.
- Stadler, A. (2012) “Transparent Conducting Oxides—An Up-To-Date Overview.” *Jurnal of Materials* 5:661–83.
- Sugianto, N. Hindarto, P. Marwoto, and E. 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, R. Zannah, SN Mahmudah, B. Astuti, Ng. M. D. Putra, A.A.

- Wibowo, P. Marwoto, D. Ariyanto, and E. Wibowo. (2017) "Pengaruh Temperatur Annealing Pada Sifat Listrik Film Tipis Zinc Oksida Doping Aluminium Oksida." *Jurnal MIPA* 39(2):115–22.
- Sulhadi, Fatiatun, P. Marwoto, and E. 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.
- Tecaru, A., A. I. Danciu, V. Muşat, E. Fortunato, and E. Elangovan (2010) "Zinc Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis." *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 12(9):1889–93.
- Thirumoorathi, M. and J.T. J. Prakash (2015) "Structural, Morphological Characteristics and Optical Properties of Y Doped ZnO Thin Films by Sol-Gel Spin Coating Method". *Superlattices and Microstructures* 85:237–47.
- Timuda, G. E. and A.Liu 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.
- Tunggadewi, D. A. and F. Hidayanti (2015) "Pembuatan Sel Surya Film Tipis Dengan DC Magnetron Sputtering." *Jurnal Ilmiah GIGA* 18(1):30–34.
- Varughese, George, P. W. Jithin, and K. T. Usha (2015) "Determination of Optical Band Gap Energy of Wurtzite ZnO: Ce Nanocrystallites." *Physical Science International Journal* 5(2):146–54.
- Wang, L. W., F. Wu, D. X. Tian, W. J. Li, L. Fang, C. Y. Kong, and M. Zhou (2015) "Effects of Na Content on Structural and Optical Properties of Na-Doped ZnO Thin Films Prepared by Sol-Gel Method." *Journal of Alloys and Compounds* 623:367–73.
- Wibowo, A. A., P. 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.
- Yang, Y., J. Qi, Q. Liao, Y. Zhang and X. Yan (2009) "Fabrication, structural characterization and photoluminescence of Ga-doped ZnO nanobelts". *Applied Phys. A*, 94: 799-803.
- Yu, X., J. Ma, F. Ji, Y. Wang, C. Cheng, and H. Ma. (2005a) "Thickness

- Dependence of Properties of ZnO:Ga Films Deposited by Rf Magnetron Sputtering.” *Applied Surface Science* 245:310–15.
- Yu, X., J. Ma, F. Ji, Y. Wang, X. Zhang, and H. Ma (2005b). “Influence of annealing on the properties of ZnO: Ga films prepared by radio frequency magnetron sputtering”. *Thin solid films*, 483(1-2), 296-300.
- Zannah, R. (2016) *Pengaruh Temperatur Annealing terhadap Struktur, Sifat Listrik, dan Sifat Optik Film Tipis Zinc Oxide Doping Aluminium (ZnO:Al) dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang:FMIPA Unnes.
- Zhong, J. B., J. Z. Li, J. Z., Xi Y. H., W. Hu, and Y. C. Shen (2012) “Enhanced Photocatalytic Performance of Ga³⁺ Doped ZnO.” *Materials Research Bulletin* 47:3893–96.



Penulis Utama

Dr. Sulhadi, M.Si, menyelesaikan pendidikan dasar dan menengah di kota kelahirannya, Pati - Jawa Tengah, memperoleh gelar Sarjana Pendidikan (Fisika) di IKIP Semarang (1995), Magister Sains (Fisika) di Institut Teknologi Bandung (ITB) (1998) dan Doktor (Fisika) di Universiti Teknologi Malaysia (2007). Saat ini aktif sebagai dosen di Jurusan Fisika FMIPA UNNES dengan bidang kepakaran Fisika Material dan mendapat tugas tambahan sebagai

Koordinator Program Studi Magister Pendidikan Fisika, Pascasarjana UNNES sejak tahun 2015. Selain fisika material, juga menekuni penelitian di bidang pendidikan fisika, dan lebih dari satu dekade ini telah menekuni penelitian di bidang material film tipis, khususnya film tipis ZnO yang difabrikasi dengan metode *DC magnetron sputtering*. Karya-karya ilmiahnya telah dipublikasikan pada berbagai jurnal internasional seperti *Journal of Non-Crystalline Solids* (Elsevier), *Solid State Sciences* (Elsevier), *Procedia Engineering* (Elsevier), *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* (Elsevier), *Physics Education* (IOP Science) dan *IOP Journal of Physics Conference Series* (IOP Science). Sampai sekarang aktif sebagai anggota Himpunan Fisika Indonesia (HFI).

Penerbit LPPM UNNES

Gd. Prof. Dr. Sriningsih Satmoko
Kampus UNNES, Semarang 50229
www.lppm.unnes.ac.id



ISBN 978-623-6686-63-8



9 786236 686638