

## PENGARUH TEMPERATUR ANNEALING PADA SIFAT LISTRIK FILM TIPIS ZINC OKSIDA DOPING ALUMINIUM OKSIDA

Sugianto<sup>1✉</sup>, R Zannah<sup>1</sup>, SN Mahmudah<sup>1</sup>, B Astuti<sup>1</sup>, NMD Putra<sup>1</sup>, AA Wibowo<sup>1</sup>, P Marwoto<sup>1</sup>, D Ariyanto<sup>2</sup>, E Wibowo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

<sup>2</sup>Research Center for Physics, Indonesian Institute of Sciences, Indonesia

<sup>3</sup>Engineering Physics, School of Electrical Engineering, Telkom University, Indonesia

### Info Artikel

#### Sejarah Artikel:

Diterima Agustus 2016  
Disetujui September 2016  
Dipublikasikan Oktober 2016

#### Keywords:

*dc magnetron sputtering; thin film; optical property; ZnO doping Al*

### Abstrak

Penumbuhan film tipis zinc oksida di-doping aluminium oksida dengan variasi temperatur annealing menggunakan metode *dc magnetron sputtering* telah berhasil dilakukan. Pengaruh variasi temperature *annealing* pada struktur dan sifat listrik film tipis telah dipelajari dengan menggunakan XRD dan I-V meter. Berdasarkan karakterisasi XRD, film tipis yang dihasilkan memiliki struktur *wurtzite* dengan orientasi yang dominan adalah (002). Penambahan temperatur *annealing* pada proses penumbuhan meningkatkan intensitas orientasi (002). Selanjutnya analisis sifat listrik menggunakan I-V meter. Film tipis zinc oksida di-doping Al pada temperatur annealing 300°C memiliki nilai resistivitas yang optimum yaitu  $2,89 \times 10^2 \Omega\text{cm}$ . Hal tersebut konsisten dengan hasil XRD yang menyatakan bahwa film tipis zinc oksida yang di doping dengan aluminium oksida pada temperature 300°C memiliki ukuran kristal yang semakin besar, kompak dan homogen.

### Abstract

*Growth of zinc oxide doped aluminum oxide thin film with annealing temperature variation using dc magnetron sputtering method has been done. Effect of annealing temperature variations on the structure and electrical properties of thin films has studied using XRD and I-V meter. According to XRD characterization, thin film was obtained has wurtzite structure with dominant orientation is (002). Increasing of annealing temperature on the growth process was increased the intensity of orientation (002). Furthermore, the electrical properties were measured using I-V meter. Zinc oxide doped Al thin film shows the optimum resistivity around of  $2.89 \times 10^2 \Omega\text{cm}$  when the annealing temperature of 300 °C. This is consistent with XRD results which is the Zinc oxide doped aluminum oxide thin has a crystal size is getting bigger, dense, and homogeneous at annealing temperature 300 °C.*

© 2016 Universitas Negeri Semarang

✉ Alamat korespondensi:  
Kampus Sekaran Gunungpati Semarang 50229

## PENDAHULUAN

ZnO merupakan material semikonduktor tipe-n yang mempunyai struktur kristal *wurtzite*. Film tipis ZnO biasanya menunjukkan nilai resistivitas yang rendah karena kekosongan (vakansi) oksigen dan penyisipan (*interstitial*) Zn pada komposisi yang *nonstoichiometric* (Wirjoadi & Siswanto 2009). ZnO mempunyai *band gap* yang lebar sekitar 3,21 eV pada temperatur ruang (Belta *et al.* 2015) dan transmitansi yang tinggi sekitar 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  $\Omega$ .cm (Sim *et al.* 2010). Nilai konduktivitas film tipis ZnO tanpa doping yaitu sekitar  $6,24 \times 10^{-7} (\Omega m)^{-1}$  (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  $10^5 \Omega$ .cm (Amara & Mohamed 2014).

Logam Al merupakan unsur yang paling baik digunakan sebagai doping 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 berpotensi untuk diaplikasikan sebagai TCO. Selain karena konduktivitas dan transparansinya tinggi, Al berkontribusi terhadap lebar *band gap* ZnO dikarenakan bertambahnya konsentrasi pembawa muatan yang dikenal sebagai efek Burstein-Moss (Suchea *et al.* 2007).

Pendeposisian film tipis dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti *Metal Oxide*

*Chemical Vapor Deposition* (MOCVD) (Park *et al.* 2009), *sol-gel dip-coating* (Zhou *et al.* 2007), *RF magnetron sputtering* (Kang & Yang 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 dideposisikan, ketebalan lapisan dapat dikontrol dengan akurat dan temperatur substrat yang rendah. Metode *sputtering* mempunyai beberapa tipe berdasarkan dari sumber penghasilan daya plasmanya yaitu Radio *Frekuensi* (RF) *Sputtering* dan *Direct Current* (DC) *Magnetron Sputtering*.

Pada studi ini akan dipelajari tentang pengaruh variasi temperatur annealing terhadap struktur dan sifat listrik film tipis ZnO doping Al dengan menggunakan metode *DC Magnetron Sputtering*. Struktur dan sifat listrik film tipis ZnO doping Al yang diperoleh dikarakterisasi dengan XRD dan I-V meter.

## METODE PENELITIAN

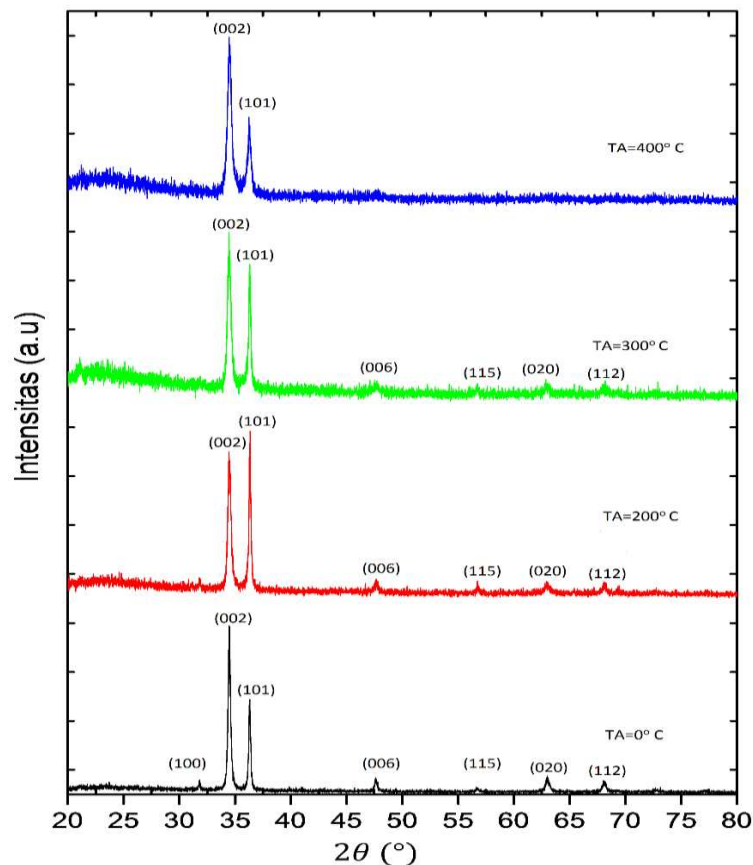
Film tipis ZnO doping Al ditumbuhkan di atas substrat *corning glass* dengan variasi temperatur *annealing* menggunakan metode *DC magnetron sputtering*. Pembuatan target berupa pelet ZnO dengan kemurnian 99,999% dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan kemurnian 99,999%. Gas argon (Ar) 99,99% digunakan sebagai gas *sputter* selama proses deposisi. Target dibuat dengan perbandingan ZnO: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 97:3 wt%. Pelet dibuat melalui proses penggerusan selama  $\pm 3$  jam, pencampuran, pemadatan atau pengepresan dengan sistem pompa hidrolik menjadi pelet dengan diameter 3,0 cm. Pelet kemudian disintering pada suhu 750°C selama 2,5 jam dan didinginkan. Pada penumbuhan film tipis ZnO doping Al, substrat yang digunakan adalah *corning glass*. Substrat *corning glass* dipotong dengan ukuran (1x1) cm<sup>2</sup>. Setelah itu substrat dicuci dengan metanol untuk menghilangkan kotoran (minyak dan lemak) yang menempel pada permukaan substrat selama 15 menit dalam

*ultrasonik bath*. Terakhir substrat dikeringkan dengan gas *argon* ke seluruh permukaan substrat sampai kering dan bersih.

Film tipis ZnO doping Al dideposisi pada suhu penumbuhan, daya plasma, tekanan gas argon dan waktu penumbuhan dibuat konstan masing-masing 400°C, 40 Watt, 500 mTorr selama 1 jam. Setelah proses penumbuhan, film ZnO doping Al di *annealing* pada suhu yang bervariasi 0, 200, 300 dan 400°C selama 20 menit. Selanjutnya, dilakukan karakterisasi sampel film tipis dengan menggunakan XRD dan I-V meter untuk memelajari struktur dan sifat listrik film yang dihasilkan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur film tipis ZnO doping Al yang ditumbuhkan di atas *coning glass* dengan variasi temperatur *annealing* (0, 200, 300 dan 400°C) diamati dengan menggunakan teknik karakterisasi XRD. Karakterisasi XRD menggunakan sumber radiasi  $\text{CuK}_\alpha$  dengan panjang gelombang 0,15406 nm. Pola difraksi sinar-X pada sampel film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Spektrum XRD film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing*

Spektrum XRD pada Gambar 1 menunjukkan beberapa puncak difraksi yang menandakan bahwa film yang tumbuh memiliki struktur polikristal. Struktur film polikristal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan Sim *et al.* (2010). Film tipis ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 0, 200 dan 300°C muncul puncak-puncak pada sudut  $2\theta = 31,78^\circ, 34,47^\circ, 36,31^\circ,$

$47,61^\circ, 56,74^\circ, 63,0^\circ$  dan  $68,08^\circ$  yang berurutan memiliki arah orientasi bidang kristal (100), (002), (101), (006), (115), (020) dan (112). Semua bidang orientasi yang muncul pada sudut  $2\theta$  menunjukkan puncak dengan fase *wurtzite* (heksagonal). Peningkatan temperatur *annealing* menjadi 400°C film tipis ZnO doping Al puncak-puncak yang dominan muncul pada sudut  $2\theta =$

34,47° dan 36,26° yang bersesuaian dengan arah orientasi bidang kristal (002) dan (101).

Intensitas relatif paling tinggi terdapat pada puncak dengan arah orientasi bidang kristal (002) dan (101) jika dibandingkan dengan puncak-puncak lainnya. Tingginya intensitas dipengaruhi oleh banyaknya bidang-bidang pemantul pada susunan atom sampel tersebut. Semakin banyak bidang-bidang pemantul, interferensi dari gelombang terdifraksi akan saling menguatkan yang menyebabkan semakin tinggi pula intensitasnya. Peningkatan temperatur *annealing* menyebabkan puncak-puncak yang dominan muncul hanya pada bidang orientasi (002) dan (101). Hal ini mengindikasikan bahwa yang terbentuk pada film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* adalah kristal tunggal. Aplikasi *windows layer* sel surya yang terbentuk yaitu pada bidang orientasi (002) dan pada bidang orientasi (101) biasanya digunakan untuk aplikasi *Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)* berbasis nanopartikel ZnO (Syukron *et al.* 2013).

Pada Gambar 1 teramati bahwa film ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 300°C memiliki intensitas paling tinggi jika dibandingkan dengan film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* yang lain. Hal ini berarti bahwa film tipis ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 300°C memiliki struktur kristal yang baik dengan atom-atom target dapat terdeposisi secara merata atau homogen. Pada peningkatan

temperatur *annealing* 300°C dan 400°C, atom-atom target mempunyai kecepatan yang tinggi untuk bertumbukan, sehingga peluang untuk menempati keadaan yang sebenarnya di dalam kristal semakin besar, dan atom atom tersebut dapat terdeposisi secara merata atau homogen.

Film tipis ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 200°C memiliki intensitas paling rendah jika dibandingkan dengan temperatur *annealing* yang lain. Hal ini disebabkan adanya perlakuan *annealing*. Atom-atom target yang terdeposisi pada substrat yang semula sudah tersusun secara merata dan homogen, atom-atom target tersebut kembali memposisikan diri sehingga membentuk secara acak.

Berdasarkan spektrum XRD juga dapat ditentukan FWHM, *d-space*, dan parameter kisi yang ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1 terlihat bahwa film tipis ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 0°C muncul puncak pada sudut 34,47° dan FWHM 0,26° dengan jarak antar bidang atom kristal (*d*) 2,59Å dan nilai konstanta kekisi *c* 5,19Å. Film tipis ZnO doping Al dengan perlakuan *annealing* menunjukkan sudut difraksi bergeser ke kiri (semakin kecil) yaitu 34,46°. Hal ini disebabkan jarak antar bidang atom kristal (*d*) semakin besar yaitu 2,66Å dan nilai konstanta kekisi *c* menjadi 5,32Å. Sesuai dengan perumusan hukum *Bragg* tentang persamaan difraksi yang menyatakan bahwa sudut difraksi ( $\theta$ ) berbanding terbalik dengan jarak antar bidang (*d*).

**Tabel 1.** Hasil analisis XRD film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* pada puncak (002)

Sampel	Temperatur <i>annealing</i> (°)	sudut $2\theta$ (°)	FWHM puncak (002) (°)	<i>d-space</i> (Å)	konstanta kekisi <i>c</i> (Å)
#A	0	34,47	0,26	2,59	5,19
#B	200	34,46	0,25	2,66	5,32
#C	300	34,45	0,24	2,60	5,20
#D	400	34,47	0,27	2,59	5,19

Namun ketika temperatur *annealing* meningkat menjadi 400°C sudut difraksi bergeser ke kanan (semakin besar) yaitu pada sudut 34,47° dan nilai FWHM juga meningkat menjadi 0,27°. Pergeseran-pergeseran sudut puncak difraksi (002) ini menunjukkan bahwa proses doping aluminium pada semikonduktor ZnO ternyata tidak mengubah difraksi sinar-X dengan tidak

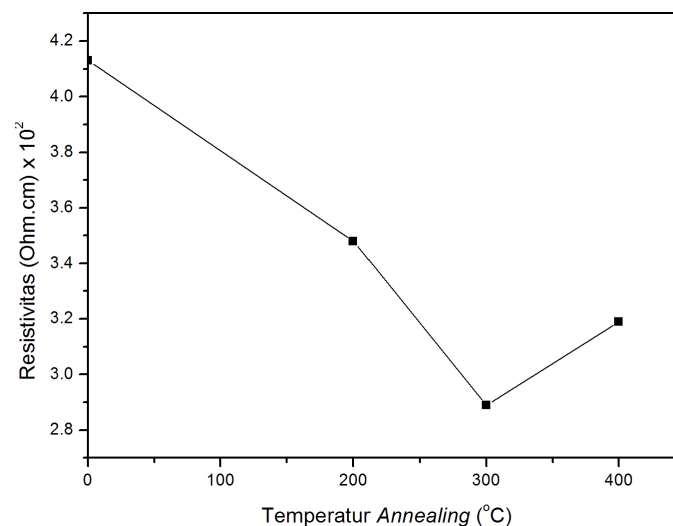
adanya puncak dari Al ataupun Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*Aluminum Oxide*).

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> merupakan bahan menjanjikan karena mempunyai keuntungan yaitu jejari ion dari Al<sup>3+</sup> ( $\pm$  0,053 nm) lebih kecil dari Zn<sup>2+</sup> yaitu sekitar 0,074 nm (Tao *et al.* 2012). Keuntungan ini dapat menjadikan ion Al<sup>3+</sup> dapat menyisip dan menggantikan ion Zn<sup>2+</sup>. Ion Al<sup>3+</sup> yang menyisip dan

menggantikan ion  $Zn^{2+}$  ini menyebabkan elektron bebas yang bergerak semakin banyak. Elektron bebas (terlepas dari pita valensi) yang bergerak ini disebabkan terjadinya ikatan atom-atom yang bergetar. Apabila di dalam bahan diberi medan listrik, yaitu dengan memberi beda potensial maka elektron bebas ini akan bergerak menjadi arus listrik, sehingga arus listrik yang dihasilkan semakin banyak dan menjadikan film ZnO doping Al bersifat konduktif. Konduktivitas listrik yang besar diperoleh dari film yang ditumbuhkan pada temperatur tinggi yang menyebabkan banyak arus listrik yang mengalir dan peningkatan mobilitas atom-atom. Namun jika konsentrasi doping Al terus ditambah maka ion  $Al^{3+}$  yang menyisip dan menggantikan ion  $Zn^{2+}$  semakin banyak. Hal ini mengakibatkan kejenuhan dan menghalangi pertumbuhan kristal ZnO. Konsentrasi doping

aluminium optimum yaitu 3%, sesuai pada penelitian Firmaningsih (2015).

Selanjutnya untuk mengetahui nilai resistivitas dan konduktivitas listrik film tipis ZnO doping Al dengan menggunakan variasi temperatur *annealing* dengan menggunakan metode *two-probe*. Variasi temperatur *annealing* pada penelitian ini adalah 0, 200, 300 dan 400°C. Pengukuran tersebut berupa data arus dan tegangan. Berdasarkan data tersebut dilakukan analisis secara empiris untuk mendapatkan nilai resistivitas listrik dengan menggunakan persamaan  $\sigma = \frac{1}{\rho}$ . Grafik hubungan antara resistivitas dan temperatur *annealing* ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Resistivitas Film tipis ZnO doping Al variasi temperatur *annealing*

Gambar 2 menunjukkan nilai resistivitas listrik dari film tipis ZnO doping Al dengan menggunakan variasi *annealing* adalah menurun dengan peningkatan temperatur *annealing*. Penurunan nilai resistivitas ini disebabkan adanya peningkatan temperatur *annealing* yang mempengaruhi ukuran kristal dan menyebabkan peningkatan nilai mobilitas (Cho *et al.* 2010). Film yang baik adalah film yang memiliki nilai resistivitas yang kecil (Jiang *et al.* 2013). Resistivitas dapat diketahui dari perubahan konsentrasi pembawa muatan serta mobilitas. Dengan demikian, peningkatan baik konsentrasi pembawa serta mobilitas akan menyebabkan

peningkatan nilai konduktivitas dan menjadikan sifat film yang baik (Ming *et al.* 2015).

Pada temperatur *annealing* 400°C, nilai resistivitas kembali meningkat. Berdasarkan pada penelitian Guillen & Herrero (2010) nilai resistivitas memiliki rentang tertentu ketika kondisi pemanasan mencapai nilai optimum. Oleh sebab itu ketika suhu *annealing* ditingkatkan, sifat listrik yang terjadi adalah perubahan nilai resistivitas meningkat sedangkan konsentrasi pembawa muatan serta mobilitas menunjukkan *trend* yang menurun (Hung *et al.* 2015). Penurunan konsentrasi pembawa muatan dapat berhubungan dengan pemisahan atom logam (dopan) dengan

batas butir (Cao *et al.* 2004), dimana mereka menjadi tidak aktif sebagai donor dan merubah potensial penghalang untuk transpor muatan di seluruh butir, dihasilkan juga penurunan mobilitas (Guillen *et al.* 2010).

Hasil analisis pengukuran sifat listrik film tipis ZnO doping Al yang ditumbuhkan dengan variasi temperatur *annealing* menunjukkan nilai resistivitas yang berbeda meski dalam orde yang identik. Hasil perhitungan karakterisasi sifat listrik film tipis ZnO doping Al ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil karakterisasi sifat listrik film tipis ZnO doping Al menggunakan *temperatur annealing* dengan Metode *Two-probe*

Sampel	Temperatur <i>annealing</i> (°C)	Resistivitas film ( $\Omega$ cm)	Konduktivitas film ( $\Omega$ cm) <sup>-1</sup>
#A	0	$4,13 \times 10^2$	$2,39 \times 10^{-3}$
#B	200	$3,48 \times 10^2$	$2,83 \times 10^{-3}$
#C	300	$2,89 \times 10^2$	$3,40 \times 10^{-3}$
#D	400	$3,19 \times 10^2$	$3,08 \times 10^{-3}$

Berdasarkan Tabel 2 terlihat film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* (0, 200, 300 dan 400°C) memiliki nilai resistivitas yang berbeda yaitu sebesar  $4,13 \times 10^2(\Omega$  cm),  $3,48 \times 10^2(\Omega$  cm),  $2,89 \times 10^2(\Omega$  cm) dan  $3,19 \times 10^2 (\Omega$  cm). Film tipis ZnO doping Al sebelum *annealing* memiliki nilai resistivitas yang masih besar dibandingkan film tipis ZnO doping Al dengan menggunakan temperatur *annealing* meski dalam orde yang identik. Peningkatan temperatur *annealing* memiliki nilai resistivitasnya semakin menurun dibandingkan pada penelitian sebelumnya, Yanti (2013) melaporkan bahwa nilai resistivitasnya yaitu  $4,05 \times 10^3 (\Omega$ .cm). Film yang menggunakan temperatur *annealing* pada temperatur 300°C mempunyai nilai resistivitas yang lebih kecil dibandingkan dengan film yang lainnya yaitu sekitar  $2,89 \times 10^2\Omega$ .cm. Konduktivitas listrik film tipis ZnO doping Al berbanding terbalik dengan nilai resistivitas listriknya.

Pada temperatur *annealing* 300°C film mempunyai konduktivitas yang lebih besar dibandingkan dengan film yang lain yaitu sekitar  $3,08 \times 10^{-3} (\Omega$ cm)<sup>-1</sup>. Konduktivitas listrik yang besar diperoleh dari film yang ditumbuhkan pada temperatur tinggi. Pada temperatur tinggi banyak elektron valensi yang terlepas dari ikatan atom-atom karena terjadinya getaran atom. Apabila di dalam bahan diberi medan listrik, yaitu dengan memberi beda potensial maka elektron bebas ini akan bergerak menjadi arus listrik. Pada temperatur *annealing* 400°C nilai resistivitasnya kembali meningkat, seperti yang dikatakan Guillen *et al.* (2010) bahwa nilai resistivitas memiliki

rentang tertentu ketika kondisi pemanasan mencapai nilai optimum.

## SIMPULAN

Film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* memiliki struktur polikristal dengan fase *wurtzite* (heksagonal). Pada temperatur *annealing* 400°C, film tipis ZnO doping Al puncak-puncak yang dominan muncul pada sudut  $2\theta = 34,47^\circ$  dan  $36,26^\circ$  yang bersesuaian dengan arah orientasi bidang kristal (002) dan (101). Film tipis ZnO doping Al pada temperatur *annealing* 300°C memiliki struktur kristal yang baik dengan atom-atom target dapat terdepositasi secara merata atau homogen. Film tipis ZnO doping Al dengan variasi temperatur *annealing* (0, 200, 300 dan 400°C) memiliki nilai resistivitas yang berbeda yaitu sebesar  $4,13 \times 10^2(\Omega$  cm),  $3,48 \times 10^2(\Omega$  cm),  $2,89 \times 10^2(\Omega$  cm) dan  $3,19 \times 10^2 (\Omega$  cm). Film yang di *annealing* pada temperatur 300°C mempunyai nilai resistivitas yang lebih kecil dibandingkan dengan film yang lainnya yaitu sekitar  $2,89 \times 10^2\Omega$ .cm. Hal tersebut konsisten dengan hasil XRD yang menyatakan bahwa film tipis Zinc oksida yang di doping dengan aluminium oksida pada temperature 300 °C memiliki ukuran kristal yang semakin besar, kompak dan homogen.

## DAFTAR PUSTAKA

Ajimsha RS, Das AK, Singh BN, Misra P, & Kukreja LM. 2010. Structural, electrical and optical properties

- of dy doped ZnO thin films grown by buffer assisted pulsed laser deposition. *Physica E* 42: 1838-1843.
- Amara S & Mohamed B. 2014. Investigation on optical, structural and electrical properties of annealed AZO/Al/AZO multilayer structures deposited by dc magnetron sputtering. *J Mater Sci: Mater Electron* 26 (3):
- Balta AK, Ertek O, Eker N & Okur I. 2015. MgO and ZnO Composite Thin Films Using the Spin Coating Method on Microscope Glasses. *Materials Science and Applications*. 6: 40-47
- Cao HT, Pei ZL, Gong J, Sun C, Huang RF, & Wen LS. 2004. Preparation and characterization of Al and Mn doped ZnO (ZnO:(Al, Mn)) transparent conducting oxide films. *J Solid State Chem* 177: 1480-1487.
- Chaabouni F, Abaab M, & Rezig B. 2004. Effect of the substrate temperature on the properties of ZnO films grown by RF magnetron sputtering. *Mater Sci Eng B* 109: 236-240.
- Firmaningsih R. 2015. Pengaruh Fraksi Mol Aluminium Oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) terhadap Sifat Listrik dan Sifat Optik Film Tipis Zinc Oxide (ZnO) dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes
- Guillen C & Herrero J. 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 Energi'a, CIEMAT, Av. Complutense 22, 28040 Madrid, Spain.
- Huang CS & Liu CC. 2015. The Optical and Electrical Properties of Gallium-Doped ZnO Thin Film with Post-Annealing Processes of Various Atmospheres. *Microelectronic Engineering*. 148: 59-63
- Jiang JG, Lun YL, Yuan LW, Sun X, Wang Z, Wen Z, Ye Z, Xiao D, Ge HZ, Zhao Y. 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
- Kang SJ & Yang HJ. 2007. Influence of substrate temperature on the optical and piezoelectric properties of ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Appl Surf Sci*. 253: 7330-7335.
- Kim CE, Moon P, Kim S, Myoung JM, Jang HW, Bang J, & Yun I. 2010. Effect of carrier concentration on optical bandgap shift in ZnO:Ga thin films. *Thin Solid Films* 518: 6304-6307.
- Kim D-H, Jeon H, Kim G, Boe SH, Verma VP, Choi W, & Jeon M. 2007. Comparison of the Optical Properties of Undoped and Ga-doped ZnO Thin Films Deposited using RF Magnetron Sputtering at Room Temperatur. *Opt Comun* 281: 2120-2125.
- Kuo SY, Chen WC, Lai FI, Cheng CP, Kuo HC, Wang SC & Hsieh WF. 2006. Effects of Doping Concentration and Annealing Temperatur on Properties of Highly-Oriented Al-Doped ZnO Films. Elsevier. *Journal of Crystal Growth*. 287: 78-84
- Lin YM, Chu CH, Wu HW, & Huang JL. 2015. Study of AZO thin films under different annealing atmosphere on structural, optical and electrical properties by rf magnetron sputtering. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015 Vol II, IMECS 2015. Hong Kong. 807-810
- Ming LY, Chien-Hsun C, Hung-Wei W, & Jow-Lay H. 2015. Study of AZO thin film under different annealing atmosphere on structural, optical and electrical properties by RF magnetron sputtering. Hongkong. *Proceeding of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientist*. Vol. II IMECS 2015.
- Sim KU, Shin SW, Moholkar AV, Yun JH, Moon JH, & Kim JH. 2010. Effect of dopant (Al, Ga, and In) on the Characteristics of ZnO Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering System. *Curr Appl Phys* 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
- Suchea M, Christoulakis S, Katsarakis N, Kitsopoulos T & Kiriakidis G. 2007. Comparative study of zinc oxide and aluminum doped zinc oxide transparent thin films grown by direct current magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. 515: 6562-6566.
- Suprayogi D. 2014. Pengaruh doping gallium oksida pada karakteristik film tipis seng oksida ditumbuhkan dengan metode dc magnetron sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes.
- Syukron A, Risanti DD, & Sawitri D. 2013. Pengaruh preparasi pasta dan temperatur annealing pada dye-sensitized solar cells (DSSC) berbasis nanopartikel ZnO. *Jurnal Teknik Pamits*, 2(2) : 2337-3539.
- Tao R, Tomita T, Wong RA, & Waki K. 2012. Electrochemical and Structural Analysis of Al-doped ZnO Nanorod arrays in dye-sensitized Solar Cell. *Journal of Power Source*. 214: 159-165

- Wirjoadi S & Siswanto B. 2009. Influence of substrate temperature on structural, electrical and optical properties of ZnO:Al ThinFilms. *Atom Indonesia*. :115-125.
- Yanti. 2013. Penumbuhan dan Karakterisasi Sifat Fisis Film Tipis ZnO doping Al dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA Unnes.
- Zhou H, Yi D, Yu Z, Xiao L & Li J. 2007. Preparation of aluminum doped zinc oxide films and the study of their microstructure, electrical and optical properties. *Thin Solid Films* 515: 6909-6914.