



ANALISIS STRUKTUR DAN SIFAT OPTIK FILM TIPIS GALIUM OKSIDA DOPING SENGG OKSIDA YANG DIDEPOSISIKAN MENGGUNAKAN METODE DC MAGNETRON SPUTTERING

Agus Andi Wibowo[✉] Putut Marwoto, Sulhadi

Prodi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang, Indonesia, 50229

Info Artikel

Sejarah Artikel:

Diterima Oktober 2013
Disetujui November 2013
Dipublikasikan Januari 2013

Keywords:

Zinc Oxide doped Gallium Oxide (Ga₂O₃:Zn), substrat temperature, structure, optical transmittance

Abstrak

Film tipis Galium Oksida doping Seng Oksida (Ga₂O₃:Zn) telah berhasil dideposisi di atas substrat silikon (1 1 1) dan corning glass pada daya plasma 22.16 W dengan suhu substrat 600°C dan 635°C menggunakan metode dc magnetron sputtering. Struktur kristal film dikarakterisasi menggunakan XRD (X-ray Diffraction). Morfologi film dikarakterisasi menggunakan SEM (Scanning Electron Microscopic). Transmittansi optik dikarakterisasi dengan spektrometer UV-Vis. Film tipis Ga₂O₃:Zn pada suhu temperatur 600°C dan 635°C mempunyai struktur polikristal. Telah didapat peak Ga₂O₃ (0 1 2) dan (2 1 10) dan peak silikon (1 1 1) dan (4 4 4). Pada orientasi (0 1 2) memiliki intensitas tertinggi dan nilai full width half maximum (FWHM) terkecil pada suhu substrat 600°C. Nilai transmittansi semakin kecil pada peningkatan suhu substrat dengan nilai terbesar 70% yang dimiliki suhu substrat 600°C dan 60% untuk suhu 635°C, dengan besarnya energi gap yang dihasilkan relative sama yaitu 4,65eV dan 4,60eV.

Abstract

Zinc Oxide doped Gallium Oxide (Ga₂O₃:Zn) thin films have been successfully deposited at corning glass and silicon (1 1 1) substrat with a plasma power 20.16 W with substrat temperature 600°C dan 635°C using dc magnetron sputtering method. The crystal structure of films were characterized using XRD (X-ray diffraction). Morphology films were characterized using SEM (Scanning Electron Microscopic). Optical transmittance characterized by UV-vis spectrometer. Ga₂O₃:Zn thin films on a substrat temperature of 600°C dan 635°C have a polycrystalline structure. Have obtained Ga₂O₃ peak (0 1 2) and (2 1 10) and peak silicon (1 1 1) and (4 4 4). The orientation (0 1 2) has the highest intensity and the value of full width half maximum (FWHM) at the smallest substrat temperature 600°C. Transmittance value the smaller the increase in substrate temperature with the largest value of 70% is owned by the substrate temperature of 600 ° C and 60% for a temperature of 635 ° C, with the magnitude of the resulting energy gap is relatively the same, namely 4.60 eV and 4.65 eV.

© 2013 Universitas Negeri Semarang

[✉] Alamat korespondensi:
Gedung D7 lantai 2 Kampus UNNES, Semarang, 50229
E-mail: agusandi88@yahoo.com

PENDAHULUAN

Teknologi film tipis sudah dikenal berpuluh-puluh tahun di industri besar maupun kecil. Proses teknologi film tipis terus dikembangkan sampai sekarang dengan menggunakan proses-proses modifikasi terbaru untuk tujuan penghematan bahan baku dan biaya produksi dengan kualitas yang baik. Sejalan dengan perkembangan teknologi film tipis, para peneliti mulai mencari material-material lain sebagai alternatif dari material yang sudah dikomersilkan. Material Galium Oksida (Ga_2O_3) menjadi salah satu material menarik untuk diteliti karena dapat diaplikasikan sebagai bahan dielektrik, sensor kimia, transparent conductive oxide (TCO) dan thin film electroluminescent (TFEL).

Pada dua dekade terakhir ini, bahan material TCO yang paling banyak dimanfaatkan secara komersial didalam industri-industri besar dan kecil ialah Indium Tin Oxide (ITO). Saat ini, hampir dapat dipastikan semua produk layar (liquid crystal display) LCD atau layar flat generasi mutakhir memanfaatkan material ITO sebagai bagian dari komponennya. Hal ini karena material oksida ITO inilah yang menunjukkan performa paling tinggi dari segi transparansi terhadap cahaya tampak dan tingkat konduktivitas yang tinggi. Namun, material ITO memiliki harga yang mahal sehingga para peneliti mencari alternatif lain yang nantinya diharapkan dapat menggantikan kedudukan ITO di masa depan

Material Ga_2O_3 sebagai alternatif yang menjanjikan pengganti ITO pada aplikasi TCO, karena menunjukkan sifat transparan pada daerah panjang gelombang UV (ultraviolet) hingga 280 nm (Hosono et al., 2002). TCO digunakan secara luas sebagai elektroda transparan pada flat panel display, seperti LCD dan organic light emitting display (OLED). Material sebagai kandidat TCO memiliki sifat tembus pandang (transparent) terhadap cahaya tampak dengan ketebalan yang sangat tipis (~150 nanometer). Selain itu, juga bersifat konduktif seperti layaknya semikonduktor yang dapat menghantarkan listrik dalam besaran taraf tertentu.

. Material Ga_2O_3 dalam bentuk film tipis seringkali dimanfaatkan sebagai sensor gas karena stabil pada temperatur tinggi (titik lebur 1740oC) dan konduktivitasnya bergantung pada lingkungan atmosfer (Hoefler et al., 2001). Ogita et al. (2001) menunjukkan film tipis Ga_2O_3 tanpa doping memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap oksigen pada temperatur di atas 700oC. Sedangkan Li et al. (2003) dengan melakukan doping Ce, Zn dan W pada film tipis Ga_2O_3 menunjukkan respon terhadap oksigen meningkat dengan temperatur kerja yang

lebih rendah. Film tipis Ga_2O_3 juga menunjukkan sensitivitas yang tinggi pada gas hidrogen (Trinchi et al., 2004), gas CO dan NO₂ (Hoefler et al., 2001) serta gas acetone (Bene et al., 2001).

Film tipis Ga_2O_3 pure telah ditumbuhkan dengan berbagai metode seperti photoelectrochemical (Lee et al ,2003), rf magnetron sputtering (Ogita et al, 2000), floating zone (Villora et al, 2003), electron-beam evaporation (MBE) (Passlack et al, 1995) dan sol-gel (Thinchi et al, 2003). Metode yang digunakan untuk deposisi lapisan tipis $Ga_2O_3:Zn$ dalam penelitian ini adalah dc magnetron sputtering. Deposisi film tipis $Ga_2O_3:Zn$ menggunakan metode dc magnetron sputtering menarik untuk diteliti karena mempunyai berbagai kelebihan dan reaktor tersebut tersedia di laboratorium fisika material Universitas Negeri Semarang. Penelitian ini difokuskan pada struktur kristal, morfologi permukaan, dan transmitansi optik.

METODE

Penelitian ini dilakukan menggunakan dc magnetron sputtering. Film tipis $Ga_2O_3:Zn$ (2%) dideposisi pada substrat silicon (1 1 1) dan corning glass menggunakan dc magnetron sputtering. Target berupa pellet Ga_2O_3 dengan 99,9999% dan ZnO dengan 99,99% dengan massa total 10 gram. Film tipis $Ga_2O_3:Zn$ dideposisi di atas substrat silicon (1 1 1) dan corning glass. Film dideposisi pada tekanan Argon 500mTorr selama 3 jam. Parameter deposisi film tipis $Ga_2O_3:Zn$ ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Kondisi Film Tipis Ga_2O_3 yang Dideposisi di Atas Substrat silicon (1 1 1) dan corning glass

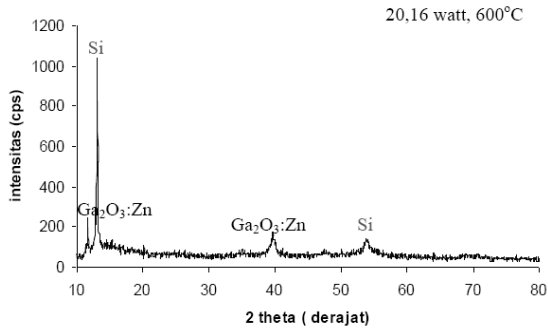
Sampel	Suhu Substrat (°C)	Daya Plasma (watt)
Sampel #A	600	20,16
Sampel #B	635	20,16

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Struktur kristal

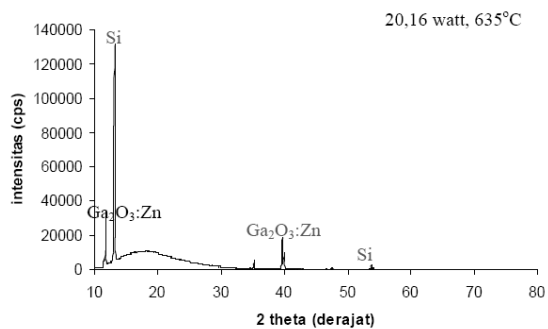
Gambar 1 menunjukkan pola difraksi sinar-X (XRD) film tipis $Ga_2O_3:Zn$ di atas substrat silicon pada suhu substrat 600°C tekanan argon 500 mTorr, daya plasma 20.16 Watt, dan waktu deposisi 3 jam. Hasil difraktogram XRD telah diidentifikasi dengan data JCPDS untuk struktur polikristal yang tumbuh. Film tipis $Ga_2O_3:Zn$ sampel A menunjukkan peak Ga_2O_3 pada arah (0 1 2) dan (2 1 10) masing-masing dengan sudut $2\theta = 11,65^\circ$ dan $2\theta = 39,66^\circ$ (JCPDS 06-0503), Peak difraksi Si dengan arah

orientasi (1 1 1) dan (4 4 4) juga teramati pada sudut $2\theta = 13,10^\circ$ dan $2\theta = 53,85^\circ$ (JCPDS 01-0787).



Gambar 1. Hasil XRD film tipis Ga₂O₃:Zn dalam kurva difraktogram dengan variasi suhu substrat 600oC diatas substrat

Gambar 2 menunjukkan pola difraksi sinar-X (XRD) film tipis Ga₂O₃:Zn di atas substrat silicon pada suhu substrat 635oC tekanan argon 500 mTorr, daya plasma 20.16 Watt dan waktu deposisi 3 jam. Film tipis Ga₂O₃:Zn (sampel B) memiliki peak Ga₂O₃ pada arah (0 1 2) dan (2 1 10) sudut $2\theta = 11,70^\circ$ dan $2\theta = 39,70^\circ$ (JCPDS 06-0503) dengan intensitas yang jauh lebih besar dibandingkan dengan film tipis yang ditumbuhkan dengan suhu 600oC. Peak substrat silicon juga ditemukan pada orientasi (1 1 1) dan (4 4 4) dengan sudut difraksi $2\theta = 13,10^\circ$ dan $2\theta = 53,80^\circ$ (JCPDS 01-0787).



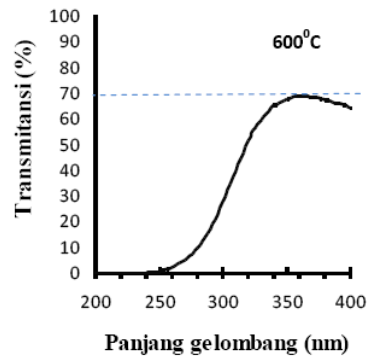
Gambar 2. Hasil XRD film tipis Ga₂O₃:Zn dalam kurva difraktogram dengan variasi suhu substrat 635oC diatas substrat

Dari perhitungan yang telah dilakukan, diketahui bahwa ukuran grain pada penumbuhan temperatur 6000C adalah 0,0922 μ m/butiran sedangkan ukuran grain untuk penumbuhan pada temperatur 6350C adalah 0,0935 μ m/butiran. Selain mengetahui struktur kristal, dari hasil karakterisasi dengan XRD juga diketahui nilai full width at half maximum (FWHM). Semakin kecil nilai FWHM semakin baik kualitas kristal, sehingga semakin kecil strain yang terjadi pada film (Suryanarayana,

1998:84). Nilai FWHM yang semakin kecil menunjukkan bahwa atom-atom yang berdekatan semakin mudah mengatur arah dan panjang ikatannya sendiri.

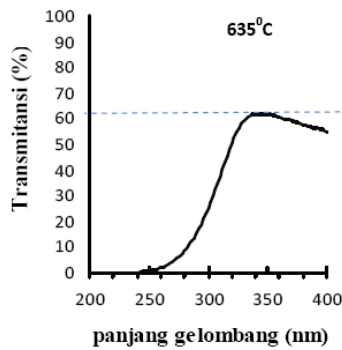
FWHM film Ga₂O₃ pada orientasi (0 1 2), untuk suhu penumbuhan 6000C lebih besar dari film yang ditumbuhkan dengan suhu substrat 6350C. Pada suhu 6000C mempunyai nilai FWHM sebesar 0,14° sedangkan film yang ditumbuhkan pada suhu substrat 6350C mempunyai nilai FWHM sebesar 0,13°. FWHM film Ga₂O₃ pada orientasi (2 1 10), untuk suhu penumbuhan 6000C lebih besar dari film yang ditumbuhkan dengan suhu substrat 6350C. Pada suhu 6000C mempunyai nilai FWHM sebesar 1,1° sedangkan film yang ditumbuhkan pada suhu substrat 6350C mempunyai nilai FWHM sebesar 0,30°. Pada film yang tumbuh dengan orientasi kristal, derajat kualitas kristal sampel B lebih baik dibandingkan sampel A. Hal ini menunjukkan bahwa hasil dari film tipis yang ditumbuhkan pada suhu 6350C mempunyai struktur kristal yang baik daripada suhu 6000C.

2. Transmittansi Optik



Gambar 3. Grafik transmittansi film tipis Ga₂O₃:Zn yang ditumbuhkan dengan suhu 600oC

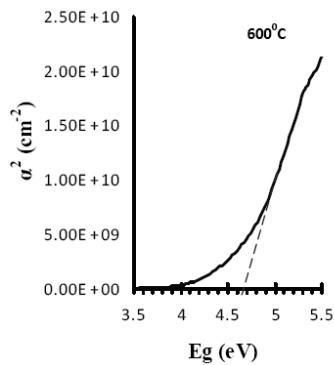
Gambar 3 menunjukkan spektrum transmittansi film Ga₂O₃ yang dideposisikan pada suhu 600oC nampak adanya perubahan transmittansi pada panjang gelombang 250 nm yang merupakan daerah panjang gelombang cahaya tampak. Transmittansi optik film tipis yang ditumbuhkan dengan suhu 600oC adalah sekitar 70%.



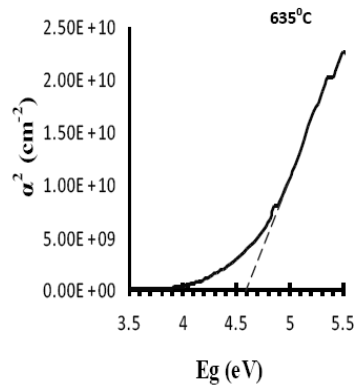
Gambar 4. Grafik transmitansi film tipis Ga2O3:Zn yang ditumbuhkan dengan suhu 635oC

Film tipis yang ditumbuhkan dengan suhu 635oC (gambar 4.) mempunyai transmitansi optik yang lebih kecil dibandingkan dengan film tipis yang ditumbuhkan pada suhu 600oC. Pada film tipis yang ditumbuhkan pada suhu 635oC mempunyai transmitansi optik sekitar 60%. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan suhu substrat akan memperbesar ukuran grain. Ukuran grain yang semakin besar maka semakin rapat juga struktur kristalnya sehingga memperkecil transmitansi optiknya.

Spektrum absorpsi menunjukkan besarnya serapan optik film tipis Ga2O3:Zn terhadap energi foton gelombang yang melewatinya. Plot kuadrat absorpsi optik (α^2) terhadap energi foton dari dua sampel film tipis berbeda ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6. Material Ga2O3:Zn mempunyai celah pita energi langsung (direct bandgap). Celah pita energi pada film tipis Ga2O3:Zn yang ditumbuhkan dengan perbedaan suhu substrat ditentukan dengan mengekstrapolasi grafik spektrum absorpsi. Besarnya celah pita energi lapisan tipis Ga2O3:Zn yang ditumbuhkan pada suhu 600oC sebesar 4,65 eV. Sedangkan film tipis yang ditumbuhkan pada suhu 635oC didapat celah pita energi sebesar 4,60 eV sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. dan 6.



Gambar 5. Grafik kuadrat koefisien absorpsi terhadap energi foton film Ga2O3:Zn yang ditumbuhkan pada suhu 600oC



Gambar 6. Grafik kuadrat koefisien absorpsi terhadap energi foton film Ga2O3:Zn yang ditumbuhkan pada suhu 635oC

Secara teoritis telah dikaji besarnya celah pita energi dari bahan pure Ga2O3 besarnya adalah 2,71 eV (Gotham, et al., 2005), sedangkan secara eksperimen besarnya bervariasi bergantung pada kondisi penumbuhan dan substrat yang digunakan. Film yang ditumbuhkan di atas fased-silicon disk dengan metode electron beam evaporation dengan aliran oksigen mempunyai celah pita energi 4,4 eV (Passlack, et al., 1995) dan menumbuhkan film Ga2O3 dengan metode floating zone menunjukkan celah pita energi sebesar 4,8 eV (Villora, et al., 2001).

Studi sifat optik lapisan tipis Ga2O3:Zn dapat dinyatakan dalam Tabel 2. Terlihat pada saat temperatur substrat 600oC, film tipis Ga2O3:Zn yang ditumbuhkan diatas substrat silikon mempunyai harga celah pita energi (E_g) sekitar 4,65 eV paling mendekati harga celah pita energi referensi Ga2O3 sekitar 4,8 eV dibandingkan dengan film tipis yang ditumbuhkan pada suhu 635oC. Pergeseran harga celah pita energi yang kecil, berhubungan dengan penambahan kerapatan pembawa berupa ZnO. Tingkat kristalinitas yang baik dengan penambahan ukuran butiran juga mempengaruhi pergeseran celah pita energi.

Tabel 2. Hasil Karakterisasi Sifat Optik Film Tipis Ga2O3:Zn dengan Spektrometer

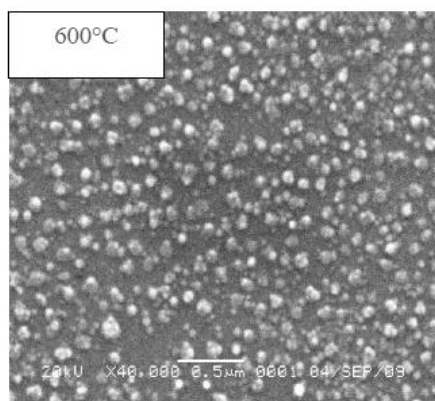
Sampel	Suhu (°C)	Daya Plasma (watt)	Energy Gap (E_g) Ev
A	600	20,16	4.65
B	635	20,16	4.60

Hasil perhitungan celah pita energi lapisan tipis Ga2O3:Zn dalam sampel A memiliki pergeseran harga celah pita energi sekitar 0,15 eV dibandingkan sampel B, harga tersebut bisa dikatakan harga celah pita energi sampel A dan sample B relatif sama. Dari penelitian yang sudah dilakukan dengan dc

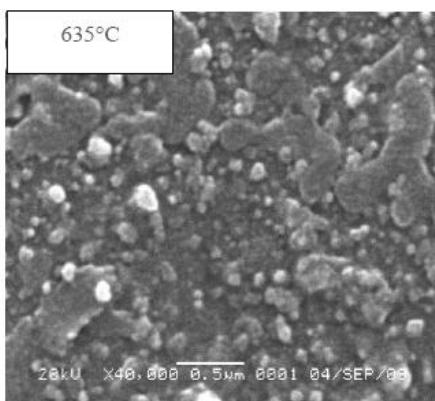
magnetron sputtering, menunjukkan film Ga₂O₃ dapat tumbuh dan mempunyai celah pita energi sebesar 3,4 eV (Marwoto, et al., 2012). Setelah didoping dengan ZnO murni yang mempunyai celah pita energi 3,3 eV (Ma, et al., 2007) hasil menunjukkan bahwa celah pita energi berkisar 4,60 eV, hal ini karena efek Burstein-Moss (Ma, et al., 2007).

3. Struktur Morfologi

Struktur mikro dan grain size lapisan tipis dapat diketahui dengan SEM. Struktur mikro lapisan tipis bergantung pada kinematika penumbuhan yang dipengaruhi oleh temperatur substrat, sifat kimia dan gas lingkungan (Wasa et al, 1992). Energi kinetik dapat mengontrol mode penumbuhan dan nucleasi, mode penumbuhan yang bisa langsung diidentifikasi adalah Frank-van der Merwe (FM) yaitu proses penumbuhan lapisan yang halus/thin film. Gambar 7 dan 8 memperlihatkan citra SEM permukaan film tipis Ga₂O₃:Zn dengan variasi suhu substrat.



Gambar 7. Citra SEM film tipis Ga₂O₃:Zn yang ditumbuhkan pada suhu 600oC



Gambar 8. Citra SEM film tipis Ga₂O₃:Zn yang ditumbuhkan pada suhu 635oC

Pada citra SEM Gambar 7. teramati bahwa film yang ditumbuhkan dengan suhu 600oC mempunyai morfologi yang rata dengan butiran-butiran kecil. Dengan energi kinetik yang rendah, atom-atom yang tersputter menumbuk substrat secara kontinu diimbangi dengan sebagian atom-atom pada substrat yang lepas. Pada citra SEM Gambar 8 teramati bahwa film yang ditumbuhkan dengan suhu 635oC mempunyai ukuran butir (grain size) yang lebih besar dengan morfologi surface tidak rata menghasilkan large islands. Islands yang besar muncul karena energi kinetik yang besar, akibat meningkatnya laju atom yang tersputter menuju substrat sehingga sebelum sebagian atom-atom yang menempel pada permukaan substrat terlepas, sudah datang atom-atom yang tersputter menuju substrat.

Hal ini menunjukkan bahwa penambahan suhu substrat pada proses penumbuhan film tipis Ga₂O₃:Zn sangat berpengaruh terhadap sifat morfologi yang dihasilkan. Kristalinitas lapisan tipis sebanding dengan bertambahnya ukuran butir. Ini berarti bahwa semakin besar grain size dari suatu morfologi film kualitas kristalnya semakin baik. Film yang ditumbuhkan pada suhu substrat 6350C mempunyai ukuran butir (grain size) yang lebih besar dibandingkan dengan suhu substrat 6000C. Rapat nuklesi dan ukuran inti rata-rata bergantung pada sejumlah parameter seperti energi atom yang datang, laju tumbukan, difusi termal, temperatur, topografi, sifat kimia substrat dan lingkungan.

Film yang ditumbuhkan dengan suhu 6000C mempunyai morfologi permukaan yang lebih rata dengan butiran-butiran kecil dengan nilai FWHM sebesar 0,140 sedangkan film yang ditumbuhkan dengan suhu 6350C mempunyai morfologi permukaan yang tidak rata dengan butiran-butiran lebih besar dengan nilai FWHM sebesar 0,130.

SIMPULAN

Lapisan tipis Ga₂O₃:Zn telah berhasil ditumbuhkan pada substrat silicon (1 11) dan corning glass dengan menggunakan metode dc magnetron sputtering pada temperatur 600oC dan 635oC. Penambahan suhu substrat selama proses penumbuhan lapisan tipis Ga₂O₃:Zn mempengaruhi struktur kristal lapisan tipis yang dihasilkan. Semakin besar suhu substrat yang diberikan, maka struktur permukaan akan menghasilkan large islands, karena terjadi penumpukan atom pada substrat tetapi mempunyai kualitas kristal yang baik dan grain size yang besar. Telah didapat peak Ga₂O₃ (0 1 2) dan (2 1 10) dan peak silicon (1 1 1) dan (4 4 4). Celah pita energi yang hampir sama 4,65eV dan 4,60eV dengan

nilai transmitansi 70% dan 60% untuk masing-masing suhu 600°C dan 635°C.

DAFTAR PUSTAKA

Bene, R., Pinter, Z., Perczel, I.V., Fleischer, M., Reti, F. 2001. High-temperature semiconductor gas sensors. Elsevier. Vacuum 61, p. 275-278.

Gotham, S., Deshpande, M., Costales, A., and Pandey, R. 2005. Structural, Energetic, Electronic, Bonding, and Vibrational Properties of Ga₃O, Ga₃O₂, Ga₃O₃, Ga₂O₃, and GaO₃ Cluster. J. Phys. Chem. B. 109, p. 14836-14844.

Hoefler, U., Frank, J., Fleisher, M. 2001. High temperature Ga₂O₃ gas sensors and SnO₂ gas sensors: a comparison. sens. Actuators B 78, p.6.

Hosono, H., Ohta, H., Orita, M., Ueda, K., Hirano, M. 2002. Frontier of transparent conductive oxide thin films. Elsevier. Vacuum 66, p. 419-425.

Lee, C.T., Lee, H.Y., and Chen, H.W. 2003. GaN MOS Device Using SiO₂-Ga₂O₃ insulator grown by Photoelectrochemical Oxidation Method. IEEE. Electron device lett. 24(2): 54-56.

Li, Y., Trinchi, A., Wlodarski, W., Galatsis, K., Kalantar-zadeh, K. 2003. Investigation of the oxygen gas sensing performance of Ga₂O₃ thin films with different dopants. Elsevier. Sensor and Actuator B 93, p. 431-434.

Ma, QB., Ye, ZZ., He, HP., Zhu, LP., Zhao, BH. 2007. Effect of deposition pressure on the properties of transparent conductive ZnO:Ga film prepared by DC reactive magnetron sputtering. Elsevier. Material science in semiconductor processing 10, p. 167-172

Marwoto, P., Sugianto, Wibowo, E., 2012. Growth of europium-doped gallium oxide (Ga₂O₃:Eu) thin films deposited by homemade DC magnetron sputtering. SpringerOpen Jurnal. Journal of Theoretical and Applied Physics. 6:17

Ogita, M., Ohta, H., Hirano, M., and Hosono, H. 2000. Deep-ultraviolet transparent conductive □-Ga₂O₃ thin films. Appl. Phys. Lett. 77, p. 4166.

Ogita, M., Higo, K., Nakanishi, Y., Hatanaka, Y. 2001. Ga₂O₃ thin film for oxygen sensor at high

temperature. Elsevier. Applied Surface Science 175-176, p.721-725.

Passlack, M., Schubert, E.F., Hong, M., Moriya, M., Chu, S.N.G., Konstadinidis, K., Mannaerts, J.P., Schnoes, M.L., and Zydzik, G.J. 1995. Ga₂O₃ film for oxygen sensor at high temperature. Appl Surface Lett. 82, p.686.

Suryanarayana, C. and G.M. Nirton. 1998. X-ray Diffraction A Partical Approach. New York: Plenum Press.

Trinchi, A., Li, Y.X., Wlodarski, W., Kaciulis, S., Pandolfi, L., Russo, S.P., Duplessis, J., Viticoli, S. 2003. Investigation of sol-gel-prepared Ga-Zn oxide thin films for oxygen gas sensing. Elsevier. Sensors and Actuators A 108, p. 263-270.

Trinchi, A., Kaciulis, S., Pandolfi, L., Ghantasala M. K., Li, Y. X., Wlodarski W., Viticoli, S., Comini, E., Sberveglieri, G. 2004. Characterization of Ga₂O₃ based MRISiC hydrogen gas sensors. Elsevier. Sensor and Actuators B.

Trinchi, A., Wlodarski, W., Li, Y. X., 2004. Hydrogen sensitive Ga₂O₃ Schottky diode sensor based on SiC. Elsevier. Sensors and Actuators B 100, p. 94-98

Villora, E.G., Atou, T., Sekiguchi, T., Sugawara, T., Kikuchi, M., and Fukuda, T. 2001. Cathodeluminescence of undoped □-Ga₂O₃ single crystals. Solid Stated Comunn. 120, p.455.

Villora, E.G., Hatanak, K., Odaka, H., Sugawara, T., Miura, T., Fukumura, H., Fukuda, T. 2003. Luminescence of undoped □-Ga₂O₃ single crystals excited by picosecond X-ray and sub-picosecond UV pulses. Solid Stated Comunn. 127, p.385.

Wasa, K. And Hayakawa, S. 1992. Handbook Of Sputter Deposition Technology: Principles, Technology and Application. Park Ridge. New Jersey: Notes Publication. 49-85.