

Pengaruh Variasi Temperatur Uji ZEM-3 pada Properti Termoelektrik Lapisan Tipis Ti-doped ZnO

Mujtahidatul Alawiyah^a, Athorn Vora-Ud^b, Somporn Thaowankeaw^b, Tosawat Seetawan^b, Melania Suweni Muntini^a, dan Iim Fatimah^a

^aDepartemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

^bThermoelectric Research Laboratory, Center of Excellence on Alternative Energy, Research and Development Institution, Sakon Nakhon Rajabhat University, 680 Nittayo Rd, Mueang District, Sakon Nakhon 47000, Thailand

email: melania.muntini@gmail.com

Abstrak—Lapisan tipis Ti-doped ZnO berhasil difabrikasi pada substrat kaca SiO₂ dengan menggunakan metode DC Magnetron Sputtering. Proses sputtering dilakukan dalam waktu 30 menit dan dengan tegangan sebesar 339-349 Volt. Lapisan tipis yang terbentuk memiliki ketebalan 241.287 nm. Uji properti termoelektrik dilakukan pada temperatur 310 K, 373 K, 423 K, 473 K, 523 K, 573 K, dan 623 K. Hasilnya, nilai resistivitas listrik lapisan tipis menurun hingga 523 K, dengan nilai resistivitas terendahnya adalah 0.446 ρ (mΩ m). Nilai koefisien Seebeck yang dihasilkan adalah minus menandakan bahwa lapisan tipis merupakan semikonduktor tipe n. Nilai koefisien Seebeck selalu meningkat seiring dengan pertambahan temperatur. Semakin tinggi temperatur yang diberlakukan pada material semikonduktor, maka makin tinggi pula faktor dayanya. Faktor daya paling tinggi terjadi pada temperatur 573 K dengan 32 μWm⁻¹K².

Kata Kunci—Properti Termoelektrik, Ti-doped ZnO, Uji ZEM-3

I. PENDAHULUAN

ENERGI sangat diperlukan dalam menjalankan kegiatan ekonomi, baik untuk kebutuhan konsumsi maupun untuk kegiatan produksi. Sebagai sumber daya alam, energi harus dimanfaatkan sebanyak mungkin untuk kemakmuran masyarakat dan pengelolaannya harus mengacu pada prinsip pembangunan berkelanjutan. Sayangnya, pasokan energi dari minyak, gas, dan batu bara hanya cukup untuk beberapa dekade, sementara kegiatan industri yang membutuhkan energi ini akan terus tumbuh dari tahun ke tahun [1]. Untuk mengatasi masalah energi, salah satu sumber energi alternatif yang saat ini sedang dikembangkan adalah konversi energi panas menjadi listrik, yaitu termoelektrik. Pemanfaatan energi panas menjadi energi listrik masih memiliki tingkat efisiensi yang rendah (5-8%). Peningkatan efisiensi termoelektrik dapat dilakukan dengan peningkatan kualitas materialnya. Material terbaik untuk meningkatkan efisiensi termoelektrik harus memiliki nilai *figure of merit* mendekati satu ($ZT \sim 1$) [2].

Termoelektrik dibuat dengan menggunakan material semikonduktor. Material semikonduktor sendiri yaitu bahan yang pita valensinya hampir penuh, sedangkan pita konduksinya hampir kosong dan celah energi yang memisahkan keduanya sangat kecil, sekitar 3 eV [3].

Dalam penelitian ini, ZnO dipilih sebagai material lapisan tipis. ZnO adalah semikonduktor celah pita lebar tipe-n (3,21

eV pada temperatur kamar) dan memiliki sifat elektronik, optik, dan fotonik yang sangat baik [4]. Material ZnO dapat ditumbuhkan pada temperatur substrat yang relatif rendah sekitar 200-400°C [5]. Selain itu juga memiliki stabilitas termal yang tinggi pada temperatur tinggi. Konduktivitas listrik umumnya ditingkatkan dengan melakukan proses doping. Dalam kasus tersebut, elektron bebas dihasilkan dan konsentrasi pembawa meningkat. Lapisan tipis ZnO yang tidak terdoping memiliki sifat listrik yang tidak stabil karena ketahanan lembaran dari film-film tersebut bervariasi. Untuk mengurangi kekurangan tersebut, banyak peneliti telah menyelidiki bagaimana sifat listrik dan optik film ZnO dimanipulasi oleh doping [6]. Oleh karena itu, ZnO yang di-doping Titanium (Ti) dipilih untuk mengontrol konduktivitas listrik dan termal secara independen. Ketika ZnO didoping dengan elemen yang memiliki jari-jari ionik yang sangat berbeda dibandingkan dengan Zn²⁺ (0,74 Å), struktur wurtzit heksagonal dapat terdistorsi, menghambat kristalisasi, dan mengurangi mobilitas, yang mempengaruhi karakteristik kelistrikan material. Di sisi lain, ketika ion dengan jari-jari yang mirip dengan Zn²⁺ digunakan sebagai dopan, distorsi kisi dapat diperkecil dan membatasi penurunan mobilitas. Konduktivitas listrik dapat dimaksimalkan. Dalam penelitian ini, Ti terpilih sebagai dopan untuk lapisan tipis ZnO karena Ti⁴⁺ memiliki jari-jari ionik 0,68 Å, yang sangat mirip dengan Zn²⁺ [4].

Bentuk dari termoelektrik sendiri dapat berupa *bulk* termoelektrik maupun berupa lapisan tipis (*thin film*). Lapisan tipis adalah ilmu yang cukup baru, tetapi di bidang seni merupakan salah satu teknologi tertua. Saat ini lapisan tipis diproduksi untuk berbagai aplikasi dalam lapisan optik, listrik, dan termal [7]. Lapisan tipis dapat dibuat dari bahan organik, anorganik, logam, dan non-logam [8]. Lapisan tipis adalah lapisan bahan dengan ketebalan mulai dari beberapa nanometer (~nm) hingga beberapa micrometer [9]. Pertumbuhan lapisan tipis sebagian besar dilakukan oleh berbagai metode termasuk *Close Space Sublimation* (CSS), *Vapor Transport Deposition* (VTD), *Physical Vapor Deposition* (PVD), *Chemical Vapor Deposition* (CVD), *Molecular Beam Epitaxy* (MBE) dan *sputtering* [10]. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah DC Magnetron Sputtering karena mudah dikendalikan dan murah [11]. Gambar mesin DC Magnetron Sputtering ada pada gambar 1.

Pada proses deposisi lapisan tipis dengan metode DC



Gambar 1. Mesin DC Magnetron Sputtering.

Magnetron *Sputtering*, Bahan target dalam proses DC Magnetron *Sputtering* ditempatkan sejajar dengan substrat dalam ruang vakum pada jarak tertentu. Material target melekat pada katoda sebagai bias negatif, sedangkan substrat melekat pada anoda sebagai bias positif. Ruang vakum diatur pada *base pressure* untuk menghilangkan udara yang tidak diinginkan, seperti H₂O dan H₂, kemudian diganti dengan gas *sputtering*. Gas *sputtering* pada umumnya adalah gas *inert* seperti argon (Ar). Gas *inert* dengan kemurnian tinggi mampu memberikan energi kinetik yang besar. Awalnya muatan negatif diarahkan ke target yang menimbulkan plasma atau muatan ringan dan proses *sputtering* dimulai. Ion gas positif berkecepatan tinggi, yang merupakan ion A⁺, terionisasi di wilayah plasma. Ion-ion ini tertarik ke material target yang bias negatif dan bertabrakan dengan plasam menyebabkan perpindahan momentum. Atom-atom ini mengendap sebagai lapisan tipis pada permukaan substrat yang terhubung dengan elektroda positif [12].

Properti termoelektrik sendiri terdiri dari nilai resistivitas material, koefisien Seebeck, dan faktor daya yang dimiliki material semikonduktor. Resistivitas sendiri merupakan kemampuan suatu bahan dalam menghantarkan arus listrik. Semakin besar resistivitasnya, maka semakin rendah konduktivitasnya, resistivitas dapat dituliskan dalam persamaan:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \tag{1}$$

Di mana, konduktivitas listrik (σ) ditentukan dari konsentrasi pembawa (n), konstanta muatan elektron (1.6×10^{-19} C), dan mobilitas elektron (μ), yang dapat ditulis dengan persamaan:

$$\sigma = ne\mu \tag{2}$$

Nilai koefisien Seebeck yaitu perbandingan antara perbedaan tegangan pada material semikonduktor terhadap perbedaan temperatur pada material tersebut. Koefisien Seebeck dirumuskan dalam persamaan:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \tag{3}$$

dimana S adalah koefisien Seebeck dengan satuan $\mu\text{V/K}$, ΔV adalah besarnya perbedaan tegangan dengan satuan Volt dan ΔT adalah besarnya perbedaan temperatur dengan satuan

Tabel 1.
Kondisi Sputtering Lapisan Tipis Ti-doped ZnO

Parameter	Typical Value
Base Pressure (Torr)	2.1×10^{-3}
Work Pressure (Torr)	9.6×10^{-1}
Ar Flow Rate (sccm)	40
Voltage (Volt)	339-349
Current (mA)	280
Vacuum Chamber Temperatur (°C)	22.7
Deposition Time (minute)	30

Tabel 2.
Perhitungan Ketebalan Lapisan Tipis

Gambar	No	1	2	3	Rata-rata	t (nm)
Gambar 1	x (cm)	0.65	0.65	0.68	0.6600	239.467
	dx (cm)	0.55	0.52	0.54	0.5367	
Gambar 2	x (cm)	0.62	0.64	0.64	0.6333	240.250
	dx (cm)	0.54	0.49	0.52	0.5167	
Gambar 3	x (cm)	0.62	0.63	0.68	0.6433	244.145
	dx (cm)	0.54	0.51	0.55	0.5333	
Rata-rata						241.287

K (Kelvin) [13]. Koefisien Seebeck berpengaruh dalam menghitung performa dari termoelektrik yang diukur dengan kuantitas tak berdimensi yang disebut *figure of merit* (ZT). Nilai *figure of merit* dituliskan dalam persamaan:

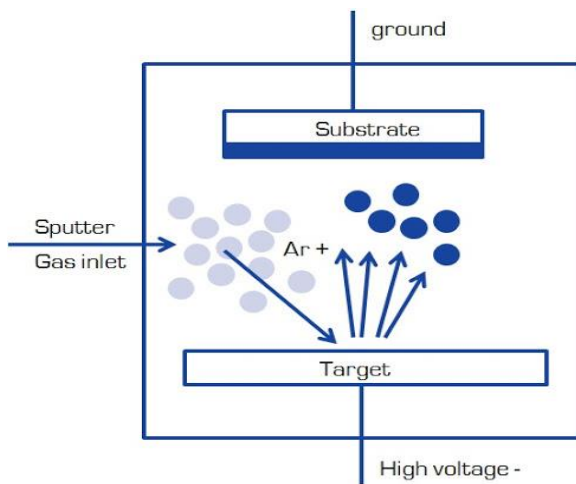
$$ZT = \frac{\sigma TS^2}{K} \tag{4}$$

Di mana σ adalah konduktivitas listrik dengan satuan Siemen/m, S adalah koefisien Seebeck dengan satuan $\mu\text{V/K}$, K adalah konduktivitas termal dengan satuan $\text{W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$ dan T adalah temperatur termoelektrik dengan satuan Kelvin. Material yang memiliki sifat konduktivitas listrik dan konduktivitas termal yang tinggi akan memiliki nilai koefisien Seebeck yang rendah, sedangkan material yang memiliki sifat konduktivitas listrik dan konduktivitas termal yang rendah akan memiliki nilai koefisien Seebeck yang tinggi. Untuk termoelektrik sendiri, dibutuhkan material yang memiliki sifat konduktivitas listrik dan koefisien Seebeck yang tinggi sedangkan sifat konduktivitas termalnya rendah [14].

II. METODE PENELITIAN

A. Alat dan Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah target *Ti-doped ZnO* dengan komposisi $\text{Zn}_{0.99}\text{Ti}_{0.01}\text{O}_{1.01}$, atau dalam rasio ZnO:Ti adalah 99%:1%. Target berasal dari Laboratory of Advanced Materials, University of Science, Vietnam National University. Substrat yang digunakan adalah kaca SiO₂. Alat utama yang digunakan adalah DC Magnetron *Sputtering* sebagai alat untuk deposisi lapisan tipis pada substrat. Mesin DC Magnetron *Sputtering* ditunjukkan pada Gambar 1. Seperangkat Tolansky *apparatus* digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan tipis dengan metode Tolansky. ZEM-3 (ULVAC-RIKO) digunakan untuk mengukur koefisien Seebeck, power factor, dan resistivitas listrik.



Gambar 4. Proses sputtering.

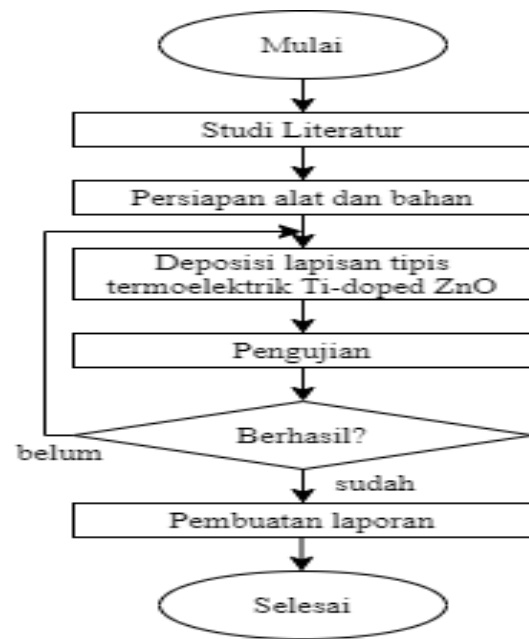
B. Langkah Kerja

Langkah kerja yang dilakukan pada penelitian ini, secara garis besar dibagi menjadi dua bagian. Tahap pertama adalah fabrikasi termoelektrik lapisan tipis tipe n. Tahap kedua adalah uji ketebalan dan properti termoelektrik lapisan tipis. Sebelum dilakukan proses fabrikasi lapisan tipis, dilakukan proses pembersihan substrat kaca terlebih dahulu. Pembersihan dilakukan dengan air dan sabun cuci, kemudian dibilas dengan air suling (*distilled water*). Kemudian substrat dibersihkan lagi dengan aseton dengan digunakannya *ultrasonic cleaner* selama 15 menit. Terakhir, substrat dikeringkan dengan *air compressor*.

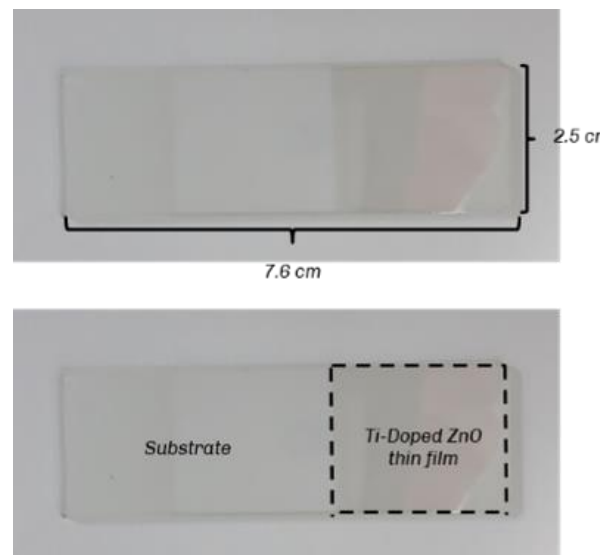
Proses fabrikasi dimulai dengan substrat dan bahan target diletakkan di dalam *vacuum chamber* pada DC Magnetron *Sputtering*. Substrat dipasang pada anoda yang ada dalam *vacuum chamber* dan pada katoda dipasang bahan target. Proses *sputtering* dilakukan selama 30 menit dengan tegangan 339-349 Volt dan dengan *base pressure* 2.1×10^{-3} Pa. Kondisi *sputtering* dapat dilihat pada Tabel 1. Kemudian dilakukan pengujian ketebalan dengan Tolansky *apparatus* dan mesin ZEM-3.

C. Diagram Alir

Diagram alir (*flowchart*) penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian.



Gambar 3. Lapisan tipis hasil proses sputtering.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Deposisi Lapisan Tipis Ti-doped ZnO

Jenis termoelektrik yang dibuat pada penelitian ini adalah termoelektrik lapisan tipis. Kelebihan dari termoelektrik lapisan tipis dibandingkan dengan lapisan tebal (*bulk*) adalah material yang digunakan lebih sedikit daripada lapisan tebal, sehingga dapat melakukan penghematan biaya. Selain itu karena modul yang dibentuk merupakan lapisan tipis, maka modul dapat lebih fleksibel dalam pengaplikasiannya.

Pada penelitian ini, digunakan substrat kaca SiO₂. Substrat sendiri merupakan tempat tumbuhnya lapisan tipis. Kaca dari material silikon dioksida memiliki konduktivitas termal sebesar 1.4 W/mk [15] dan titik leburnya 1.713⁰C [16], sehingga material tersebut cocok apabila modul diaplikasikan pada temperatur yang tinggi.

Pembentukan termoelektrik lapisan tipis terjadi pada sebuah *vacuum chamber*. Substrat diletakkan pada bagian

anoda dan ditempelkan dengan menggunakan isolasi tembaga agar tidak bergeser dan jatuh ke target yang ada di bawahnya ketika proses *sputtering*. Proses *sputtering* sendiri dilakukan dengan arus searah (DC) di dalam *vacuum chamber*. Pada *vacuum chamber*, terdapat elektroda yang saling berhadapan. Katoda di bagian bawah merupakan tempat meletakkan target, dan anoda di bagian atas yang merupakan tempat meletakkan substrat. Pertama-tama, tekanan diatur hingga mencapai *base pressure* yang dikehendaki, kemudian gas argon netral dimasukkan ke dalam *chamber* sembari diberikan tegangan tinggi, sehingga memunculkan medan listrik dan plasma berwarna ungu. Medan listrik yang tinggi ini juga menyebabkan adanya perpindahan elektron dari katoda menuju anoda. Di dalam perjalanannya, elektron tersebut bertumbukan dengan gas argon dan menghasilkan ion Ar (Ar⁺). Kemudian ion gas Argon menuju katoda dan menumbuk target, maka atom dari target akan terpercik ke luar dan menyebar ke segala arah dan menumbui substrat. Maka terbentuklah lapisan yang sangat tipis. Proses *sputtering* dapat dilihat pada Gambar 3. Sedangkan hasil dari



Gambar 5. Hasil pengamatan dan pengukuran ketebalan lapisan tipis TZO dengan Tolansky Apparatus.



Gambar 6. Alat ZEM-3.

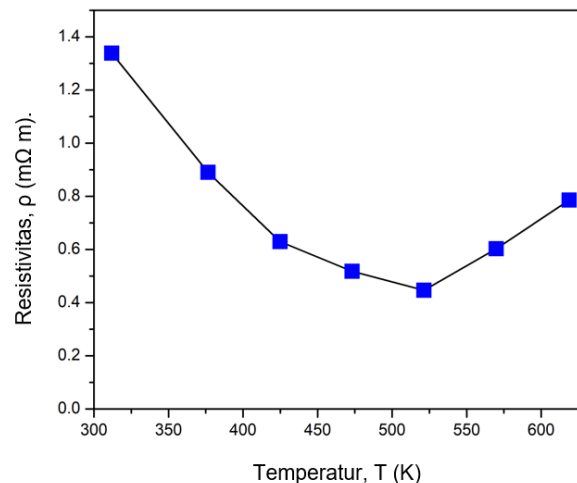
proses *sputtering* lapisan tipis *Ti-doped ZnO* dapat dilihat pada Gambar 4. Masing-masing ukuran yang terbentuk disesuaikan dengan uji yang dilakukan, seperti yang telah dijelaskan. *Sputtering* yang dilakukan menghasilkan lapisan tipis *Ti-doped ZnO* yang transparan.

B. Uji Ketebalan Lapisan Tipis

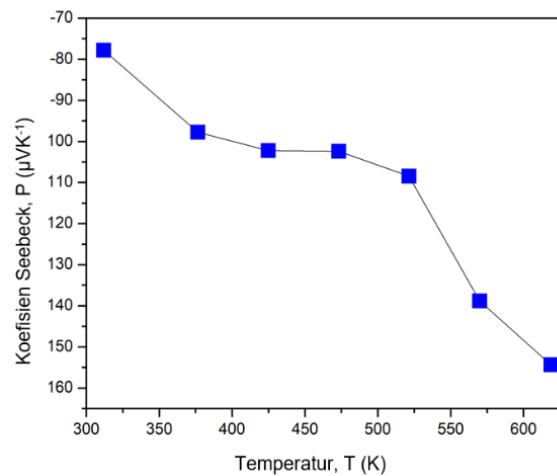
Setelah lapisan tipis terbentuk, maka dilakukan pengukuran ketebalannya. Pengukuran ketebalan lapisan tipis dilakukan dengan seperangkat alat bernama Tolansky apparatus. Tolansky apparatus merupakan serangkaian mikroskop dengan cahaya lampu natrium (Na) atau sodium. Pengukuran yang dilakukan akan menghasilkan pola gelap terang. Panjang gelombang cahaya monokromatik dari reaksi unsur Na lampu tersebut adalah 589 nm [17]. Penggunaan lampu Natrium (Na) dilakukan karena cahaya kuning yang dihasilkan memiliki dispersi minimum [17], sehingga menghasilkan cahaya yang terang dan dapat menghasilkan gambar dengan kontras yang tinggi. Penggunaan cahaya ini dapat memperjelas hasil pola gelap terang yang terbentuk. Pengambilan gambar dari pola gelap terang yang terbentuk dilakukan tiga kali dengan kamera secara manual dan perhitungan ketebalannya dilakukan dengan aplikasi Microsoft Power Point. Gambar pola gelap terang dapat dilihat di dalam Gambar 5. Pada gambar tersebut, dapat dilihat bahwa terdapat tiga garis yang lebarnya diambil sebagai bahan perhitungan. Persamaan Tolansky dapat ditulis dengan:

$$t = \left[\frac{\Delta X}{X} \right] \cdot \left[\frac{\lambda}{2} \right] \quad (5)$$

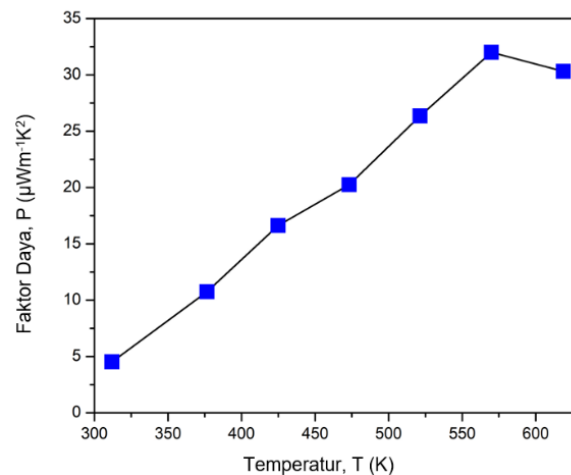
Nilai X menunjukkan lebar pola gelap terang yang terbentuk, dan nilai ΔX merupakan pergeseran pola gelap terang yang terbentuk. Masing-masing dari ketiga nilai tersebut dirata-rata, begitu juga pada dua gambar yang lainnya. Lalu dilakukan perhitungan dengan persamaan Tolansky dengan panjang gelombang yang digunakan adalah



Gambar 7. Resistivitas listrik lapisan tipis *Ti-doped ZnO*.



Gambar 8. Koefisien Seebeck lapisan tipis *Ti-doped ZnO*.



Gambar 9. Faktor daya lapisan tipis *Ti-doped ZnO*.

589 nm. Hasil perhitungan ketebalan lapisan tipis dapat dilihat pada Tabel 2.

Ketebalan lapisan tipis *Ti-doped ZnO* yang terbentuk adalah 241.287 nm. Angka tersebut sangat kecil dan termasuk ke dalam lapisan tipis, karena lapisan tipis memiliki ketebalan berorde mikrometer hingga nanometer [9]. Ketebalan lapisan tipis yang dihasilkan ini bergantung pada lamanya proses *sputtering*. Semakin lama proses *sputtering*, maka atom-atom target yang tumbuh di atas substrat juga makin banyak dan akan mempertebal lapisan tipis yang dihasilkan. Uji Properti Termoelektrik lapisan Tipis

Uji ZEM-3 dilakukan untuk mengetahui resistivitas, faktor daya, dan koefisien Seebeck dari lapisan tipis Ti-doped ZnO yang telah dibuat. Gambar alat ZEM-3 dapat dilihat pada Gambar 6. Temperatur yang digunakan adalah 310 K, 373 K, 423 K, 473 K, 523 K, 573 K, dan 623 K. Hasil dari uji ZEM-3 yang pertama berupa data resistivitas yang ditunjukkan pada Gambar 7. Dari Gambar tersebut, dapat dilihat bahwa semakin besar temperatur yang dikenai pada material semikonduktor, maka makin rendah resistivitasnya. Resistivitas mengalami penurunan dalam temperatur ruang hingga 523 K. Dan resistivitas terendah berada pada temperatur 523 K dengan nilai 0.446ρ ($m\Omega m$). Lebih dari temperatur tersebut, analisis resistivitas tidak dapat dilakukan karena keterbatasan ketahanan substrat.

Pada penelitian ini juga dilakukan uji koefisien Seebeck (S). Koefisien Seebeck merupakan besaran yang sangat penting dalam penelitian ini, karena nilai koefisien Seebeck dapat menentukan performa termoelektrik yang dihasilkan. Pada pengukuran koefisien Seebeck, dua elektroda diletakkan di antara sampel. Elektroda pada bagian bawah akan memberi temperatur yang panas, sehingga akan ada perbedaan temperatur untuk mendapatkan nilai koefisien Seebeck sampel uji. Hasil uji koefisien Seebeck dapat dilihat dalam Gambar 8. Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa nilai koefisien Seebeck negatif. Hal ini terjadi karena pembawa mayoritas semikonduktor tipe n adalah elektron. Elektron bebas tersebut akan menjauhi sisi panas pada pengukuran, sehingga potensial akan lebih besar terjadi pada sisi dingin material. Dari situ juga, dapat dilihat bahwa koefisien Seebeck meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur yang dikenakan. Hal ini sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa koefisien Seebeck berbanding lurus dengan temperatur.

Pengujian yang ketiga adalah faktor daya. Persamaan dari faktor daya adalah:

$$PF = S^2/\rho \quad (6)$$

Di mana S adalah koefisien Seebeck, dan ρ adalah resistivitas. Nilai faktor daya di sini langsung otomatis ditampilkan dari mesin ZEM-3. Nilai koefisien Seebeck yang tertinggi berada pada temperatur 523 K dengan nilai $-108 \mu V K^{-1}$.

Selanjutnya, nilai Faktor daya ditunjukkan pada Gambar 9. Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur yang diberlakukan pada material semikonduktor, maka makin tinggi pula faktor dayanya. Faktor daya paling tinggi terjadi pada temperatur 573 K dengan $32 \mu W m^{-1} K^2$. Kemudian menurun karena keterbatasan ketahanan substrat. Keterbatasan ketahanan material pada properti termoelektrik lapisan tipis diakibatkan oleh interdifusi yang terjadi pada permukaan lapisan tipis. Atom oksigen yang berdifusi melalui nano partikel Ti-doped ZnO mengakibatkan oksidasi nano partikel logam. Oksidasi yang terjadi menurunkan mobilitas dari muatan pembawa (*carrier mobility*) [18].

Terdapat beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan untuk memaksimalkan potensi lapisan tipis Ti-doped ZnO sebagai material termoelektrik, salah satunya adalah dengan menurunkan resistivitasnya. Faktor yang dapat mempengaruhi resistivitas lapisan tipis dapat berupa konsentrasi Ti yang digunakan [19][20], metode deposisi

[21][22], ketebalan lapisan tipis yang dihasilkan [23], dan temperature annealing [23][24].

IV. KESIMPULAN

Lapisan tipis Ti-doped ZnO telah berhasil dibuat dengan menggunakan metode DC Magnetron *Sputtering*. Lapisan tipis yang dibuat dengan melakukan *sputtering* selama 30 menit ini memiliki ketebalan 241.287 nm. Pada penelitian ini, nilai resistivitas listrik lapisan tipis menurun hingga 523 K, dengan nilai resistivitas terendahnya adalah 0.446ρ ($m\Omega m$). Nilai koefisien Seebeck yang dihasilkan bertanda negatif menandakan bahwa lapisan tipis Ti-doped ZnO merupakan semikonduktor tipe n. Nilai koefisien Seebeck selalu meningkat seiring dengan pertambahan temperatur. Serta semakin tinggi temperatur yang diberlakukan pada material semikonduktor, maka makin tinggi pula faktor dayanya. Faktor daya paling tinggi terjadi pada temperatur 573 K dengan $32 \mu W m^{-1} K^2$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] EIA, *International energy outlook 2019 (IEO2019)*. Washington, DC 20585: U.S. Energy Information Administration, 2019.
- [2] Y. Yin, B. Tudu, and A. Tiwari, "Recent advances in oxide thermoelectric materials and modules," *Vacuum*, vol. 146, pp. 356–374, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.vacuum.2017.04.015.
- [3] J. William D. Callister and D. G. Rethwisch, *Fundamental of Material Science and Engineering: An Integrated Approach*, 4th ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2012.
- [4] M. H. Hong *et al.*, "Ti doping effects on the seebeck coefficient and electrical conductivity of mesoporous ZnO thin film," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 235, 2019, doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.121757.
- [5] R. L. Hoffman, B. J. Norris, and J. F. Wager, "ZnO-based transparent thin-film transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 5, pp. 733–735, 2003, doi: 10.1063/1.1542677.
- [6] H. Chen, J. Ding, F. Shi, Y. Li, and W. Guo, "Optical properties of ti-doped ZnO films synthesized via magnetron sputtering," *J. Alloys Compd.*, vol. 534, pp. 59–63, 2012, doi: 10.1016/j.jallcom.2012.04.064.
- [7] J. Bohlmark, J. Alami, C. Christou, A. P. Ehasarian, and U. Helmersson, "Ionization of sputtered metals in high power pulsed magnetron sputtering," *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 23, no. 1, pp. 18–22, 2005, doi: 10.1116/1.1818135.
- [8] S. Sudjatmoko, W. Wirjoadi, and B. Siswanto, "Influence of substrate temperature on structural, electrical and optical properties of ZnO: Al thin films," *Atom Indones.*, vol. 35, no. 2, pp. 115–125, 2011, doi: 10.17146/aij.2009.50.
- [9] K. L. Chopra, P. D. Paulson, and V. Dutta, "Thin-film solar cells: an overview," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 12, no. 23, pp. 69–92, 2004, doi: 10.1002/ppp.541.
- [10] B. E. McCandless, S. S. Hegedus, R. W. Birkmire, and D. Cunningham, "Correlation of surface phases with electrical behavior in thin-film cde devices," *Thin Solid Films*, vol. 431–432, pp. 249–256, 2003, doi: 10.1016/S0040-6090(03)00266-9.
- [11] A. Vora-Ud, W. Somkhunhot, and T. Seetawan, "Electronic structure of Ge-Sb-Te system calculated by DV-X α method," *Integr. Ferroelectr.*, vol. 155, no. 1, pp. 52–58, 2014, doi: 10.1080/10584587.2014.905149.
- [12] W. Gao and Z. Li, "ZnO thin films produced by magnetron sputtering," *Ceram. Int.*, vol. 30, no. 7, pp. 1155–1159, 2004, doi: 10.1016/j.ceramint.2003.12.197.
- [13] J. Hwang *et al.*, "More than half reduction in price per watt of thermoelectric device without increasing the thermoelectric figure of merit of materials," *Appl. Energy*, vol. 205, pp. 1459–1466, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.080.
- [14] C. Suter, P. Tomeš, A. Weidenkaff, and A. Steinfeld, "Heat transfer and geometrical analysis of the thermoelectric converters driven by concentrated solar radiation," *Materials (Basel)*, vol. 3, pp. 2735–2752, 2010, doi: 10.3390/ma3042735.
- [15] M. L. Reed and G. K. Fedder, "2. Photolithographic Microfabrication," in *Handbook of Sensors and Actuators*, vol. 6, Elsevier, 1998, pp. 13–61.
- [16] J. Yates, "Book review," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 84, no. 5, p. 416,

- 2006, doi: 10.1205/cherd.br.0605.
- [17] X. Huo *et al.*, "Research development of 589 nm laser for sodium laser guide stars," *Optics and Lasers in Engineering*. Elsevier Ltd, Tianjin, 300401, China, 2020, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106207.
- [18] J. W. Jeon *et al.*, "Effect of annealing temperature on optical band-gap of amorphous indium zinc oxide film," *J. Alloys Compd.*, vol. 509, no. 41, pp. 10062–10065, 2011, doi: 10.1016/j.jallcom.2011.08.033.
- [19] Y. M. Lu, C. M. Chang, S. I. Tsai, and T. S. Wey, "Improving the conductance of ZnO thin films by doping with Ti," in *Thin Solid Films*, 2004, pp. 56–60, doi: 10.1016/j.tsf.2003.09.022.
- [20] Z. Y. Zhong and T. Zhang, "Microstructure and optoelectronic properties of titanium-doped ZnO thin films prepared by magnetron sputtering," *Mater. Lett.*, vol. 96, pp. 237–239, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.matlet.2013.01.025.
- [21] Z.-Y. Ye *et al.*, "Structural, electrical, and optical properties of Ti-doped ZnO films fabricated by atomic layer deposition," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 8, no. 1, p. 108, Feb. 2013, doi: 10.1186/1556-276X-8-108.
- [22] P. S. Shewale and Y. S. Yu, "H₂S gas sensing properties of undoped and Ti doped ZnO thin films deposited by chemical spray pyrolysis," *J. Alloys Compd.*, vol. 684, pp. 428–437, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.05.178.
- [23] H. P. Chang, F. H. Wang, J. C. Chao, C. C. Huang, and H. W. Liu, "Effects of thickness and annealing on the properties of Ti-doped ZnO films by radio frequency magnetron sputtering," in *Current Applied Physics*, Jan. 2011, vol. 11, no. 1 SUPPL., pp. S185–S190, doi: 10.1016/j.cap.2010.11.110.
- [24] W. Chao-Moo, A. Vora-Ud, S. Thaowankaew, P. Muthitamongkol, and T. Seetawan, "Effect Of Annealing Treatment On Thermoelectric Properties Of Ti-Doped Zno Thin Film," in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2010, doi: 10.1063/1.5053189.