



Pengaruh Tekanan Spray terhadap Sifat Optik dan Listrik Film Tipis ZnO:Mg dengan Metode *Microwave Assisted Spray Pyrolysis*

Sulhadi^{1*}, Siti Hidayatur R.², Siti Wahyuni³, Muqoyyanah⁴, Putut Marwoto⁵ 

^{1,2,3,5} Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

⁴ Pusat Riset Sistem Nanoteknologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received May 28, 2024

Accepted July 13, 2024

Available online July 25, 2024

Kata Kunci:

Film Tipis, Microwave Assisted Spray Pyrolysis, Tekanan

Keywords:

Thin Films, Microwave Assisted Spray Pyrolysis, Pressure



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2024 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Fabrikasi film tipis di atas substrat kaca yang homogen dengan sifat optik dan listrik yang unggul masih menjadi tantangan. Oleh sebab itu, pemilihan metode serta parameter fabrikasi menjadi hal yang penting untuk diteliti. Pada penelitian ini, film tipis ZnO doping Mg (ZnO:Mg) difabrikasi pada substrat kaca menggunakan metode *Microwave Assisted Spray Pyrolysis* dengan memvariasikan tekanan spray nitrogen, yaitu sebesar 1,4; 2,1; 2,8; 3,5; dan 4,2 kg/cm². Film tipis yang telah difabrikasi kemudian diuji dengan UV-Vis dan IV-meter untuk menganalisis sifat optik dan listriknya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tekanan spray memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik optik dan listrik dari film tipis ZnO. Dengan peningkatan tekanan spray, film tipis yang dihasilkan cenderung memiliki ketebalan yang lebih seragam, yang berkontribusi pada peningkatan transparansi optik dan penurunan nilai resistivitas listrik. Metode penelitian yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif. Penelitian ini bertujuan. Dalam penelitian ini, sampel yang digunakan adalah film tipis ZnO (seng oksida yang didoping dengan magnesium). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dan memahami pengaruh variasi tekanan spray pada proses sintesis terhadap sifat optik dan listrik dari film tipis ZnO yang dihasilkan menggunakan metode *Microwave Assisted Spray Pyrolysis* (MASP). Implikasi penelitian ini adalah penelitian ini memberikan wawasan baru tentang bagaimana parameter proses sintesis dapat diatur untuk mengoptimalkan kinerja material. Temuan ini mengindikasikan bahwa dengan pengaturan tekanan spray yang tepat, film tipis ZnO

ABSTRACT

Fabrication of thin films on homogeneous glass substrates with superior optical and electrical properties is still a challenge. Therefore, the selection of fabrication methods and parameters is an important thing to study. In this study, Mg-doped ZnO thin films (ZnO: Mg) were fabricated on glass substrates using the Microwave Assisted Spray Pyrolysis method by varying the nitrogen spray pressure, which was 1.4, 2.1, 2.8, 3.5 and 4.2 kg/cm². The fabricated thin films were then tested with UV-Vis and IV-meter to analyze their optical and electrical properties. The results showed that spray pressure had a significant effect on the optical and electrical characteristics of ZnO thin films. With increasing spray pressure, the resulting thin films tended to have a more uniform thickness, which contributed to increased optical transparency and decreased electrical resistivity values. The research method used was quantitative descriptive. This study aims. In this study, the sample used was a ZnO thin film (zinc oxide doped with magnesium). The purpose of this study was to explore and understand the effect of spray pressure variation in the synthesis process on the optical and electrical properties of ZnO thin films produced using the Microwave Assisted Spray Pyrolysis (MASP) method. This study implies that this study provides new insights into how the synthesis process parameters can be adjusted to optimize material performance. These findings indicate that with proper spray pressure control, ZnO thin films.

1. PENDAHULUAN

Pada umumnya, logam merupakan material konduktif yang baik, namun tidak transparan (*opaque*), karena adanya elektron bebas pada tingkat Fermi sehingga terjadi absorpsi pada daerah cahaya tampak, semikonduktor bersifat semi-konduktif, namun menyerap cahaya tampak yang kuat; sedangkan keramik umumnya transparan, namun bersifat isolator. Sifat-sifat tertentu dari ketiga material sebut dapat ditemukan pada material *transparent conducting oxide* (TCO), yang merupakan suatu komponen penting dalam teknologi modern fotovoltaiik dan *display screen*.

Material TCO tersebut hampir menyerupai 'logam' dengan konduktivitas yang baik mendekati 10⁴ S cm⁻¹ dan resistivitas listrik rendah yang kurang dari 10⁻³ Ω cm dan hampir menyerupai 'isolator' dengan transmitansi lebih dari 70% pada *range* cahaya tampak (Tran et al., 2019; J. Zhang et al., 2016) Transmitansi

*Corresponding author.

E-mail addresses: sulhadipati@mail.unnes.ac.id (Sulhadi)

optik material pada panjang gelombang tampak mencapai 400-700 nm. Material TCO yang berupa logam oksida tersebut memiliki celah pita lebar. Celah pita material yang berada di daerah panjang gelombang ultraviolet mengakibatkan susahnya cahaya tampak untuk diserap sehingga tampak transparan jika dilihat mata manusia. Material tersebut juga memantul pada panjang gelombang dekat inframerah dan panjang gelombang inframerah (Fang et al., 2014; Malyi et al., 2019)

Beberapa contoh senyawa logam oksida yang termasuk dalam TCO ketika didoping dengan defekasi, baik ekstrinsik maupun intrinsik, yaitu indium oksida (In_2O_3), tin oksida (SnO_2), cadmium oksida (CdO), dan zinc oksida (ZnO). Senyawa logam oksida yang paling banyak dikenal sebagai TCO yaitu $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO). Namun, ITO memiliki kekurangan karena material indium yang berbahaya dan mahal, sehingga sangat dibutuhkan material pengganti (Bright, 2018; Jeng & Wu, 2019) Alternatif pengganti yang baik untuk digunakan adalah ZnO yang didoping, yaitu film tipis $\text{ZnO}:\text{Al}$ dan $\text{ZnO}:\text{Ga}$. Oleh karena itu, alternatif doping lain masih dibutuhkan. Pada penelitian ini, digunakan ZnO doping Mg yang telah mendapat banyak perhatian karena dapat meningkatkan sifat optik dan listrik dengan radius ion kedua material yang hampir sama.

Penelitian mengenai film tipis merupakan salah satu hal yang masih dilakukan hingga sekarang, bahkan semakin pesat berkembang. Film tipis merupakan lapisan sangat tipis yang umumnya terbentuk dari bahan organik, anorganik, logam, maupun non-logam dengan sifat material berupa isolator, konduktor, maupun semikonduktor. Ketebalan film tipis bervariasi, dengan kisaran dari nanometer hingga mikrometer. Film tipis digunakan untuk meningkatkan sifat material berbentuk *bulk* dengan mendeposisi suatu lapisan sesuai sifat fisika dan kimia yang diinginkan. Aplikasi teknologi film tipis sangatlah luas, antara lain sebagai perangkat elektronik-optoelektronik, *photovoltaic*, *coating*, biomedis, dan sebagainya (Bouachiba et al., 2021; Hallani et al., 2017)

Penelitian mengenai material film tipis $\text{ZnO}:\text{Mg}$ telah dilakukan dengan teknik yang beragam, antara lain teknik sol-gel, *RF magnetron sputtering*, *oxalate coprecipitation*, dan *spray pyrolysis*. Berdasarkan penelitian menggunakan metode sol-gel, film tipis $\text{ZnO}:\text{Mg}$ mempunyai struktur berbentuk *hexagonal wurtzite* dengan transmitansi dan celah pita lebih tinggi dibandingkan dengan film tipis ZnO murni, yaitu 2,952 eV; dan 3,050 eV; untuk ZnO murni dan $\text{ZnO}:\text{Mg}$ 3%. Berdasarkan penelitian menggunakan metode *RF magnetron sputtering*, film tipis $\text{ZnO}:\text{Mg}$ memiliki ukuran *grain* semakin kecil seiring dengan bertambahnya konsentrasi doping Mg, transmitansi pada daerah tampak mencapai 80-95%, dan celah pita sebesar 3,31 eV; 3,52 eV; dan 3,68 eV untuk ZnO murni, $\text{ZnO}:\text{Mg}$ 5%, dan $\text{ZnO}:\text{Mg}$ 10% (Benali et al., 2022; Singh et al., 2016). Berdasarkan penelitian menggunakan metode *oxalate coprecipitation*, film tipis $\text{ZnO}:\text{Mg}$ memiliki ukuran kristalit lebih kecil, rasio *c/a* berkurang, sifat tekstur bertambah, dan celah pita lebih lebar jika dibandingkan dengan ZnO murni. Berdasarkan penelitian menggunakan metode *spray pyrolysis*, penambahan Mg akan mengurangi *a* dan *c* seiring dengan bertambahnya konsentrasi Mg, menyebabkan terjadinya *blue shift*, dan distribusi *grain* menjadi lebih homogen dibandingkan ZnO murni yang masih memiliki distribusi *grain multisize* (Bouachiba et al., 2021; Etacheri et al., 2017).

Deposisi film tipis ZnO dengan menggunakan metode *microwave assisted spray pyrolysis* masih terus dikembangkan agar dapat diaplikasikan ke perangkat TCO dengan lebih baik. Optimasi parameter tekanan gas nitrogen juga masih perlu dilakukan. Optimasi tekanan merupakan salah satu penentu hasil penelitian yang sangat krusial karena tekanan *spray* nitrogen yang diberikan pada sampel menjadi parameter ukuran dan distribusi *droplets* saat deposisi atau penyemprotan dilakukan. Adanya optimasi tekanan tentunya dapat menentukan efektivitas penelitian. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut mengenai film tipis $\text{ZnO}:\text{Mg}$ dengan menggunakan metode *microwave assisted spray pyrolysis* dilakukan dengan memvariasikan tekanan nitrogen saat proses penyemprotan dilakukan. Kebaruan penelitian ini terletak pada eksplorasi mendalam mengenai efek tekanan *spray* terhadap sifat optik dan listrik dari film tipis $\text{ZnO}:\text{Mg}$ yang disintesis menggunakan metode Microwave Assisted Spray Pyrolysis (MASP). Sementara sebagian besar penelitian sebelumnya fokus pada variasi doping atau suhu dalam sintesis film tipis $\text{ZnO}:\text{Mg}$, penelitian ini memberikan kontribusi unik dengan mengeksplorasi bagaimana variasi tekanan *spray* dapat mengubah karakteristik material tersebut. Penelitian ini juga merupakan salah satu yang pertama mengintegrasikan teknik MASP dengan pengaturan tekanan *spray* yang terkontrol untuk memodifikasi sifat optik dan listrik dari film tipis, menawarkan pendekatan baru dalam optimalisasi proses produksi material optoelektronik. Hasilnya memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang parameter sintesis yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja material dalam aplikasi teknologi maju.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dan memahami pengaruh variasi tekanan *spray* pada proses sintesis terhadap sifat optik dan listrik dari film tipis ZnO yang dihasilkan menggunakan metode Microwave Assisted Spray Pyrolysis (MASP). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan bagaimana perubahan tekanan *spray* dapat memengaruhi ketebalan, struktur kristal, transparansi optik, dan resistivitas listrik dari film tipis yang dihasilkan. Dengan memahami hubungan antara tekanan *spray* dan sifat-sifat film tipis ZnO , penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan yang lebih jelas dalam

pengaturan parameter proses untuk mengoptimalkan kualitas film tipis yang digunakan dalam aplikasi optoelektronik, seperti sel surya, sensor, dan perangkat elektronik lainnya.

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah metode deskriptif kuantitatif. Penelitian mengenai deposisi film tipis ZnO doping Mg menggunakan sistem microwave assisted spray pyrolysis dengan variasi tekanan spray gas nitrogen. Dalam konteks penelitian ini, subjek penelitian adalah film tipis ZnO:Mg yang disintesis menggunakan metode Microwave Assisted Spray Pyrolysis (MASP). Film tipis ini menjadi fokus utama untuk dianalisis sifat optik dan listriknya di bawah berbagai kondisi tekanan spray. Karena penelitian ini bersifat material science dan bukan penelitian sosial, **partisipan** dalam arti manusia tidak ada. Namun, dalam lingkup material science, istilah partisipan biasanya tidak digunakan, dan lebih sering merujuk pada sampel atau material yang diuji. Jadi, dalam penelitian ini, tidak ada partisipan, hanya sampel berupa film tipis ZnO:Mg. Alat yang digunakan dalam penelitian dengan sistem microwave assisted spray pyrolysis yaitu magnetic stirrer bar, digital magnetic hotplate stirrer, pressure regulator, spray gun (air brush), microwave Sharp R-21-DO, furnace, dan cawan petri. Selain itu, karakterisasi yang digunakan dengan I-V meter dan UV-Vis spectroscopy. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu seng sulfat dihidrat, magnesium sulfat heptahidrat, isopropanol, ethanolamine, metanol, aseton, aquades, gas nitrogen, dan kaca preparat.

Prosedur penelitian di mulai dengan Persiapan Larutan ZnO:Mg. Larutan yang digunakan untuk membuat sampel yaitu ZnO dengan doping Mg sebesar 3%. Adapun langkah awal yang dilakukan yaitu dengan menimbang masing-masing material $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ dan $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ pada kertas timbang menggunakan neraca digital sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan, yaitu $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ sebesar 2,195g dan $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ sebesar 0,0738g. Larutan ZnO disiapkan dengan melarutkan $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ dan 20mL isopropanol sebagai pelarut dalam glass beaker dan ditutup dengan aluminium foil. Kemudian, Deposisi ZnO:Mg Pada Substrat, sebelum proses deposisi dilakukan, dilakukan peninjauan mengenai spray gun dan tekanan spray gas nitrogen yang digunakan. Diameter nozzle yang digunakan adalah 0,2 mm. Working pressure pada alat tersebut dan ukuran tekanan pada regulator gas nitrogen menjadi penentu variasi tekanan penelitian, tepatnya pada komponen delivery pressure gauge. Proses deposisi menggunakan tekanan yang tepat sama dan lebih tinggi dari working pressure untuk mengetahui tekanan terbaik untuk menghasilkan film tipis ZnO:Mg. Variasi tekanan 60 psi (4,2 kg/cm²) merupakan tekanan desain yang diasumsikan memiliki kondisi hasil lebih buruk dari working pressure atau maksimum.

Proses deposisi dilakukan dengan menumbuhkan larutan ZnO:Mg di atas substrat yang sudah dibersihkan. Substrat tersebut diletakkan di atas kaca preparat utuh yang telah diberi double tape sebagai perekat substrat dan dimasukkan ke dalam alat microwave assisted spray pyrolysis dengan suhu sebesar 200°C selama 30 menit. Kemudian, larutan ZnO:Mg yang telah dibuat dimasukkan dalam spray gun cup menggunakan pipet tetes. Larutan yang telah dimasukkan dalam spray gun cup disemprotkan pada awal menit ke 10 selama 5 detik sebanyak tiga lapis dengan jarak waktu masing-masing deposisi selama 1 menit. Penyemprotan tersebut dilakukan dengan variasi tekanan spray gas nitrogen sebesar 1,4 kg/cm²; 2,1 kg/cm²; 2,8 kg/cm²; 3,5 kg/cm²; 4,2 kg/cm². Substrat yang telah dideposisi kemudian ditempatkan di atas keramik yang telah dibersihkan dengan metanol dan tisu, kemudian dipanaskan dalam furnace dengan temperatur 400°C selama 1 jam. Setelah itu, suhu furnace diturunkan hingga mencapai suhu ruang. Terakhir, karakterisasi Film Tipis ZnO:Mg. Karakterisasi film tipis ini dilakukan untuk menganalisa sifat optik dan listrik material. Adapun sifat optik material dianalisa menggunakan UV Vis, sedangkan sifat listrik dianalisa menggunakan IV meter. Data yang diperoleh dari hasil analisis tersebut diolah untuk mengetahui sifat-sifat tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Deposisi ZnO:Mg

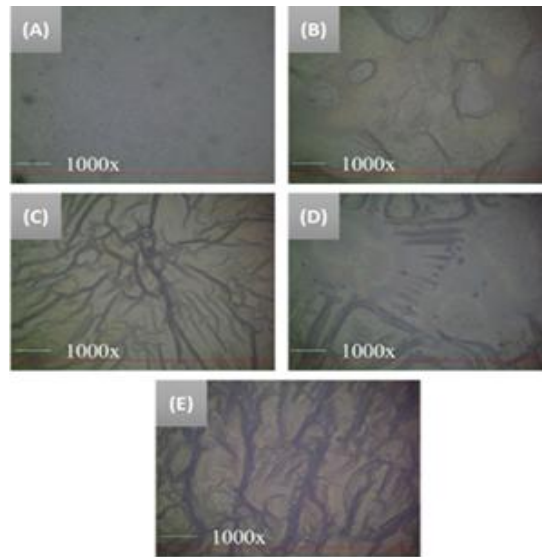
Larutan yang digunakan yaitu ZnO:Mg berbentuk sol-gel dengan konsentrasi Mg sebesar 3%. Pada pembuatan sol-gel ini, penambahan isopropanol dan ethanolamine berpengaruh terhadap hasil sol-gel yang didapatkan. Adanya penambahan ethanolamine tersebut dapat menentukan kekentalan larutan sol-gel. Semakin banyak ethanolamine yang diberikan, maka semakin encer larutan yang didapatkan. Perbandingan pelarut metanol, etanol, dan isopropanol disajikan pada [Tabel 1](#).

Tabel 1. Perbandingan Pelarut Metanol, Etanol, dan Isopropanol

Pelarut	Ukuran <i>grain</i> (nm)	RMS (nm)	Transmitansi (%)
MeOH	91,37	26,34	85,4
EtOH	129,1	7,06	92,1
IPA	87,91	4,52	92,2

Pengamatan Mikroskop CCD

Hasil pencitraan sampel dengan mikroskop CCD dilakukan menggunakan mikroskop tipe Moritex MS 804. Berdasarkan hasil pencitraan mikroskop tersebut, dapat diamati bahwa kelima variasi sampel berhasil dideposisi pada substrat. Hasil pencitraan mikroskop CCD pada sampel variasi tekanan a) 1,4 kg/cm², b) 2,1 kg/cm², c) 2,8 kg/cm², d) 3,5 kg/cm², dan e) 4,2 kg/cm² disajikan pada Gambar 1.

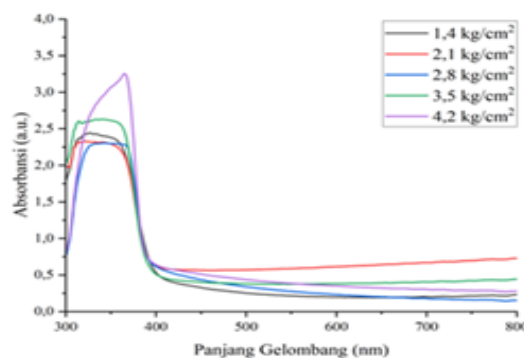


Gambar 1. Hasil Pencitraan Mikroskop CCD pada Sampel Variasi Tekanan a) 1,4 kg/cm², b) 2,1 kg/cm², c) 2,8 kg/cm², d) 3,5 kg/cm², dan e) 4,2 kg/cm²

Berdasarkan citra kelima sampel tersebut, hanya pola sampel 1,4 kg/cm² yang susah terlihat oleh mikroskop CCD. Pada sampel 2,1 kg/cm², pola film tipis terlihat seperti kacang tanah dengan sedikit *wrinkle*. Pada sampel 2,8 kg/cm², pola film tipis terlihat seperti bintang dengan banyak *wrinkle*. Pada sampel 3,5 kg/cm², pola terlihat tersusun lebih rapi dan lebih halus dari sampel 2,8 kg/cm². Pada sampel 4,2 kg/cm², pola terlihat paling besar yang mungkin terjadi karena tekanan semprot terlalu besar.

Sifat Optik

Sifat optik sampel diamati dengan menggunakan UV-Vis UV 2600 Shimadzu. Nilai puncak absorbansi didapat pada rentang panjang gelombang 300-400 nm. Tingginya puncak absorbansi menunjukkan bahwa ketebalan film tipis juga bertambah pada tekanan tinggi. Sifat optik film tipis ini diamati dengan mencari nilai absorbansi dan menganalisis nilai transmitansi masing-masing film tipis, disajikan pada Gambar 2.



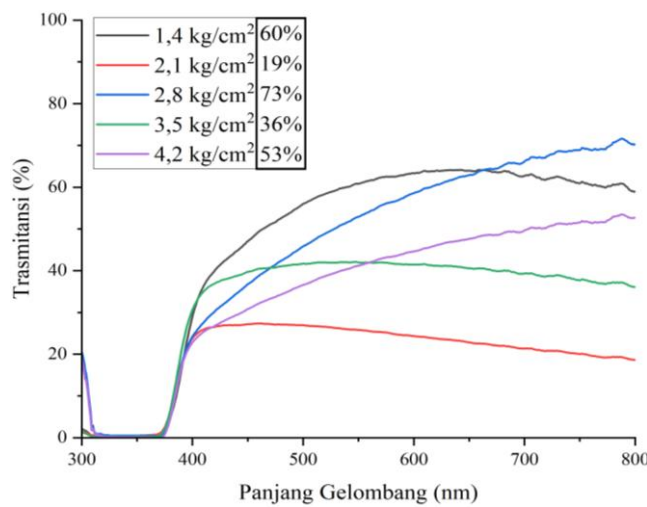
Gambar 2. Grafik Absorbansi dari Hasil Karakterisasi UV-Vis

Pengamatan puncak absorbansi masing-masing film tipis ini juga menunjukkan bahwa terjadi pergeseran panjang gelombang maksimum spektrum. Adanya pergeseran puncak tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pergeseran Puncak terhadap Panjang Gelombang

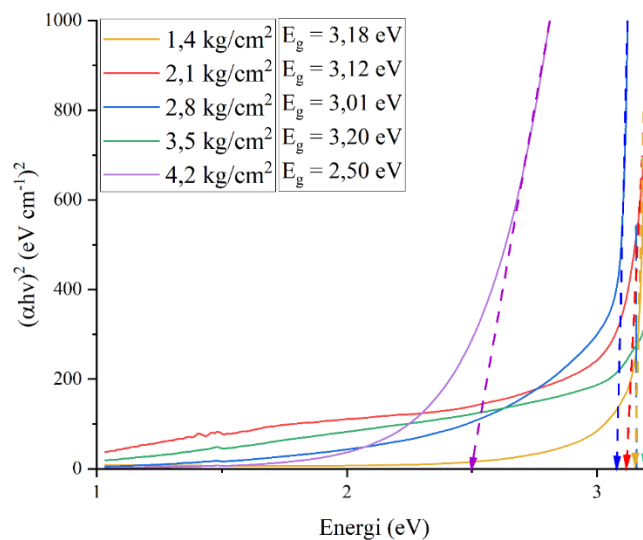
Tekanan (kg/cm ²)	Panjang Gelombang (nm)
1,4	319
2,1	319
2,8	343
3,5	319
4,2	369

Selain sifat optik absorbansi, sifat optik transmitansi juga diamati pada penelitian ini. Nilai transmitansi optik didapatkan dari olah data nilai absorbansi UV-Vis. Grafik transmitansi dari olah data perhitungan absorbansi hasil karakterisasi UV-Vis disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Transmittansi dari Olah Data Perhitungan Absorbansi Hasil Karakterisasi UV-Vis

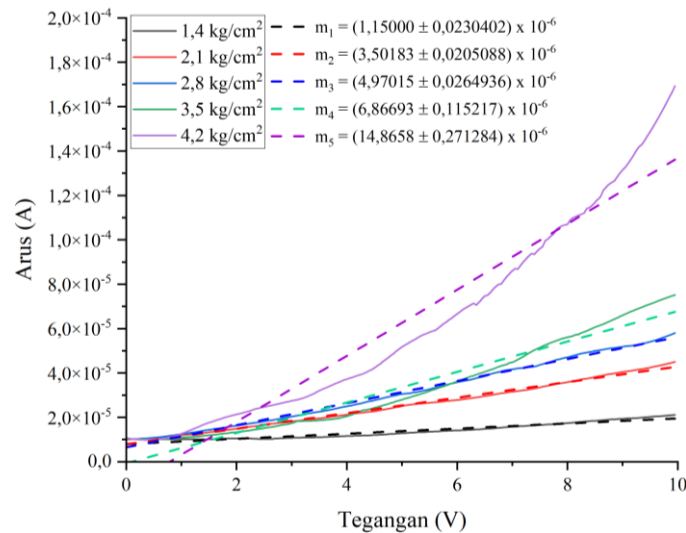
Hasil perhitungan celah pita disajikan pada Gambar 4. Celah pita semakin berkurang seiring dengan bertambahnya tekanan *spray* nitrogen.



Gambar 4. Celah pita ZnO:Mg berdasarkan Variasi Tekanan *Spray* Gas Nitrogen

Sifat Listrik

Sifat listrik material dapat diamati menggunakan I-V meter. Alat yang digunakan sendiri yaitu Nachriebe 101 IV-Meter. IV-Meter dengan dua probe ini merupakan alat yang lebih cocok digunakan dalam pengukuran dengan kemampuan aplikasi arus dari 100 pA hingga 3,5 mA. Berdasarkan alat I-V meter tersebut, dihasilkan data arus dan tegangan mulai dari 0 V hingga 10 V yang kemudian dapat dibuat grafik arus-tegangan. Berdasarkan Gambar 5, dapat diamati bahwa semakin tinggi tekanan spray nitrogen, maka semakin tinggi pula arus yang dihasilkan. Hasil tersebut dapat digunakan untuk perhitungan konduktivitas dan resistivitas film tipis disajikan pada Tabel 3.



Gambar 5. Hasil Pengukuran I-V meter dan Slope Grafik

Tabel 3. Hasil Perhitungan Konduktivitas dan Resistivitas Film Tipis ZnO:Mg

Tekanan (kg/cm ²)	Resistivitas (Ω cm)	Konduktivitas (Ω cm) ⁻¹
1,4	8,19 × 10 ⁶	1,08 × 10 ⁻⁵
2,1	2,69 × 10 ⁶	3,30 × 10 ⁻⁵
2,8	1,90 × 10 ⁶	4,68 × 10 ⁻⁵
3,5	1,37 × 10 ⁶	6,47 × 10 ⁻⁵
4,2	0,63 × 10 ⁶	1,40 × 10 ⁻⁴

Pembahasan

Deposisi ZnO:Mg

Larutan yang digunakan yaitu ZnO:Mg berbentuk sol-gel dengan konsentrasi Mg sebesar 3%. Konsentrasi sebesar 3% dipilih karena pada semakin bertambahnya konsentrasi maka akan menghasilkan ukuran partikel semakin besar sehingga menyebabkan semakin susah terjadi hamburan partikel. Isopropanol digunakan dalam penelitian ini karena berdasarkan penelitian film tipis terdahulu menghasilkan ukuran grain paling kecil (Foo et al., 2019; Volkova et al., 2021). RMS paling kecil, dan transmitansi paling besar jika dibandingkan dengan film tipis menggunakan penambahan ethanol dan metanol. Hal tersebut dapat mendukung terbentuknya TCO yang baik. Selain itu, ethanolamine digunakan sebagai penstabil deposisi suatu larutan sol-gel (Tsay et al., 2021; K. H. Zhang et al., 2021). Adanya penambahan ethanolamine tersebut dapat menentukan kekentalan larutan sol-gel. Semakin banyak ethanolamine yang diberikan, maka semakin encer larutan yang didapatkan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Proses deposisi dilakukan menggunakan variasi tekanan spray gas nitrogen dalam penyemprotan sol-gel. Spray yang digunakan adalah jenis pressurized atomizer. Perpindahan droplets aerosol dari atomizer ke substrat merupakan bagian proses deposisi yang menyebabkan perubahan ukuran droplets menjadi lebih kecil karena terjadi evaporasi. Hasil paling baik terjadi saat droplets dari sol-gel (larutan prekursor) mencapai substrat tepat saat evaporasi telah terjadi. Hal tersebut tercapai saat kontrol microwave diatur pada suhu medium-high, sesuai dengan kontrol suhu yang digunakan dalam penelitian ini. Hal ini dilakukan berdasarkan penelitian terdahulu mengenai suhu saat deposisi spray pyrolysis yang menyebabkan droplets jatuh ke substrat tanpa terjadi penguraian dan terjadi proses CVD (chemical vapour deposition) (Pak et al., 2020; Tran et al., 2019). Selain menggunakan microwave, sampel yang dihasilkan juga melalui proses

annealing dengan tujuan untuk menumbuhkan dan memperbaiki struktur film tipis. Melalui proses *annealing*, film tipis yang dihasilkan memiliki kualitas yang lebih baik jika dibandingkan dengan film tipis tanpa proses tersebut.

Pengamatan Mikroskop CCD

Berdasarkan citra kelima sampel tersebut, hanya pola sampel 1,4 kg/cm² yang susah terlihat oleh mikroskop CCD. Hal tersebut mungkin terjadi karena rendahnya tekanan penyemprotan. Lain halnya dengan keempat sampel lain, pola sampel dapat diamati dengan cukup baik. Semakin besar tekanan *spray* gas nitrogen pada sampel uji, maka semakin terlihat besar pula pola yang terbentuk. Pada sampel 2,1 kg/cm², pola film tipis terlihat seperti kacang tanah dengan sedikit *wrinkle*. Pada sampel 2,8 kg/cm², pola film tipis terlihat seperti bintang dengan banyak *wrinkle*. Pada sampel 3,5 kg/cm², pola terlihat tersusun lebih rapi dan lebih halus dari sampel 2,8 kg/cm². Pada sampel 4,2 kg/cm², pola terlihat paling besar yang mungkin terjadi karena tekanan semprot terlalu besar. Selain pola, warna pada kelima sampel tersebut juga terlihat beragam. Dapat diamati bahwa warna sampel terlihat semakin coklat seiring dengan bertambahnya tekanan semprot yang digunakan. Adanya perbedaan pada tiap sampel tersebut menandakan adanya perbedaan sifat lain, yaitu sifat optik dan listrik.

Sifat Optik

Sifat optik film tipis ini diamati dengan mencari nilai absorbansi dan menganalisis nilai transmitansi masing-masing film tipis. Absorbansi yang terjadi pada panjang gelombang mikro menunjukkan adanya penyerapan yang terjadi pada celah pita intrinsik. Hal tersebut dikarenakan adanya transisi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Adanya peningkatan absorbansi menunjukkan bahwa film tipis tumbuh lebih *smooth* dan uniform (Kathalingam et al., 2020; Zak et al., 2011). Berdasarkan Gambar 2, dapat diamati bahwa nilai puncak absorbansi didapat pada rentang panjang gelombang 300-400 nm. Pada rentang tersebut, nilai absorbansi semakin tinggi seiring dengan meningkatnya tekanan *spray*. Tingginya absorbansi menunjukkan bahwa ketebalan film tipis juga bertambah pada tekanan tinggi. Namun, nilai absorbansi pada sampel film tipis tekanan 1,4 kg/cm² lebih tinggi dari sampel film tipis tekanan 2,1 kg/cm² dan 2,8 kg/cm² yang mungkin terjadi karena persebaran *spray* tekanan rendah yang belum merata secara luas dan cenderung terpusat pada bagian substrat tertentu.

Pengamatan puncak absorbansi masing-masing film tipis ini juga menunjukkan bahwa terjadi pergeseran panjang gelombang maksimum spektrum seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Pergeseran tinggi puncak tersebut merupakan efek *hyperchromic* yang terjadi karena hamburan cahaya akibat ikatan molekul antarpartikel (El-Bashir et al., 2019; Prabu et al., 2018). Selain itu, terjadi pula *red shift* pada sampel tekanan 4,2 kg/cm² dan 2,8 kg/cm². *Red shift* merupakan perpindahan puncak absorpsi ke panjang gelombang yang lebih panjang (Bouachiba et al., 2021; Schoonheydt & Johnston, 2020). Hal ini berkaitan dengan celah pita yang menjadi lebih kecil dibandingkan dengan sampel tekanan 1,4 kg/cm²; 2,1 kg/cm²; dan 3,5 kg/cm².

Transmitansi optik merupakan ukuran seberapa besar cahaya dapat melewati suatu material. Nilai transmitansi optik didapatkan dari olah data nilai absorbansi UV-Vis. Berdasarkan grafik transmitansi seperti ditunjukkan pada Gambar 3, nilai paling tinggi diperoleh pada sampel film tipis tekanan 2,8 kg/cm². Grafik tidak menunjukkan kestabilan antara tinggi/rendahnya tekanan dengan nilai transmitansi. Walaupun tekanan 4,2 kg/cm² merupakan tekanan paling tinggi, nilai transmitansinya masih lebih tinggi dibanding film tipis tekanan 3,5 kg/cm² dan 2,1 kg/cm². Hal ini mungkin terjadi karena semakin besar tekanan yang diberi menyebabkan semakin kecilnya *droplets* yang sensitif terhadap evaporasi atau terjadi *bounce back* dari *droplets*. Lain halnya pada tekanan 2,1 kg/cm², walaupun tekanan cukup rendah, transmitansi yang diperoleh justru paling rendah. Hal ini mungkin terjadi karena permukaan film tipis tidak rata sehingga cahaya terpantul dan semakin sedikit cahaya yang diteruskan (Marangoni & Costa Ferreira, 2020; Muchuweni et al., 2022).

Hasil perhitungan celah pita menunjukkan nilai yang semakin berkurang seiring dengan bertambahnya tekanan *spray* nitrogen seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Namun, terjadi peningkatan celah pita pada tekanan 3,5 kg/cm² karena ukuran *grain* yang kecil dan kuatnya ikatan antar partikel sehingga dibutuhkan energi yang besar untuk perpindahan elektron (Pak et al., 2020; Soni et al., 2019).

Sifat Listrik

Berdasarkan Gambar 5, dapat diamati bahwa semakin tinggi tekanan *spray* nitrogen, maka semakin tinggi pula arus yang dihasilkan. Resistivitas menunjukkan kemampuan dari suatu material dalam menghambat arus listrik. Nilai dari resistivitas berbanding terbalik dengan nilai konduktivitas listrik, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Perhitungan konduktivitas dan resistivitas dilakukan dengan menggunakan grafik yang dihasilkan. Grafik arus-tegangan masing-masing variasi tekanan *spray* gas nitrogen menghasilkan gradien yang

digunakan untuk menghitung konduktivitas dan resistivitas menggunakan persamaan (1) dan (2). Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan *spray* nitrogen yang diberikan, maka resistivitas semakin kecil, sedangkan konduktivitas menjadi semakin tinggi.

$$\rho = \frac{2\pi s V}{I} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{I}{2\pi s V} \quad (2)$$

Nilai konduktivitas dalam orde 10^{-5} dan 10^{-4} menunjukkan bahwa material yang terbentuk merupakan semikonduktor. Film tipis tekanan 4,2 kg/cm² memiliki nilai konduktivitas paling baik karena tebalnya film yang terbentuk, berbanding terbalik dengan sampel tekanan 1,4 kg/cm² yang memiliki konduktivitas sangat kecil. Adapun hasil penelitian tersebut serupa dengan penelitian oleh Prabu (2018). Tinggi-rendahnya nilai tersebut berkaitan dengan kondisi permukaan film. Semakin kasar permukaan, maka semakin tinggi resistivitas film tipis (Karthick et al., 2020; Lee et al., 2023). Hal tersebut sesuai dengan hasil film tipis karena semakin tinggi tekanan menghasilkan film tipis yang semakin *smooth*. Adapun dalam penelitian ini, nilai resistivitas yang diperoleh cukup besar yang disebabkan karena masih adanya oksidasi pada permukaan film tipis.

Semakin tinggi tekanan *spray* nitrogen, semakin mudah elektron berpindah dan semakin sedikit tumbukan yang terjadi sehingga konduktivitas menjadi semakin tinggi. Semakin tingginya nilai konduktivitas tersebut juga terjadi karena semakin banyak gas nitrogen yang disemprot pada substrat, sama halnya dengan *sol-gel* yang diberikan. Adapun pada *sol-gel*, adanya penambahan *ethanolamine* tidak hanya dapat melarutkan ZnO:Mg, melainkan juga dapat menjadi bahan aditif nitrogen sehingga mampu meningkatkan konduktivitas film tipis (Jeng & Wu, 2019; Kim et al., 2020).

Hubungan Antara Sifat Optik dan Sifat Listrik Film Tipis ZnO:Mg

Hubungan antara konduktivitas dan celah pita film tipis juga tidak linear. Hal ini terjadi karena nilai *band gap* menurun pada tekanan 2,8 kg/cm² dan tekanan 4,2 kg/cm². Turunnya nilai *band gap* menunjukkan semakin konduktif suatu material. Berdasarkan hal tersebut, tekanan 4,2 kg/cm² merupakan material paling konduktif dengan celah pita yang paling kecil. Walaupun *design pressure* memiliki konduktivitas paling tinggi, namun absorpsi yang diperoleh terlalu tinggi sehingga material sulit untuk meneruskan cahaya yang masuk. Nilai transmitansi yang cukup tinggi mungkin diperoleh karena meskipun droplets yang dihasilkan berukuran paling kecil, adanya tekanan yang tinggi menyebabkan terjadinya *bounce back droplets* sehingga menurunkan efektivitas deposisi. Oleh karena itu, terbukti bahwa *design pressure* (4,2 kg/cm²) kurang tepat digunakan dalam deposisi film tipis dengan alat *airbrush spray*.

Berdasarkan sifat listrik dan optik yang didapatkan, film tipis ZnO:Mg 3% dengan tekanan *spray* 2,8 kg/cm² dapat diaplikasikan untuk TCO karena memiliki nilai transmitansi di atas 70%. Selain itu, walaupun konduktivitas yang dihasilkan tidak mendekati 10^4 (Ω cm)⁻¹ seperti pada ciri-ciri TCO, penambahan tekanan *spray* telah berhasil meningkatkan konduktivitas, dari orde 10^{-5} (Ω cm)⁻¹ pada menjadi orde 10^{-4} (Ω cm)⁻¹ pada tekanan lebih tinggi. Nilai tersebut termasuk dalam semikonduktor yang berarti masih bisa menghantarkan listrik. Adapun dalam TCO, film tipis semikonduktor tersebut dapat digunakan untuk LCD, OLED, dan *smart windows*.

Implikasi dari penelitian ini sangat penting bagi pengembangan teknologi material tipis, khususnya dalam aplikasi optoelektronik seperti sensor, sel surya, dan perangkat elektronik lainnya. Dengan menunjukkan bahwa tekanan *spray* secara signifikan mempengaruhi sifat optik dan listrik dari film tipis ZnO:Mg, penelitian ini memberikan wawasan baru tentang bagaimana parameter proses sintesis dapat diatur untuk mengoptimalkan kinerja material. Temuan ini mengindikasikan bahwa dengan pengaturan tekanan *spray* yang tepat, film tipis ZnO:Mg dapat disesuaikan untuk memiliki transparansi optik yang lebih baik dan resistivitas listrik yang lebih rendah, yang sangat menguntungkan untuk efisiensi perangkat. Selain itu, hasil ini juga berkontribusi pada pemahaman yang lebih mendalam tentang proses Microwave Assisted Spray Pyrolysis (MASP), yang berpotensi digunakan secara luas dalam produksi film tipis berkualitas tinggi untuk berbagai aplikasi teknologi maju. Keterbatasan dalam penelitian ini terutama terletak pada skala parameter yang digunakan, khususnya dalam hal variasi tekanan *spray* yang mungkin masih terbatas dalam rentang tertentu. Selain itu, penelitian ini hanya berfokus pada pengaruh tekanan *spray* tanpa mempertimbangkan faktor lain seperti variasi suhu substrat, konsentrasi larutan prekursor, atau waktu penyemprotan, yang juga bisa memengaruhi sifat optik dan listrik dari film tipis ZnO:Mg. Pengujian sifat optik dan listrik juga dilakukan pada kondisi lingkungan tertentu, yang mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi aplikasi nyata dalam perangkat optoelektronik. Sebagai rekomendasi,

penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan memperluas variasi parameter sintesis, seperti suhu substrat dan konsentrasi prekursor, untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang bagaimana setiap parameter berkontribusi terhadap sifat film tipis ZnO:Mg. Selain itu, studi tentang stabilitas film tipis dalam berbagai kondisi lingkungan juga perlu dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan material ini dalam aplikasi jangka panjang. Penelitian lebih lanjut juga bisa mempertimbangkan pengujian pada perangkat nyata untuk mengevaluasi kinerja film tipis dalam aplikasi praktis.

4. SIMPULAN

Hasil pengamatan menggunakan mikroskop CCD menunjukkan bahwa film tipis ZnO doping Mg berhasil ditumbuhkan di atas substrat kaca menggunakan metode *microwave assisted spray pyrolysis* dengan memberikan tetapan kontrol berupa konsentrasi Mg sebesar 3%, suhu *microwave medium high*, jarak *nozzle* ke substrat sejauh 10 cm, lapisan *spray* sebanyak 3 lapis dengan waktu tiap penyemprotan selama 5 detik, dan jarak penyemprotan antar lapisan 1 menit. Hasil karakterisasi UV-Vis spektrofotometer menunjukkan bahwa absorbansi film tipis semakin besar seiring dengan bertambahnya tekanan. Selain itu, hasil analisis karakterisasi IV-meter menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan *spray* nitrogen dapat menghasilkan arus yang semakin tinggi, sehingga resistivitas semakin kecil, sedangkan konduktivitas semakin tinggi. Hasil variasi tekanan *spray* film tipis tersebut menunjukkan bahwa film tipis tekanan 2,8 kg/cm² dapat diaplikasikan pada material *Transparent Conducting Oxide* (TCO) karena menghasilkan band gap sebesar 3,01 eV dengan transmittansi paling tinggi, yaitu di atas 70%, dan mampu menghantarkan listrik sebagai bahan semikonduktor.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Benali, H., Hartiti, B., Lmai, F., Batan, A., Fadili, S., & Thevenin, P. (2022). Synthesis And Characterization Of Mg-Doped Zno Thin-Films For Photovoltaic Applications. *Materials Today: Proceedings*, 66(23), 212–216. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.490>.
- Bouachiba, Y., Mammeri, A. B. D. E. L. O. U. A. D. O. U. D., Bouabellou, A., Rabia, O., Saidi, S., Taabouche, A., & Boudissa, M. (2021). Optoelectronic And Birefringence Properties Of Weakly Mg-Doped Zno Thin Films Prepared By Spray Pyrolysis. *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 33(9), 6689–6699. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-07844-3>.
- Bright, C. I. (2018). Transparent Conductive Thin Films. *Optical Thin Films And Coatings*, 24(25), 741–788. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102073-9.00021-7>.
- El-Bashir, S. M., Alharbi, O. A., & Alsahhi, M. S. (2019). Thin-Film Lscs Based On Pmma Nanohybrid Coatings: Device Optimization And Outdoor Performance. *International Journal Of Photoenergy*, 24(26), 190. <https://doi.org/10.1155/2013/235875>.
- Etacheri, V., Roshan, R., & Kumar, V. (2017). Mg-Doped Zno Nanoparticles For Efficient Sunlight-Driven Photocatalysis. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 4(5), 2717–2725. <https://doi.org/10.1021/am300359h>.
- Fang, V., Kennedy, J. V., Futter, J., & Manning, J. (2014). A Review Of Near Infrared Reflectance Properties Of Metal Oxide Nanostructures. *Gns Science*, 2(21), 100. <https://api.semanticscholar.org/corpusid:17554713>.
- Foo, K. L., Kashif, M., Hashim, U., & Liu, W. W. (2019). Effect Of Different Solvents On The Structural And Optical Properties Of Zinc Oxide Thin Films For Optoelectronic Applications. *Ceramics International*, 40(1 Part A), 753–761. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.06.065>.
- Hallani, G. E., Nasih, S., Fazouan, N., Liba, A., Khuili, M., Sajieddine, M., & Atmani, E. H. (2017). Comparative Study For Highly Al And Mg Doped Zno Thin Films Elaborated By Sol Gel Method For Photovoltaic Application. *Journal Of Applied Physics*, 121(13), 50. <https://doi.org/10.1063/1.4979724>.
- Jeng, J. S., & Wu, C. M. (2019). Fabrication Of Solution-Processed Nitrogen-Doped Niobium Zinc Tin Oxide Thin Film Transistors Using Ethanolamine Additives. *Journal Of Alloys And Compounds*, 729(2), 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.151>.
- Karthick, P., Vijayanarayanan, D., Sridharan, M., Rt, A. K., Sanjeeviraja, C., & Jeyadheepan, K. (2020). Optimization Of Substrate Temperature And Characterization Of Tin Oxide Based Transparent Conducting Thin Films For Application In Dye-Sensitized Solar Cells. *Thin Solid Films*, 631, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.04.003>.
- Kathalingam, A., Valanarasu, S., Ahamad, T., Alshehri, S. M., & Kim, H. S. (2020). Spray Pressure Variation Effect On The Properties Of Cds Thin Films For Photodetector Applications. *Ceramics International*, 47(6), 7608–7616. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.100>.

- Kim, G. H., Shin, E. A., Jung, J. Y., Lee, J. Y., & Lee, C. K. (2020). Effect Of Spray Parameters On Electrical Characteristics Of Printed Layer By Morphological Study. *Processes*, 10(5), 999. <https://doi.org/10.3390/pr10050999>.
- Lee, P., Gaige, T., & Hung, P. (2023). Microfluidic Systems For Live Cell Imaging. *Methods In Cell Biology*, 102(78), 77–103. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374912-3.00004-3>.
- Malyi, O. I., Yeung, M. T., Poeppelmeier, K. R., Persson, C., & Zunger, A. (2019). Spontaneous Non-Stoichiometry And Ordering In Degenerate But Gapped Transparent Conductors. *Matter*, 1(1), 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.05.014>.
- Marangoni, J. A., & Costa Ferreira, M. (2020). Influence Of Working Pressure And Spray Nozzle On The Distribution Of Spray Liquid In Manual Backpack Sprayers. *Arquivos Do Instituto Biológico*, 86(24), 442018. <https://doi.org/10.1590/1808-1657000442018>.
- Muchuweni, E., Sathiaraj, T. S., & Nyakoty, H. (2022). 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(24), 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.10.006>.
- Pak, M. N., Kim, S. C., Sin, S. I., Kim, K. C., & Pak, S. S. (2020). Research On The Ultrasonic Driving Circuit Of Music Rhythm Driven Method To Suppress The Noise Of Ultrasonic Cleaner. *Applied Acoustics*, 195(20), 108845. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108845>.
- Prabu, R. D., Valanarasu, S., Ganesh, V., Shkir, M., Kathalingam, A., & Alfaify, S. (2018). Effect Of Spray Pressure On Optical, Electrical And Solar Cell Efficiency Of Novel Cu₂O Thin Films. *Surface And Coatings Technology*, 347(25), 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.04.084>.
- Schoonheydt, R. A., & Johnston, C. T. (2020). Surface And Interface Chemistry Of Clay Minerals. *Developments In Clay Science Elsevier*, 5(23), 139–172. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-098258-8.00005-5>.
- Singh, S. K., Hazra, P., Tripathi, S., & Chakrabarti, P. (2016). Optical Characterization Of Mg-Doped ZnO Thin Films Deposited By Rf Magnetron Sputtering Technique. *Aip Conference Proceedings*, 1728(1), 20168. <https://doi.org/10.1063/1.4946219>.
- Soni, M., K., S., & Sharma, S. K. (2019). Influence Of Nitrogen Partial Pressure On Optical Properties Of Magnetron Sputtered Al-Si-N Thin Films. *Thin Solid Films*, 682(24), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.05.006>.
- Tran, T. N. A., Tran, T. H., Nguyen, V. T., & Pham, N. H. (2019). Characteristics Of Ag-Doped ZnO Thin Films Prepared By Sputtering Method. *Vnu Journal Of Science: Mathematics-Physics*, 35(4), 13. <https://doi.org/10.25073/2588-1124/vnumap.4365>.
- Tsay, C. Y., Fan, K. S., Wang, Y. W., Chang, C. J., Tseng, Y. K., & Lin, C. K. (2021). Transparent Semiconductor Zinc Oxide Thin Films Deposited On Glass Substrates By Sol-Gel Process. *Ceramics International*, 36(6), 1791–1795. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.03.005>.
- Volkova, M. G., Storozhenko, V. Y., Petrov, V. V., & Bayan, E. M. (2021). Structural Properties Of TiO₂-SnO₂ Thin Films Prepared By New Pyrolysis Solid-Phase Method. *Journal Of Physics: Conference Series (Vol, 1(1)*, 12042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2086/1/012042>.
- Zak, A. K., Majid, W. A., Darroudi, M., & Yousefi, R. (2011). Synthesis And Characterization Of ZnO Nanoparticles Prepared In Gelatin Media. *Materials Letters*, 65(1), 70–73. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.09.029>.
- Zhang, J., Dong, P., Gao, Y., Sheng, C., & Li, X. (2016). Performance Enhancement Of ZnO Thin-Film Transistors Via Graphene Bridge Layer By Sol-Gel Combustion Process. *Acs Applied Materials And Interfaces*, 7(43), 24103–24109. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b07148>.
- Zhang, K. H., Xi, K., Blamire, M. G., & Egdell, R. G. (2021). P-Type Transparent Conducting Oxides. *Journal Of Physics: Condensed Matter*, 28(38), 38. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/28/38/383002>.