

BAB VII. EFEK DAYA PLASMA TERHADAP SIFAT FOTOLUMINESEN FILM TIPIS ZnO DOPING Al

Budi Astuti¹, Sugianto¹, Ida Maftuchah¹, Nur Arina Firmahaya¹, Putut Marwoto¹, Nurhamid², Teguh Darsono², Didik Aryanto², and Isnaeni²

¹Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Semarang

² Pusat Penelitian Fisika, Badan Riset dan Inovasi Nasional

b_astuti79@mail.unnes.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.15294/ik.v1i1.79>

Abstrak

Film tipis ZnO doping Al (ZnO:Al) dideposisi pada substrat *corning glass* menggunakan metode *DC magnetron sputtering*. Proses deposisi film tipis ZnO:Al dijaga konstan pada tekanan Argon, suhu deposisi, dan waktu deposisi masing-masing 500 mTorr, 400 °C, dan 2 jam. Selanjutnya, proses deposisi film tipis ZnO:Al menggunakan variasi daya plasma yaitu 33, 43, dan 50 watt. Karakterisasi sifat optik film tipis ZnO:Al menggunakan *Photoluminescence* spektroskopi. Daya plasma yang berbeda dapat mempengaruhi energi ion dan momentum tumbukannya. Perbedaan daya plasma tersebut memiliki efek terhadap kualitas film tipis yang dihasilkan, dimana peningkatan daya plasma menyebabkan kualitas film tipis yang dihasilkan semakin baik. Kata kunci: DC Magnetron Sputtering, Film Tipis ZnO:Al, Fotoluminesen

PENDAHULUAN

ZnO merupakan material alternatif yang dikembangkan sebagai Transparent Conducting Oxide (TCO) untuk *window layer* sel surya (Fakharan & Dabirian, 2021). Pemilihan material ZnO didasarkan pada beberapa kelebihan yang dimiliki seperti ZnO merupakan bagian semikonduktor transparan tipe-n dengan *direct band gap* yang tinggi sekitar 3,37 eV pada suhu kamar (Cuandra *et al.*, 2021; Al-Wardy *et al.*, 2021), memiliki energi ikat eksitasi besar 60 meV (Milkhlif *et al.*, 2021; Murkute *et al.*, 2021), memiliki

stabilitas tinggi dalam plasma Hidrogen, dan siklus panas, serta tahan terhadap radiasi (Taylor *et al.*, 2019; Barman *et al.*, 2021). Nilai mobilitas elektron film tipis ZnO juga tinggi sekitar $35 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Ming-Yu, *et al.*, 2021), dan transmitansi optik tinggi sekitar 90% (Lewis *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2021). Selain itu, film tipis ZnO juga memiliki keunggulan seperti harga yang murah, tidak beracun, suhu pengendapan yang relatif rendah, ramah lingkungan, dan mudah dalam proses deposisi (Kara & Siab, 2021; Mourad *et al.*, 2022). Selain kelebihan, film tipis ZnO juga memiliki kekurangan seperti kurang stabil pada lingkungan korosif dan nilai konduktivitas yang rendah sekitar $10^{-8} (\Omega)^{-1}\text{cm}^{-1}$ (Zayed *et al.*, 2019; Vu *et al.* 2019). Untuk meningkatkan konduktivitas listrik film tipis ZnO dapat didoping dengan material seperti aluminium (Al) (Sugianto *et al.*, 2016; Astuti *et al.*, 2018), Galium (Ga) (Aryanto *et al.*, 2017; Marowot *et al.*, 2016), Magnesium (Mg) (Astuti *et al.*, 2021). Doping Al pada ZnO mampu meningkatkan nilai transmitansi pada daerah cahaya tampak pada kisaran 64 - 96%, dan dapat meningkatkan energi celah pita optik (Durri, 2015).

Transparansi termasuk sifat optik yang penting dipelajari untuk dapat diaplikasikan pada material *window layer*. Banyak peneliti yang mempelajari sifat pendaran film tipis ZnO:Al seperti Xin (2021) melaporkan bahwa sifat pendaran yang relative lebih baik diperoleh pada temperatur penumbuhan 40°C dengan metode sol gel, dimana emisi warna biru yang terjadi mengindikasikan adanya cacat permukaan dari film tipis yang dihasilkan. Selanjutnya, Rodnyi dan Khodyuk (2011) melaporkan bahwa karakteristik optik dan pendaran ZnO sangat bergantung pada pengotor dan pertumbuhan parameter lapisan tipis. Selanjutnya dijelaskan bahwa film tipis ZnO menunjukkan dua pita luminesensi. Dua pita tersebut adalah pita *wavelength* (panjang gelombang) pendek yang terletak di dekat tepi serapan kristal, yaitu, pendaran tepi (3,35 eV), dan pita panjang gelombang panjang yang lebar, maksimum yang biasanya berada dalam kisaran spektrum hijau (2,45 eV).

Selanjutnya, film tipis yang dideposisikan dengan daya RF berbeda (200 dan 500W) menghasilkan spectrum emisi UV yang

berasal dari rekombinasi eksitonik dari celah pita yang dekat ZnO. Sementara emisis level dalam (deep level, DL) di daerah spektral ungu, biru, dan hijau disebabkan oleh rekombinasi *photo-generated holes* dengan berbagai cacat structural. Menurut Das & Mondal (2014), cacat structural tersebut seperti, keadaan muatan terionisasi dari cacat intrinsik, kekosongan oksigen, interstisial Zn, kekosongan seng, antisit oksigen. Berdasarkan dekonvolusi yang dilakukan, spectrum emisi dapat dikategorikan seperti ditunjukkan pada Tabel 7.1.

Tabel 7.1. Spektrum Emisi Berdasarkan Dekonvolusi (Das & Mondal, 2014)

No.	Panjang gelombang (nm)	Spektrum Emisi
1.	399	UV-Violet
2.	417	Violet-I
3.	438	Violet-II
4.	453	Fragmen violet-biru
5.	467	Emisi-biru
6.	500 (467 – 520)	Emisi Hijau

Pita pendaran UV dalam film ZnO sangat bergantung pada pembengkokan pita permukaan dan pita tersebut dibentuk dari rekombinasi kompleks eksitasi terikat (bound excitons, BEs) yang terletak di dekat permukaan dan batas butir (*grain Boundary*) di dalam film. Ada dua faktor yang secara langsung mempengaruhi emisi UV pada film ZnO. Salah satunya adalah pusat rekombinasi emisi tingkat dalam dan pusat rekombinasi non-radiatif yang dapat menurunkan emisi UV. Pada peningkatan daya RF, emisi yang terlihat yang sebagian besar berasal dari cacat menjadi signifikan secara proporsional. Intensitas pita emisi yang terlihat, secara umum jauh lebih tinggi daripada pita emisi eksiton. Sebaliknya, intensitas di bawah pita tampak meningkat ketika pita lain berkurang, yang menunjukkan kedua proses emisi bersaing satu sama lain. Pada daya RF yang tinggi, difusi oksigen keluar dari jaringan ZnO menciptakan kekosongan oksigen yang cukup, menunjukkan emisi hijau yang menonjol dalam fotoluminesensi.

Namun, untuk memperhitungkan peningkatan relatif sistematis dalam intensitas komponen berbeda di wilayah yang terlihat, perubahan komposisi kimia material pada daya RF tinggi dapat menjadi parameter yang signifikan.

ZINC OXIDE (ZnO)

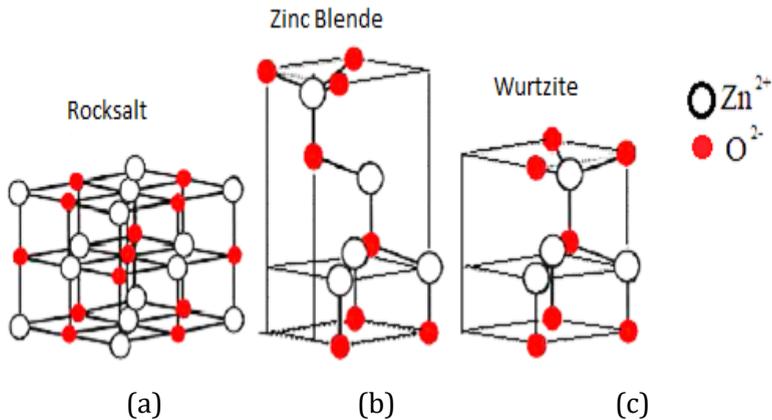
Zinc oxide atau seng oksida adalah suatu senyawa anorganik dengan rumusan kimia ZnO. Material ZnO merupakan semikonduktor berstruktur *wurtzite* dengan orientasi sumbu-c (Marwoto *et al.*, 2015). ZnO terdapat di kulit bumi sebagai mineral *zincite* dan telah diteliti dan dikembangkan dalam berbagai aplikasi teknologi saat ini. Serbuk ZnO digunakan secara luas sebagai bahan tambahan ke dalam berbagai material seperti *medical plastic* (Bazant, *et al.*, 2014), kaca, keramik, karet, semen, cat, plastik, pelumas, perekat, plester, *sealant*, pigmen dan makanan, baterai, ferit, dan penghambat api (Singh, *et al.*, 2021). Karakterisasi senyawa ZnO secara lengkap ditunjukkan pada Tabel 7.2.

Tabel 7.2. Karakteristik Senyawa ZnO

Besaran	Karakteristik
Rumus Molekul	ZnO
berat molekul	81,480 g/mol
Penampilan	Padatan putih tak larut dalam air
Bau	Tidak berbau
Kepadatan	5,606 g/cm ³
Titik lebur	1975 °C
Titik didih	2360 °C
Kelarutan dalam air	0,16 mg/100 mL (30 °C)
<i>Band gap energy</i>	3,3 Ev
Indeks bias (n)	2,0041

ZnO mempunyai dua fase pembentukan struktur kristal yaitu heksagonal dan kubus. Struktur heksagonal ZnO dikenal sebagai struktur *wurtzite* heksagonal, sedangkan struktur kubik terbagi menjadi dua yaitu struktur kubus *zinc blende* dan kubus garam dapur (kubus *rocksalt*). Struktur yang paling stabil pada keadaan

ruang yaitu struktur *wurtzite*. Struktur *zinc blende* hanya stabil jika ditumbuhkan pada medium yang memiliki struktur kubik, sedangkan struktur *rocksalt* kubik sangat jarang ditemukan kecuali pada tekanan sekitar 10 Gpa (Shaba *et al.*, 2021). Jenis-jenis struktur kristal ZnO tersebut ditunjukkan pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1. Struktur Kristal ZnO: (a) Struktur Kubus *Rocksalt*, (b) Struktur *Zinc Blende*, dan (c) Struktur *Wurtzite* (Qi, 2014)

Selain bergantung pada jenis material, struktur kristal dan ukuran butir partikel suatu lapisan tipis ZnO sangat mempengaruhi sifat optik dan elektriknya. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa orientasi dari nanokristal yang membentuk lapisan tipis sangat bergantung pada jenis substrat yang digunakan. Hal tersebut berkaitan dengan energi permukaan antara substrat dan lapisan tipis yang ditumbuhkan. Penggunaan substrat yang memiliki ketidaksesuaian kisi kecil, akan mempermudah pembentukan kristal menjadi lebih teratur (*preferred orientation*) dan seragam (Zheng *et al.*, 2015)

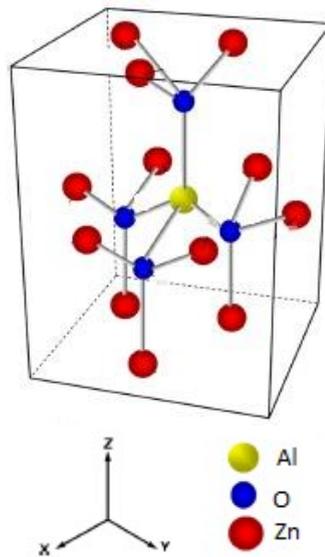
ALUMINIUM (Al)

Aluminium merupakan sebuah unsur yang nomor atomnya 13. Pada sistem periodik unsur, Aluminium termasuk golongan IIIA periode 3. Aluminium oksida atau yang lebih dikenal dengan

alumina adalah senyawa kimia dari aluminium dan oksigen dengan rumus kimia Al_2O_3 . Al_2O_3 mempunyai massa sebesar $26,9815386 \text{ gmol}^{-1}$, mempunyai titik leleh sebesar 2345 K ($2072 \text{ }^\circ\text{C}$) dan titik didihnya sebesar 3250 K ($2977 \text{ }^\circ\text{C}$) (Maftuchah, 2019). Al_2O_3 mempunyai struktur kristal *face center cubic* (fcc) dan mempunyai ikatan kimia berupa ikatan ionik. Material Al_2O_3 merupakan konduktor atau penghantar listrik yang baik karena terdapat delokalisasi elektron yang bebas bergerak atau berpindah sepanjang padatan atau cairan logam. Nilai resistivitas dari material Al_2O_3 sebesar $2,41 \mu\Omega\text{cm}$ (Ozcoban *et al.*, 2021).

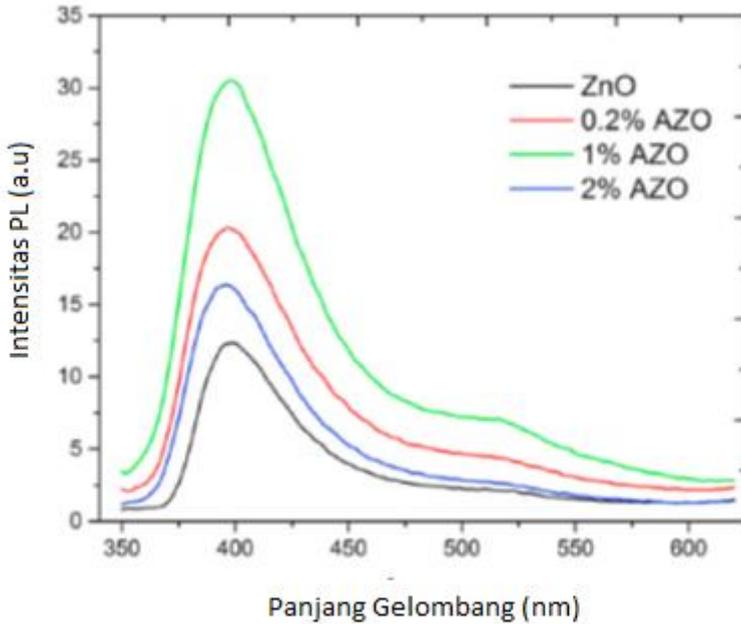
STRUKTUR ZnO:Al

Pada ZnO murni terjadi kekosongan oksigen dan penyisipan Zn pada komposisi yang *nonstoichiometric* (Kumar *et al.*, 2021; Gorban *et al.*, 2020; Khatibani & Shabankhah, 2021). Doping Al_2O_3 dapat menjadikan ion Al^{3+} menyisip dan menggantikan ion Zn^{2+} (Sugianto, 2016) dengan jari-jari ion Al^{3+} lebih kecil ($r = 0,054 \text{ nm}$) dari jari-jari atom Zn^{2+} ($r = 0,074 \text{ nm}$) (Bahedi *et al.*, 2011). Berdasarkan jari-jarinya, kita dapat mengetahui bahwa atom Zn^{2+} lebih reaktif dibandingkan dengan atom Al^{3+} karena semakin besar jari-jari atom, semakin mudah dalam melepaskan elektron. Kereaktifan suatu unsur juga bergantung pada kecenderungan kemudahan melepas atau menarik elektron. Struktur kristal ZnO:Al dapat dilihat pada Gambar 7.2.



Gambar 7.2. Struktur Kristal ZnO:Al (Maldonado & Stashans, 2010)

Untuk memperbaiki sifat atau karakteristik ZnO murni, dapat dilakukan dengan teknik doping (Li & Meng, 2014). Keberadaan Al dapat mempengaruhi sifat optik dari film tipis ZnO dimana doping Al dapat menggeser emisi film tipis ZnO pada panjang gelombang yang lebih besar (Al Farsi., *et al.*, 2021) seperti terlihat pada Gambar 7.3.



Gambar 7.3. (i) *Photoluminescence (PL)* ZnO dan ZnO:Al yang di *Annealing* pada Temperatur 550°C (Al Farsi *et al.*, 2021)

Gambar 7.3 terlihat bahwa intensitas PL meningkat kuat dengan doping Al yang menunjukkan pembentukan status trap baru dalam celah pita ZnO:Al yang menghasilkan transisi radiasi. Keadaan perangkat ini yang diinduksi oleh doping Al diharapkan memainkan peran utama dalam proses fotokatalitik. Perlu disebutkan bahwa spektrum PL film tipis ZnO:Al menunjukkan pergeseran biru dibandingkan dengan spektrum PL film tipis ZnO. Hal ini dikaitkan dengan pelebaran celah pita optik setelah diberi *doping* seperti yang diprediksi oleh efek Burstein-Moss (Khlayboonme & Thowladder, 2021).

FILM TIPIS

Film tipis merupakan suatu lapisan yang dapat terbuat dari bahan organik, anorganik, metal maupun campuran metal organik (*organometallic*) dengan ketebalan dalam orde nm (nanometer) hingga μm (mikrometer) yang dapat memiliki sifat-sifat konduktor,

semikonduktor, superkonduktor, maupun isolator. Film tipis dapat digolongkan sebagai nanoteknologi ketika memiliki ketebalan kurang dari 100 nm. Menurut Filipponi & Duncan (2013), skala nanometer secara konvensional yaitu pada ketebalan 1 – 100 nm. Kisaran ukuran minimum yaitu 1 nm, untuk menghindari adanya atom tunggal atau kelompok atom yang sangat kecil atau nano objek. Film tipis termasuk material zat padat. Zat padat dapat digolongkan menjadi dua material yaitu kristal dan amorf. Material kristal memiliki susunan atom-atom yang sangat teratur dan periodik sementara untuk atom-atom yang tersusun secara acak dan tidak memiliki pengulangan susunan atom-atom yang panjang dinamakan material amorf. Selanjutnya akan dibahas mengenai sifat-sifat film tipis sebagai berikut:

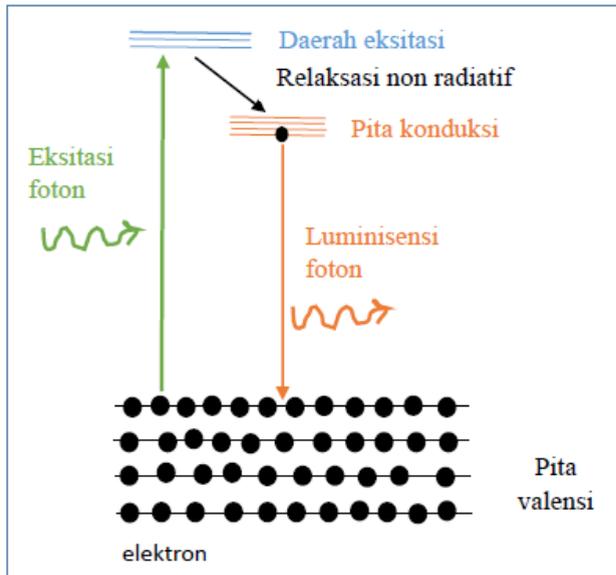
a. Sifat Optik Film Tipis

Sifat optik film tipis dapat menentukan karakteristik film tipis seperti absorpsi, transmitansi, reflektansi, dan luminesensi berdasarkan interaksi materi penyusun film terhadap cahaya. Salah satu uji sifat optik film tipis menggunakan *Photoluminescence* (PL) spektroskopi.

Luminesensi (*luminescence*) merupakan fenomena emisi cahaya oleh suatu zat. Luminesensi terjadi ketika elektron meloncat dari pita valensi menuju pita konduksi setelah dieksitasi oleh energi dari sumber eksitasi, kemudian kembali lagi ke keadaan dasarnya karena tidak stabil yang disebut dengan proses rekombinasi (Rahmayanti, 2015). Eksitasi elektron menunjukkan besarnya serapan optik film tipis terhadap energi foton dari panjang gelombang yang melewatinya. Gelombang elektromagnetik terserap apabila energi foton lebih besar dari energi gap (celah pita) film tipis dan energi yang lebih kecil dari energi gap dapat diteruskan.

Jika cahaya diarahkan ke arah sampel, selanjutnya cahaya tersebut akan diserap dan menjadikan energi berlebih ke dalam bahan yang disebut proses *photoexcitation*. Salah satu cara kelebihan energi ini bisa dihamburkan oleh sampel melalui emisi cahaya atau *luminescence*. Dalam kasus *photoexcitation*, luminesensi ini disebut *photoluminescence*. Jadi *photoluminescence*

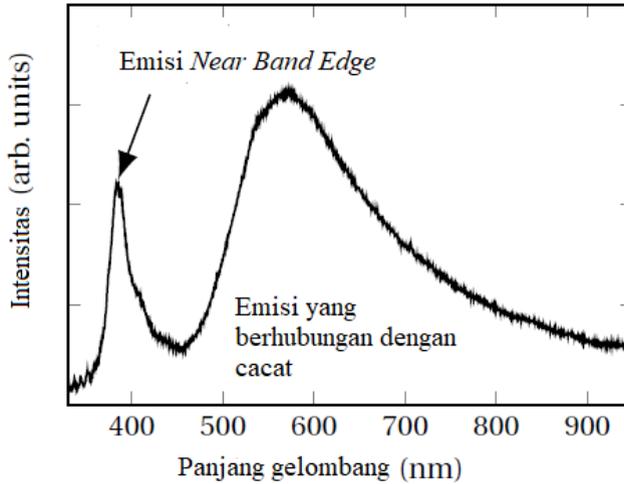
adalah emisi spontan cahaya dari bahan di bawah eksitasi optik (Patel, 2015). Prinsip terjadinya peristiwa PL ditunjukkan pada Gambar 7.4.



Gambar 7.4. Prinsip Spektroskopi PL

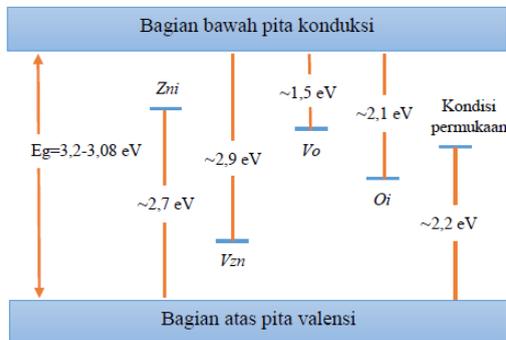
Emisi yang dihasilkan dapat memberikan informasi tentang struktur pita dan kecacatan pada suatu material melalui karakterisasi PL. Apabila hasil PL hanya memiliki satu puncak dengan energi emisi yang besarnya hampir sama dengan energi gap suatu material, menunjukkan bahwa tidak ada kecacatan yang terjadi pada material tersebut. Jika memiliki puncak emisi lebih dari satu menunjukkan adanya kecacatan yang terdapat pada material tersebut. Emisi film tipis ZnO ada dua macam yakni *near band edge* (NBE) yang terdapat pada rentang panjang gelombang ~ 390 nm dan puncak emisi akibat *defect* terdapat pada panjang gelombang 450 - 700 nm. NBE merupakan proses rekombinasi elektron langsung dari pita konduksi ke pita valensi, sedangkan rekombinasi pada panjang gelombang 450 - 700 nm diakibatkan oleh adanya *defect* sehingga muncul puncak lebih dari satu. PL film

tipis ZnO dengan panjang gelombang eksitasi 325 nm ditunjukkan pada Gambar 7.5.



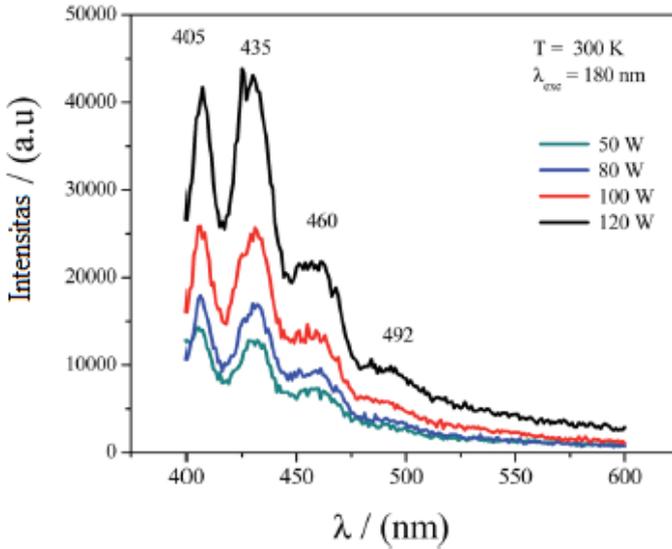
Gambar 7.5. Spektrum PL Film Tipis ZnO (Mickan, 2017)

Sebagaimana film tipis ZnO, film tipis ZnO:Al juga dapat diketahui kecacatannya berdasarkan emisi yang dihasilkan. *Defect* atau cacat pada film tipis ZnO:Al dari spektrum PL dapat diketahui berdasarkan skema yang ditunjukkan pada Gambar 7.6.



Gambar 7.6. Skema *Defect* pada Film Tipis ZnO:Al Berdasarkan Energi Puncak Emisi PL (Kaur *et al.*, 2015)

Hasil spektrum PL film tipis dipengaruhi oleh parameter-parameter yang digunakan pada saat penumbuhan film tipis. Salah satu parameter yang mempengaruhi hasil PL adalah daya plasma. Penelitian Srinatha *et al.* (2016) menunjukkan bahwa peningkatan intensitas PL sebanding dengan meningkatnya daya plasma film tipis ZnO:Al seperti pada Gambar 7.7.

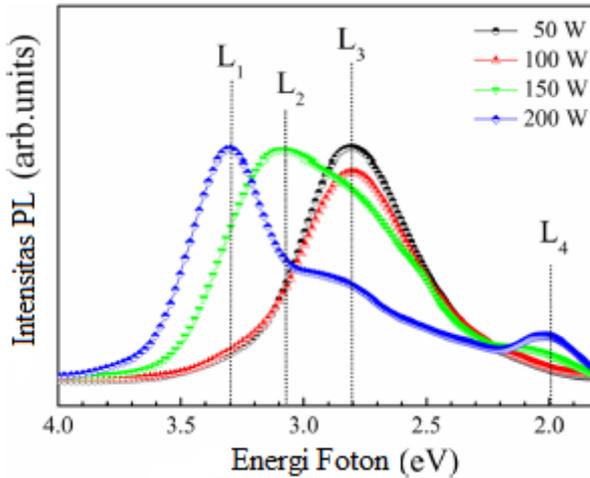


Gambar 7.7. PL Film Tipis ZnO:Al dengan Variasi Daya Plasma (Srinatha *et al.*, 2016)

Pada Gambar 7.7 terlihat bahwa penambahan daya plasma pada saat penumbuhan tidak mempengaruhi puncak-puncak emisi yang dihasilkan. Hal tersebut ditunjukkan pada semua sampel film tipis mempunyai puncak emisi didaerah 405, 435, 460, dan 492 nm ditemukan pada semua film tipis. Namun demikian intensitas emisi semakin meningkat dengan penambahan daya plasma yang digunakan pada saat penumbuhan film tipis ZnO:Al. Munculnya beberapa puncak tersebut menunjukkan bahwa *defect* terjadi pada semua film tipis yang dihasilkan.

Pada penelitian Hu *et al.* (2017), *defect* pada film tipis ZnO:Al dapat diketahui dari pergeseran puncak emisi yakni Puncak L_4 berada 2,28 eV di bawah pita konduksi dan terdapat cacat

interstitial (O_i). Puncak L_3 berada 2,80 eV di bawah pita konduksi dan terdapat cacat *vacancy oxygen* (Vo). Puncak emisi L_2 terletak 0,22 eV di bawah pita konduksi dan diketahui sampel mengalami cacat *interstitial Zn* (Zn_i). Puncak L_1 sebagai NBE yang merupakan proses rekombinasi elektron langsung dari pita konduksi ke pita valensi ketika penggunaan daya plasma paling besar seperti ditunjukkan pada Gambar 7.8.



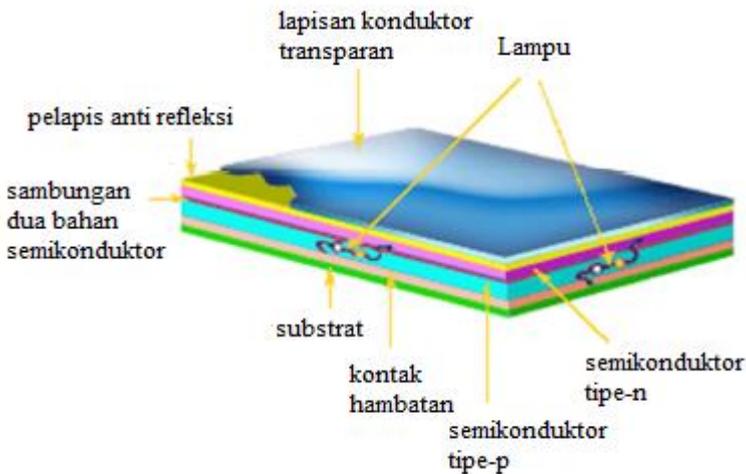
Gambar 7.8. Spektra PL Film Tipis ZnO:Al (Hu *et al.*, 2017)

SEL SURYA

Sel surya merupakan teknologi yang dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Berdasarkan teknologinya, sel surya ada beberapa jenis yaitu monokristalin, polikristalin, dan sel surya film tipis. Sel surya monokristalin dan polikristalin jarang dimanfaatkan karena bahan yang digunakan relatif mahal dan adanya banyak ruang kosong pada panel surya sehingga efektifitas penyerapan sinar matahari menjadi berkurang. Adapun sel surya film tipis banyak digunakan karena ringan dan fleksibel (Zhang *et al.*, 2021).

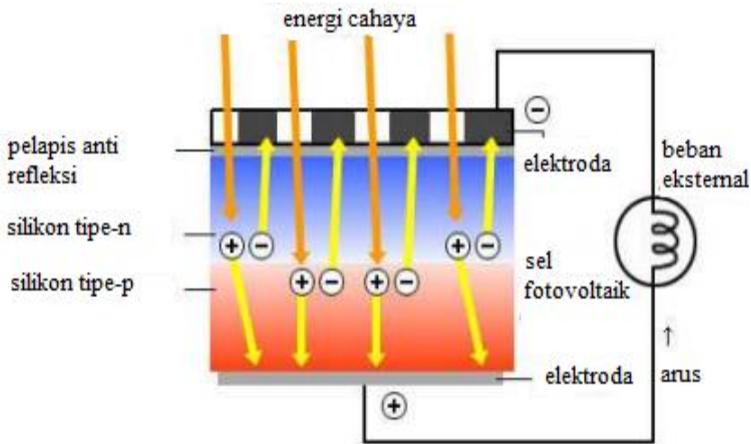
Pada sel surya, film tipis diaplikasikan untuk *Transparent Conductive Oxide* (TCO) sebagai *window layer*. TCO adalah semikonduktor yang memiliki lebar celah pita energi antara 3,50 - 4,30 eV (Govindarajan & Murali, 2021; Indris *et al.*, 2021). TCO

harus memiliki *band gap* yang lebih besar dari energi foton agar transparan pada cahaya tampak. Selain itu, TCO juga harus memiliki konsentrasi pembawa muatan yang memadai agar dapat bersifat konduktif. TCO banyak digunakan sebagai lapisan luar pada sel surya. TCO memiliki karakteristik resistivitas listrik yang rendah dan transparansi yang tinggi pada panjang gelombang visibel (Sugianto, 2015). Struktur lapisan film tipis pada sel surya ditunjukkan pada Gambar 7.9.



Gambar 7.9. Struktur Sel Surya Film Tipis (Bagher *et al.*, 2015)

Pada dasarnya sel surya terbuat dari bahan semikonduktor yang bekerja dengan proses fotovoltaik. Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik ditunjukkan dalam Gambar 7.10.



Gambar 7.10. Proses Pengubahan Energi Matahari Menjadi Energi Listrik pada Sel Surya (Sidopekso & Febriwiyanti, 2010)

Ketika energi matahari yang terdiri dari foton jatuh pada permukaan bahan sel surya, sebagian akan diserap. Pada saat permukaan bahan sel surya terkena cahaya dengan energi gap lebih dari 1,00 eV, terjadilah hubungan elektron dan *hole* melalui bahan semikonduktor. Elektron akan mengalir pada satu arah dan juga timbul aliran *hole* pada satu arah yang berlawanan sehingga timbul aliran arus yang bila dihubungkan pada suatu beban akan menimbulkan energi listrik (Sidopekso & Febriwiyanti, 2010).

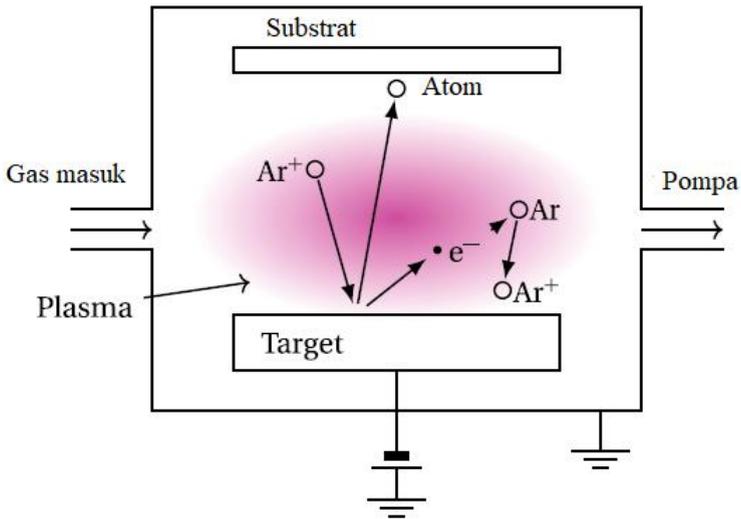
Pembuatan sel surya didesain dengan mempertimbangkan pengaruh dari parameter-parameter lain untuk mengoptimalkan kinerja dari sel surya. Oleh karenanya pembuatan sel surya masih bergantung pada parameter-parameter penting lainnya, seperti ketebalan lapisan, konsentrasi pengotor, temperatur operasional, serta parameter-parameter devais lainnya (Dharmadasa, 2014).

DC MAGNETRON SPUTTERING

Sputtering merupakan proses terlemparnya materi dari suatu permukaan zat padat atau cair akibat ditumbuk oleh partikel berenergi tinggi hingga terjadi pertukaran momentum (*momentum exchange*) (Widodo, 2012). Metode yang digunakan dalam penumbuhan film tipis ZnO:Al adalah metode *sputtering*. Hal

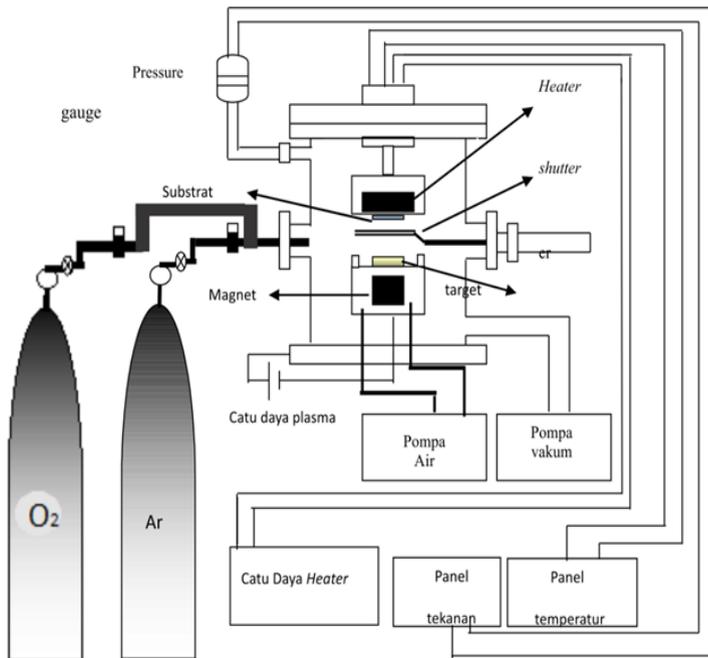
tersebut didasarkan pada kelebihan metode *sputtering* seperti dapat menghasilkan film tipis dari bahan yang mempunyai titik leleh tinggi, penghematan bahan yang akan dideposisikan, ketebalan lapisan dapat dikontrol dengan akurat dan temperatur substrat yang rendah (Sugianto *et al.*, 2016). Metode *sputtering* mempunyai beberapa tipe berdasarkan dari sumber penghasilan daya plasmanya yaitu *Radio Frekuensi (RF) sputtering* dan *Direct Current (DC) magnetron sputtering*.

DC magnetron sputtering terdiri dari sepasang elektroda berupa katoda dan anoda. Pada katoda dipasang target dan pada anoda dipasang substrat. Dalam *DC magnetron sputtering*, diperlukan bahan berupa gas argon sebagai gas plasma. Plasma merupakan gas yang terionisasi. Ionisasi merupakan proses munculnya ion di sekitar elektroda karena meningkatnya tegangan, sementara ion adalah atom atau molekul yang mempunyai jumlah elektron yang tidak sama dengan jumlah protonnya sehingga atom atau molekul tersebut bermuatan listrik. Penggunaan gas argon dalam penumbuhan film tipis karena argon merupakan gas mulia yang tidak bereaksi dengan bahan pelapis dan berfungsi membawa atom bahan pelapis (target) dari katoda menuju anoda. Argon sebagai gas plasma akan dipercepat dengan beda potensial sekitar ratusan hingga ribuan eV dan menumbuk elektroda negatif atau katoda. Akibatnya, atom target akan terlepas dari katoda menuju anoda. Skematik terhasilnya plasma argon pada proses *sputtering* ditunjukkan seperti Gambar 7.11.



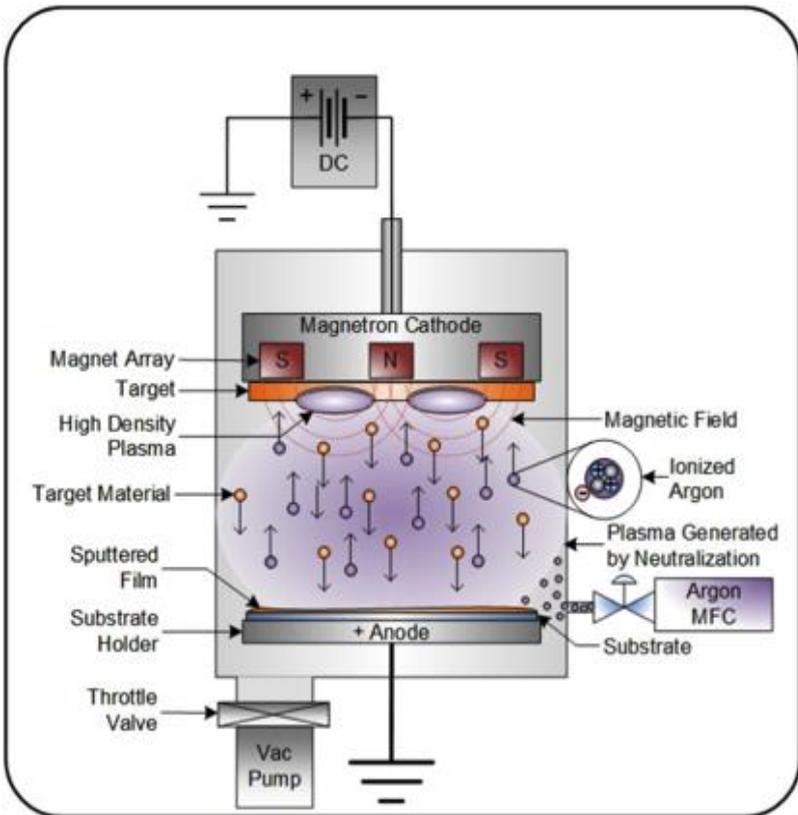
Gambar 7.11. Skematik Plasma Argon pada *Sputtering* (Mickan, 2017)

Sistem *DC magnetron sputtering* terdiri dari tabung plasma berbentuk silinder, sumber tegangan tinggi, sepasang elektroda, pemanas substrat, pendingin target, vakum, masukan gas *sputter* dan magnet. Pada proses deposisi dengan *DC magnetron sputtering* menggunakan prinsip medan magnet tertutup untuk mengarahkan atom target bergerak dari katoda menuju anoda. Pada anoda, atom target akan terdeposisi membentuk film tipis. Skematik *homemade DC magnetron sputtering* yang ada di Laboratorium Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang ditunjukkan pada Gambar 7.12.



Gambar 7.12. Skematik Alat *Homemade* DC Magnetic Spetturing (Marwoto, et al., 2010)

Keunggulan menggunakan *DC magnetron sputtering* dalam pembuatan film tipis sel surya adalah mampu menghasilkan lapisan yang seragam (homogen). Fabrikasi dengan menggunakan metode *DC magnetron sputtering* juga memberikan kemudahan dalam pengoperasiannya, tingkat deposisinya tinggi, prosesnya stabil, dan biaya relatif murah (Marwoto, et al., 2010). Adapun skema bagian-bagian dari sistem *DC magnetron sputtering* ditunjukkan pada Gambar 7.13.



Gambar 7.13. Skema Reaksi *DC Magnetron Sputtering* (Hughes, 2016)

Berdasarkan Gambar 7.13. dapat diketahui bahwa sistem *DC magnetron sputtering* terdiri dari anoda disertai substrat yang ditempeli atom-atom dari target pada katoda. *DC magnetron sputtering* juga dilengkapi sistem magnet untuk mengatur percikan-percikan atom dari target agar terfokus pada substrat, dan juga dilengkapi sistem pendingin untuk menjaga kestabilan temperatur sistem.

PEMBUATAN FILM TIPIS ZnO:Al

a. Pembuatan Target

Target ZnO doping Al terbuat dari serbuk ZnO dengan kemurnian 99,999% MW09023 USA dan Al_2O_3 dengan

kemurnian 99,999% MA01950 USA dengan massa total 10 gram. Mekanisme pembuatan target terbagi menjadi beberapa tahap seperti tahap pencampuran, pengepresan, dan sintering. Pada tahap pencampuran juga dilakukan penggerusan serbuk menggunakan mortar selama 5 jam. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan homogenitas dari material yang digunakan secara fisikal. Selanjutnya dilakukan proses pengepresan menggunakan pompa hidrolik selama 15 menit sehingga serbuk menjadi padat dan disebut sebagai *pellet*. Ukuran *pellet* yang digunakan adalah *pellet* dengan diameter 3 cm sesuai dengan tempat didalam vakum *chamber*. Untuk ukuran *chamber* yang berbeda maka diameter *pellet* yang digunakan juga akan berbeda. Terakhir, *pellet* tersebut di *sintering* pada suhu 900 °C selama 2,5 jam kemudian didinginkan menuju temperatur ruang dan *pellet* siap digunakan sebagai target.

b. *Preparasi Substrat*

Corning glass merupakan substrat yang digunakan pada deposisi film tipis ZnO:Al. Preparasi yang dilakukan meliputi pemotongan substrat dengan ukuran 1 cm x 1 cm dengan menggunakan *diamond cutter*. Proses pencucian dilakukan dengan menggunakan larutan metanol selama 15 menit dilanjutkan larutan aseton 10 menit pada *ultrasonic bath*. Setelah substrat dicuci, kemudian dikeringkan menggunakan gas Nitrogen yang disemprotkan ke seluruh permukaan substrat.

c. *Deposisi Film Tipis ZnO:Al*

Deposisi film tipis ZnO:Al dilakukan dengan reaktor *home made DC magnetron sputtering*. Langkah-langkah deposisi film tipis ZnO:Al sebagai berikut,

1. Menyalakan *sistem DC Magnetron Sputtering* dengan cara menekan tombol ON.
2. Mengatur *sistem DC Magnetron sputtering* pada keadaan *chamber* terbuka menggunakan panel SET pada suhu 100 °C dan *power supply* 15 volt. Proses

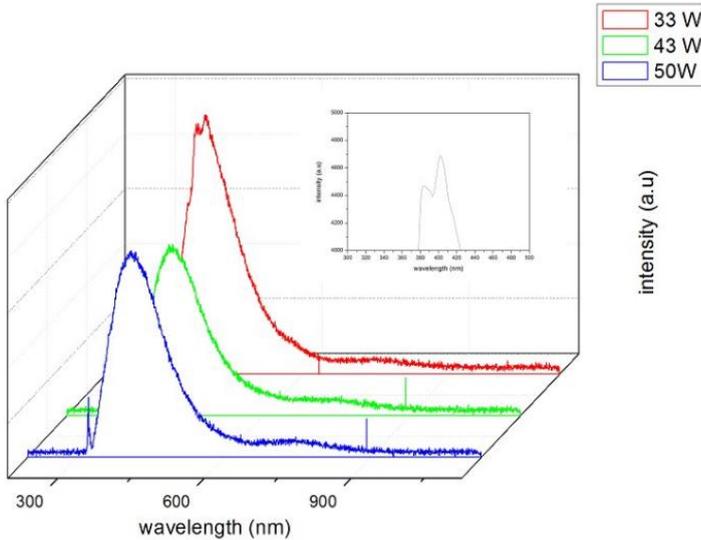
- pemanasan ini bertujuan untuk membantu merekatkan substrat pada anoda.
3. Memasang substrat pada anoda dengan perekat pasta perak, kemudian *chamber* ditutup.
 4. Menyalakan pompa rotari untuk memvakumkan *chamber* dari *DC Magnetron Sputtering*.
 5. Menyalakan alat ukur tekanan gas sampai keadaan vakum.
 6. Menyetel tekanan gas pada 500 mTorr dan suhu *chamber* 400 °C dengan sistem pendingin dinyalakan.
 7. Pada saat tekanan gas dan suhu stabil 500 mTorr dan 400 °C, kemudian mengatur daya plasma sesuai parameter, *shutter* dibuka ketika sudah stabil dan deposisi dilakukan selama 2 jam dengan daya plasma 33 W.
 8. Setelah deposisi selesai, *shutter* ditutup dan mematikan reaktor (proses *cooling down*)
 9. Setelah proses *cooling down* selesai, sampel film tipis diambil dan *chamber* dibersihkan.
 10. Selanjutnya dilakukan penumbuhan film tipis ZnO:Al menggunakan daya plasma 43 W dan 50 W berdasarkan langkah 1 sampai 9.

KARAKTERISASI DAN ANALISIS FILM TIPIS ZnO:Al

Sifat optik film tipis ZnO:Al dikarakterisasi menggunakan *photoluminescence* atau Fotoluminesensi spektroskopi. Fotoluminesensi adalah proses di mana molekul menyerap foton di daerah panjang gelombang cahaya tampak, menarik salah satu elektronnya ke keadaan tereksitasi elektronik yang lebih tinggi, dan kemudian memancarkan foton saat elektron kembali ke keadaan energi yang lebih rendah. Cahaya dengan panjang gelombang yang lebih pendek dan energi lebih besar lebih mudah melakukan proses eksitasi elektron pada suatu material. Elektron di dalam bahan bergerak dari pita valensi ke keadaan tereksitasi pada pita konduksi karena proses fotoeksitasi. Ketika elektron kembali ke pita valensi dengan memancarkan cahaya, proses ini dikenal sebagai proses radiasi. Sebaliknya, jika tidak ada emisi

cahaya yang dikenal sebagai proses nonradiatif. Umumnya, bahan semikonduktor memiliki transisi radiasi antara keadaan energi pada pita konduksi dan pita valensi.

Fotoluminesensi film tipis ZnO:Al pada substrat *corning glass* yang ditumbuhkan menggunakan *homemade DC magnetron sputtering* dengan daya plasma 33 W, 43 W, dan 50 W, pada panjang gelombang 200 - 1100 nm ditunjukkan pada Gambar 7.14.



Gambar 7.14. Hasil Karakterisasi *Photoluminescence* Sampel Film Tipis ZnO:Al dengan Variasi Daya Plasma (Astuti *et al.*, 2019)

Dari Gambar 7.14 terlihat bahwa untuk film tipis ZnO:Al yang dideposisikan dengan daya plasma 43 dan 50 W memiliki intensitas puncak emisi yang berbeda yaitu berpusat pada panjang gelombang cahaya 411,7 dan 408,3 nm sesuai dengan energi foton sekitar 3,00 dan 3,02 eV. Intensitas radiasi (emisi) meningkat seiring dengan peningkatan daya plasma. Hal ini menunjukkan bahwa dengan meningkatnya daya plasma dapat meningkatkan kebolehdan atom-atom terdeposit pada substrat (Astuti, *et al.*, 2019).

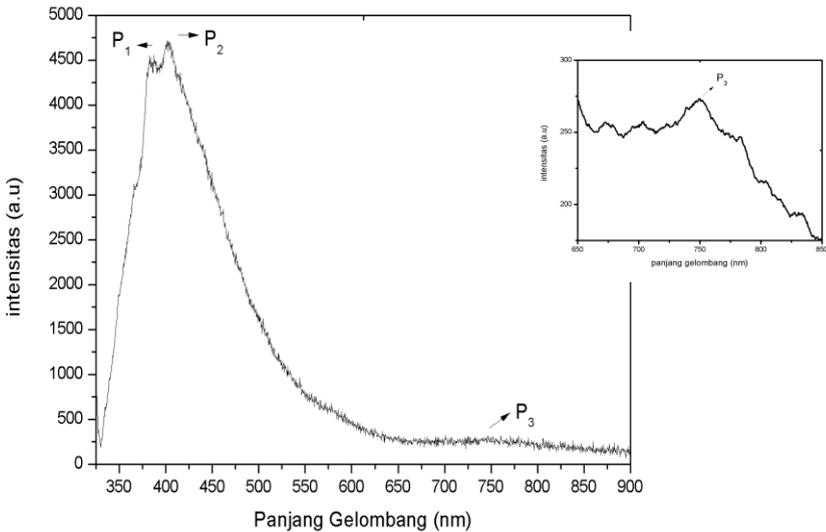
Selanjutnya, untuk film tipis ZnO:Al yang dideposisi dengan daya plasma 33 W, terdapat dua puncak spektrum fotoluminesensi;

satu puncak berada di wilayah UV yang berpusat pada panjang gelombang 385,8 nm sesuai dengan energi foton sekitar 3,20 eV dan puncak lainnya berada di wilayah cahaya tampak yang berpusat pada panjang gelombang 404,2 nm yang sesuai dengan energi foton sekitar 3,05 eV (lihat Gambar 7.15). Berdasarkan Gambar 7.14, terlihat bahwa film tipis ZnO:Al yang dideposisi dengan daya plasma rendah (33 W) memiliki intensitas emisi yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan pada proses pengendapan, ada unsur-unsur tertentu dari minyak di dalam pompa vakum yang naik ke dalam *chamber*. Selanjutnya, berdasarkan puncak spektrum fotoluminesensi dapat ditentukan nilai FWHM seperti ditunjukkan pada Tabel 7.3.

Tabel 7.3. FWHM dari Film Tipis ZnO:Al dengan Variasi Daya Plasma

Daya Plasma (Watt)	FWHM (eV)
33	8,70
43	9,28
50	9.55

Berdasarkan Tabel 7.2, terlihat bahwa nilai FWHM meningkat seiring dengan peningkatan daya plasma. Hal ini diasumsikan oleh pergeseran panjang gelombang pada film tipis. Selain itu, peningkatan FWHM juga diasumsikan karena adanya cacat interstisial unsur Zn pada proses peningkatan daya plasma (Hu *et al.*, 2017). Emisi yang terlihat luas dikaitkan dengan transisi elektronik dari tepi pita konduksi dekat ke akseptor level yang rendah dan transisi dari level donor yang rendah ke pita valensi (Kaur *et al.*, 2015).



Gambar 7.15. Spektrum *Photoluminescence* Kristal Film Tipis ZnO:Al dengan Daya Plasma 33W

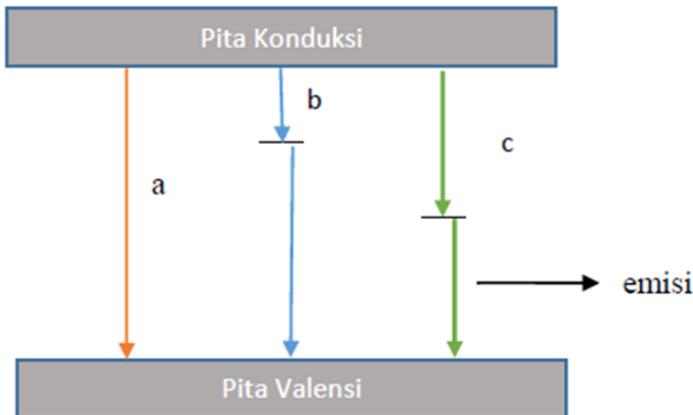
Dari Gambar 7.15 terlihat bahwa film tipis ZnO:Al yang ditumbuhkan dengan daya plasma 33W memiliki tiga puncak emisi. Puncak emisi yang pertama (P_1) berada pada panjang gelombang 385,8 nm dengan energi foton sebesar 3,20 eV. Puncak emisi yang kedua (P_2) berada pada panjang gelombang 404,2 nm dengan energi foton sebesar 3,05 eV, dan puncak emisi yang ketiga (P_3) berada pada panjang gelombang 750,0 nm dengan energi foton sebesar 1,65 eV. Besarnya energi yang diemisikan, menunjukkan *defect* atau kecacatan yang terdapat pada film tipis ZnO:Al. Selanjutnya, puncak emisi P_1 yang dihasilkan film tipis ZnO:Al merupakan emisi ultraviolet (UV emission) sebagai emisi karakteristik dari *band gap* ZnO:Al. Hasil ini sesuai dengan penelitian Kaur *et al.* (2015) yang menghasilkan puncak emisi ultraviolet di panjang gelombang 381,0 nm. Puncak emisi P_2 berada 0,32 eV di bawah pita konduksi yang menunjukkan terjadi transisi elektron dari level Z_{ni} ke pita valensi dan terdapat cacat interstitial Zn (Z_{ni}) pada struktur atom film tipis ZnO:Al. Z_{ni} mudah terbentuk

pada lingkungan dengan tingkat oksigen rendah pada saat penumbuhan, sehingga meningkatkan konsentrasi AlZn karena terjadi substitusi Al pada Zn (AlZn). Hal yang sama juga diungkapkan Hu *et al.* (2017) yang menghasilkan emisi pada 0,22 eV di bawah pita konduksi dan terdapat kecacatan Z_{ni} . Puncak P_3 berada pada 1,60 eV di bawah pita konduksi yang menunjukkan transisi elektron dari level V_o ke pita valensi dan terdapat cacat *vacancy oxygen* (V_o). Munculnya cacat V_o ini dimungkinkan akibat rendahnya oksigen pada proses deposisi (Hu *et al.*, 2017). Rendahnya puncak P_3 menunjukkan bahwa cacat V_o yang terdapat pada film tipis ZnO:Al sangat rendah sehingga dapat dikatakan film tipis ZnO:Al yang ditumbuhkan dengan daya plasma 33W sudah memiliki kualitas yang cukup bagus.

Selanjutnya, cacat kekosongan oksigen (*vacancy oxygen*, V_o) dan interstitial Zn (Z_{ni}) berperan penting dalam mekanisme konduksi. Cacat kekosongan oksigen (V_o) dan interstitial Zn (Z_{ni}) sebagai donor mampu meningkatkan konsentrasi pembawa muatan. Adanya Z_{ni} meningkatkan konsentrasi AlZn (substitusi Al pada atom Zn) (Hu *et al.*, 2017). Substitusi Al menggantikan Zn menyebabkan elektron bebas yang bergerak semakin banyak karena terjadi vibrasi antar ikatan atom. Hal ini menjadikan film tipis ZnO:Al bersifat konduktif apabila diberikan medan listrik sehingga sesuai untuk aplikasi TCO (Sugianto *et al.*, 2016).

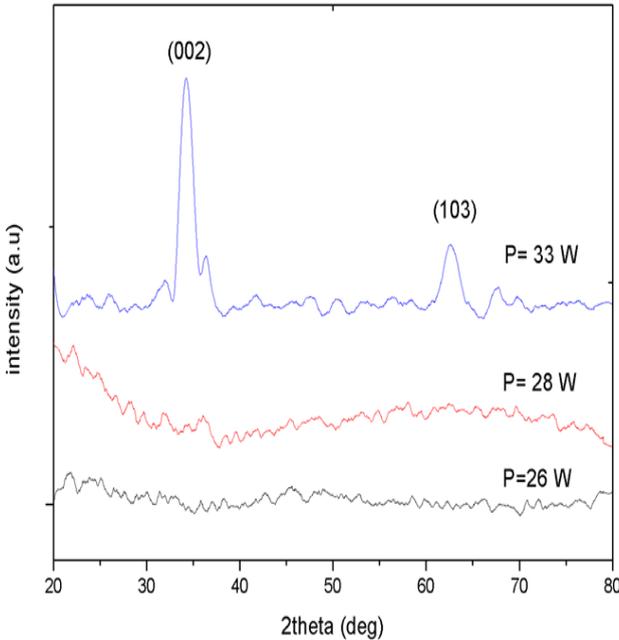
Fenomena lain yang dapat dijelaskan dari hasil karakterisasi PL adalah absorpsi optik, yang terjadi jika energi foton yang datang lebih besar dari energi gap material (film tipis). Efek dari absorpsi optik adalah terjadinya eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dan *hole* pada pita valensi. Elektron yang berada pada pita konduksi bersifat sementara atau metastabil dimana akan kembali ke pita valensi yang dikenal dengan proses rekombinasi. Peristiwa rekombinasi elektron dari pita konduksi ke *hole* di pita valensi dapat melalui dua mekanisme, yaitu dengan memancarkan radiasi atau tanpa memancarkan radiasi. Pada fenomena PL, proses rekombinasi dengan memancarkan radiasi (emisi) cahaya tampak. Banyaknya puncak emisi dari film tipis menunjukkan kemurnian dari material yang ditumbuhkan. Untuk material dengan

kemurnian dan kesempurnaan yang baik, hanya memiliki satu puncak fotoluminesen, dan untuk material dengan ketakmurnian dan *defect* atau cacat kristal yang cukup tinggi ditunjukkan dari adanya beberapa puncak fotoluminesen yang dihasilkan seperti pada penelitian Hu *et al.* (2017). Selanjutnya, banyaknya puncak PL yang muncul dapat ditafsirkan sebagai akibat adanya mekanisme lompatan *multi-defect*. Dengan kata lain, *defect* berperan sebagai *trapped* pada *band-tail* di dalam *band gap*. Peristiwa rekombinasi yang terjadi pada satu *defect*, kemudian dilanjutkan dengan rekombinasi pada *defect* yang lain dengan level energi yang lebih rendah sehingga menghasilkan puncak PL lebih dari satu. Film tipis ZnO:Al yang ditumbuhkan dengan daya plasma 33W memiliki tiga puncak emisi yang menunjukkan ada tiga proses rekombinasi. Tiga proses rekombinasi tersebut di antaranya *near band edge* (NBE) yaitu rekombinasi elektron langsung dari pita konduksi ke pita valensi, rekombinasi kedua yakni rekombinasi elektron dari trap Zn ke pita valensi, dan rekombinasi yang ketiga yaitu dari trap V_o ke pita valensi. Skema ketiga rekombinasi film tipis ZnO:Al berturut-turut dengan simbol a, b, dan c ditunjukkan pada Gambar 7.16.



Gambar 7.16. Skema Proses Rekombinasi Film Tipis ZnO:Al yang Ditumbuhkan Dengan Daya Plasma 33W

Sifat optik suatu film tipis juga dipengaruhi oleh bentuk kekrystalannya. Hasil dari XRD pada film tipis ZnO:Al dengan variasi daya plasma ditunjukkan pada Gambar 7.17. Data difraksi yang didapatkan dicocokkan dengan data JCPDS ZnO (Nomor kartu 01-1136).



Gambar 7.17. Spektrum XRD Film Tipis ZnO:Al pada Daya Plasma 26, 28 dan 33W

Puncak difraksi dari film tipis ZnO:Al berada pada $2\theta = 34,3^\circ$ dan $62,6^\circ$. Kedua puncak difraksi tersebut menunjukkan orientasi bidang kristal (002) dan (103). Film tipis ZnO:Al dengan struktur polikristal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya (Astuti *et al.*, 2018). Sesuai teori, sebuah kristal meskipun homogen tetapi anisotrop, yang artinya sifat fisika maupun sifat kimia ke berbagai arah berbeda. Hal tersebut berarti bahwa orientasi bidang kristal (002) mempunyai sifat yang berbeda dengan orientasi bidang kristal (103). Berdasarkan perbedaan sifat dari bidang orientasi

tersebut, maka dominasi bidang orientasi memberikan informasi terhadap aplikasi dari dominasi bidang orientasi Kristal yang dihasilkan. Misalkan dominasi bidang orientasi (002) dapat dimanfaatkan untuk bahan window layer pada teknologi sel surya (Ayachi et al., 2022; Salim et al., 2021), sementara untuk dominan bidang orientasi (103) merupakan kandidat bahan devais optoelektronik pada daerah UV (Challali et al., 2020). Namun demikian, penentuan pemanfaatan suatu bahan tentunya tidak hanya ditinjau dari struktur Kristal saja, tapi juga sifat-sifat yang seperti morfologi permukaan yang dapat diketahui melalui karakterisasi scanning electron microscope (SEM) dan atau atomic force microscope (AFM), komposisi penyusun Kristal yang diketahui melalui karakterisasi energy dispersive x-ray (EDX), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). Selanjutnya juga informasi energy ikat Kristal dari bahan tersebut perlu diketahui dengan menggunakan X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), sifat Optik dan sifat listrik bahan juga perlu dipelajari dengan detail.

Gambar 7.17 menunjukkan kristal film tipis ZnO:Al yang anisotrop, yaitu memiliki dua arah bidang orientasi yang berbeda sehingga memiliki struktur atom yang berbeda pula. Puncak-puncak difraksi dari film tipis ZnO:Al menunjukkan bahwa kristal film tipis yang diperoleh bersifat polikristalin (Srinatha *et al.*, 2016). Puncak difraksi yang dominan dari film tipis ZnO:Al yang dihasilkan adalah bidang orientasi (002). Hal tersebut ditunjukkan dari tingginya intensitas puncak difraksi pada bidang (002) dibandingkan bidang orientasi (103). Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa kristal film tipis ZnO:Al yang dihasilkan adalah heksagonal wurtzite pada sumbu-c (Sulhadi *et al.*, 2015). Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa film tipis ZnO:Al yang ditumbuhkan dengan menggunakan metode homemade *DC Magnetron sputtering* untuk variasi daya plasma 33 W sudah dapat menghasilkan film tipis yang bersifat polikristal dengan struktur heksagonal wurtzite dengan dominan orientasi pada sumbu-c. Dan dengan peningkatan daya plasma lebih besar dari 33 W maka kualitas Kristal film tipisnya semakin baik. Hal tersebut didukung dengan penelitian dari Abdulrahman *et al.* (2021) yang

menyatakan bahwa dengan peningkatan daya plasma dapat meningkatkan kristalinitas dan pertumbuhan butir serta menghasilkan cacat yang lebih sedikit pada film yang terbentuk. Hal tersebut juga dikonfirmasi oleh Srinatha *et al.* (2016), fenomena tersebut terlihat jelas ketika film tipis ZnO yang didoping Al diganti dengan film tipis ZnO. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa daya plasma yang minimum yang dapat diberikan pada *homemade DC magnetron sputtering* yang ada di Laboratorium Material Film Tipis Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengathuan Alam Universitas Negeri Semarang adalah 33 W. Hal tersebut didasarkan pada penelitian Maftuchah (2019), diperoleh bahwa untuk daya plasma kurang dari 33W maka film tipis ZnO:Al yang diperoleh masih bersifat amorf seperti yang ditunjukkan Gambar 7.17. Film tipis berstruktur amorf memiliki susunan atom yang tidak teratur sehingga interferensi dari gelombang-gelombang terdifraksi tidak mengalami interferensi konstruktif, namun interferensi destruktif. Dengan demikian gelombang yang terdifraksi mempunyai intensitas yang sangat rendah, sehingga tidak muncul sembarang puncak difraksi (Aryanto *et al.*, 2017). Rendahnya puncak difraksi disebabkan karena daya plasma yang rendah sehingga energi kinetik dan momentum atom-atom target yang menuju substrat kecil sehingga film yang tumbuh juga tidak cukup banyak. Peningkatan daya plasma selama proses penumbuhan film tipis menyebabkan energi kinetik dan momentum atom-atom target yang menuju substrat semakin bertambah.

SIMPULAN

Deposisi film tipis ZnO:Al dengan variasi daya plasma dengan menggunakan metode *homemade DC Magnetron sputtering* yang ada di Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Negeri Semarang telah berhasil ditumbuhkan. Peningkatan daya plasma pada diberikan pada proses deposisi film tipis ZnO:Al telah mempengaruhi intensitas fotoluminesensi yang dihasilkan. Hal tersebut juga ditunjukkan dengan nilai FWHM yang meningkat karena adanya pergeseran panjang gelombang emisi menuju panjang gelombang

panjang dengan meningkatnya daya plasma. Selain itu, peningkatan daya plasma juga mempengaruhi sifat kristal yang ditumbuhkan, dimana untuk daya plasma lebih dari 33 W telah bersifat Kristal dan kurang dari 33 W, film yang terbentuk masih bersifat amorf. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa, film tipis ZnO:Al yang ditumbuhkan dengan *homemade DC Magnetron sputtering* minimal dengan daya plasma 33 W.

UCAPAN TERIMA KASIH

Karya ini didukung oleh Program DIPA Fakultas MIPA Universitas Negeri Semarang dengan dana hibah dari Kementerian Pendidikan Tinggi dan Riset dengan no kontrak 042.01.2.400899/2018, tanggal 5 Desember 2018. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Agus Andi Wibowo, S.Si. yang telah membantu dalam proses teknis.

Daftar Pustaka

- Abdulrahman, A.F., Barzinjy A.A., Hamad S.M., & Almessiere M.A., 2021. Impact of Radio Frequency Plasma Power on the Structure Crystallinity, Dislocation Density and the Energy Band Gap of ZnO Nanostructure. *ACS Omega*, 6, pp.31605-31614.
- Al-Farsi, B., Souier, T.M., Al Marzouqi, F., Al Maashari, M., Bououdiva, M., Widatallah, H.M., & Al Abri, M., 2021. Structural and Optical Properties of Visible Active Photocatalytic Al Doped ZnO Nanostructured Thin Films Prepared by Dip Coating. *Optical Materials*, 113, pp.110868.
- Al-Wardy, R.A., Abbas, A.S., & Abbas, S.I., 2021. Optical Properties of ZnO Films Prepared by CBD Technique. *Jornal of Ovonic Reaserch*, 17(1), pp.53-60.
- Aryanto, D., Husniya, N., Sudiro, T., & Hastuti, E., 2017. Perlakuan Panas Ganda Pada Fabrikasi Film Tipis AZO Nanokristal dengan Teknik Spray: Studi XRD. *Metallurgi*, 2, pp.45-52.
- Astuti, B., Sugianto, Mahmudah, S.N., Zannah, R., Putra, N.M.D., Marwoto, P., Aryanto, D., & Wibowo, E., 2018. Structural and

- Morphological Study on ZnO:Al Thin Films Grown Using DC Magnetron Sputtering. *Journal of Physics*, 983, pp.1-6.
- Astuti, B., Sugianto, Maftuchah, I., Firmahaya, N.A., Marwoto, P., Ratnasari, F.D., Muttaqin, R., Setyaningsih, N.E., Aryanto, D., & Isnaeni., 2019. Photoluminescence Study of ZnO:Al thin Films with Different Power Plasma. *Journal of Physics: Conference Series*, 1321, pp.022009.
- Astuti, B., Marwoto, P., Zhafirah, A., Hamid, N., Aryanto, D., Sugianto., Sulhadi., Putra, N.M.D., & Fianti., 2021. Structure, Morphology, and Optical Properties of ZnO:Mg thin Film Prepared by Sol-gel Spin Coating Method. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-BiRuNi*, 10(2), pp.75-84.
- Ayachi M., Ayad, F., Djelloul A., Benharrat, L., & Anas, S., 2022, Synthesis and Characterization of Ni doped ZnO Thin Films Prepared by Sol Gel Spin Coating Method. *Semiconductor*, 55, pp.482-490.
- Bahedi, K., Addou, M., Jouad, M.E., Sofiani, Z., Oauzzani, H.E., & Sahraoui, B., 2011. Influence of Strain/Stress on The Nonlinear-optical Properties of Sprayed Deposited ZnO:Al Thin Films. *Applied Surface Science*, 257(18), pp.8003–8005.
- Bagher, A.M., Vahid, M.M.A., & Mohsen, M., 2015. Types of Solar cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), pp.94-113.
- Barman, B., Suarmi, S.K., & Dutta, V., 2021. Fabrication of Highly Conducting ZnO/Ag/ZnO and AZO/Ag/AZO Transparent Conducting Oxide Layer Using RF Magnetron Sputtering at Room Temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 129, pp.105801.
- Bazant, P., Kuritka, I., Munster, L., Machovsky, M., Kozakova, Z., & Saha, P., 2014. Hybrid Nanostructured Ag/ZnO Decorated Powder Cellulose Fillers for Medical Plastics with Enhanced Surface Antibacterial Activity. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 25, pp.2501–2512.
- Challali, F., Mendil, D., Touam T., Chouveau, T., Bockelee, V., Sanchez, A.G., Chelouche, A., & Besland, M.P., 2020, Effect of RF Sputtering Power and Vacuum Annealing on the Properties

- of AZO Thin Films Prepared from Ceramic target in Confocal Configuration, *Materials Science in Semiconductor processing*, 118, pp.105217.
- Cuandra, J.G., Porcar, S., Fragu, D., Stoyanova-Lyu Denova, T., & Carda, J.B., 2021. Enhanced Electrical properties of Alkali Doped ZnO Thin Films with Chemical process. *Solar*, 1, pp.30-40.
- Das, D., & Mondal, P., 2014. Photoluminescence Phenomena Prevailing in c-axis Oriented Intrinsic ZnO Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering. *RSC Advances*, 4, pp.35735.
- Dharmadasa, I.M., Bingham, P.A., Echendu, O.K., Salim, H.I., Druffel, T., Dharmadasa, R., Sumanasekera, G.U., Dharmasena, R.R., Bergacheva, M.B., Mit, K.A., Urazov, K.A., Bowen, L., Walls, M., & Abbas, A., 2014. Fabrication of CdS/CdTe-Based Thin Film Solar Cells Using an Electrochemical Technique. *Coatings*, 4(3), pp.380-415.
- Durri, S., 2015. Karakterisasi Sifat Optik Lapisan Tipis ZnO doping Al yang dideposisi di atas Kaca dengan Metode Sol-Gel Teknik SprayCoating. *Jurnal Fisika Indonesia*, 55(19), pp.38-40.
- Fakharan, Z., & Dabirian, A., 2021. Metal Grid Technologies for Flexible Transparent Conductors in Large Area Opoelectronics Current. *Applied Physics*, 31, pp.105-121.
- Filipponi, L., & Duncan, S., 2013. *Nanotechnologies: Principles, Applications, Implications and Hands-on Activities*. Luxembourg: European Union.
- Gorban, O., Dankenko, I., Gorban, S., Volkova, G., Akhkozar, L., & Doroshenko, T., 2021. Photoactive Widegap Oxide Doped ZnO with Non-Stoichiometric Matrix: Aspects of Formation. *Topics in Catalyst*, 64, pp.797-805.
- Govindarajan, R., & Murali, K.R., 2021. Optical Performance of Thin Films Prepared by Sol Gel Deep Coating Technique using Acrylamide Route. *Research Square*, 2021, pp.1-16.
- Hu, Y.M., Li, J.Y., Chen, N.Y., Chen, C.Y., Han, T.C., & Yu, C.C., 2017. Effect of Sputtering Power on Crystallinity, Intrinsic Defects, and Optical and Electrical Properties of Al-doped ZnO

- Transparent Conducting Thin Films for Optoelectronic Devices. *Journal of Applied Physics*, 121(8), pp.1-6.
- Hughes, M., 2016. *The Global Source Semicore Equipment Inc.* USA.
- Kara, R., & Siab, R., 2021. Parametric Study of Seed Layer Assisted Electrochemical Growth of High Quality ZnMgO Thin Films on ZnO Coated FTO Substrates: Effect of Seed Layer Thickness. *Applied Physics A*, 127, pp.793.
- Kaur, G., Mitra, A., & Yadav, K.L., 2015. Pulsed Laser Deposited Al-doped ZnO Thin Films for Optical Applications. *Progress in Natural Science: Materials International*, 25(1), pp.2-21.
- Khatibani, A.B., & Shabankhah, A., 2021. Fabrication and Ethanol Sensing of Sol Gel Grown ZnO Oxide Powder, the Effect of Cobalt and Copper Doping. *Applied Physics A*, 127, pp.308.
- Khlayboonme, S.T., & Thowladda, W., 2021. Impact of Al doping on Structural, Electrical and Optical Properties of Sol Gel Dip Coating ZnO:Al Thin Film. *Materials Research Express*, 8(7), pp.76402.
- Kumar, M., Chauhan, M.S., Akhtar, M.S., & Umar, A., 2021. Effect of Cerium Ions in Ce Doped ZnO Nanostructures on Their Photocatalytic and Picric Acid Chemical Sensing. *Ceramics International*, 47(3), pp.3089-3098.
- Lewis, P.M., Deepak, H.N., Choudhari, K.S., & Kulkarni, S.D., 2022. White Light Emitting ZnO Nano Particles Exhibiting Color Temperature Tunability with Near UV Excitation and High Color Rendering. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 138, pp.106284.
- Li, Z., Li, J., Lei, J., Xiong, M., Wang, N., & Zhang, S., 2021. First Principles Study of Structure, Electrical and Optical Properties of Al and Mo Co-doped ZnO. *Vacuum*, 186, pp.110062.
- Li, Y., & Meng, J., 2014. Al-doping Effects On Structure and Optical Properties of ZnO Nanostructures, *Materials Letters*, 117, pp.260-262.
- Maftuchah, I., 2019. Studi Struktur, Morfologi Permukaan, dan Photoluminescence Film Tipis ZnO:Al dengan Metode DC Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA UNNES

- Maldonado, F., & Stashans, A., 2010. Al-doped ZnO: Electronic, Electrical and Structural Properties. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71, pp.784 – 787.
- Marwoto P., Mustaanah., Sugianto., & Sulhadi., 2010. Struktur dan Sifat Optik Film Tipis Galium Oksida Doping ZnO (2%) yang Difabrikasikan dengan DC Magnetron Sputtering. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY*, pp.122-127
- Marwoto, P., Sugianto., Sulhadi., Aryanto, D., Wibowo, E., & Yanti., 2015. Highly Oriented ZnO:Al Thin Films as an Alternative Transparent Conducting Oxide (TCO) for Windows Layer of Solar Cells. *Advanced Materials Research*, 1123, pp.364-367.
- Marwoto, P., Fatiatun., Sulhadi., Sugianto., & Aryanto, D., 2016. Effects of Argon Pressure on the Properties of ZnO:Ga Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering. *AIP Conference Proceedings*, 1719, pp.030016.
- Mikhliif, H.M., Dawood, M.O., Abdul Munew, O.M., & Mejbil, M.K., 2021. Preparation of High Performance Room Temperature ZnO Nanostructure Gas Sensor. *Acta Physica Polonica A*, 140(4), pp.320-326.
- Ming-Yu, Y., Tao-Hsin, C., Po-Hsun, L., Sheng-Lung, Tu., & Yun, H.S., 2021. Effect of Annealing Temperature on Structural and Opto Electronics Properties of ZnO doped ZnO Thin Films for Photo Sensors. *Sensors and Materials*, 33(11), pp.3941-3948.
- Mickan, M., 2017. *Deposition of Al-doped ZnO Films by High Power Impulse Magnetron Sputtering* Part of Joint European Doctoral Program in Materials Science and Engineering (DocMASE) in Collaboration with Institut Jean Lamour. France: University of Lorraine. pp.1-67.
- Mourad, S., El Ghoul, J., Khetto, A., Mari, B., Abdel Ali, N., Khouqeer, G., El-Mir, L., & Khirouni, K., 2022. Effect of Oxygen Annealing Treatment on Structural, optical and Electrical Properties of In Doped ZnO Thin Films Prepared by PLD Technique. *Physics B: Condensed Matter*, 628, pp.413577.
- Murkute, P., Ghadi, H., Sushama, S., & Chakrabarti, S., 2021. Realization of High Quality RF Sputtered ZnMgO (x = 15%)

- Thin Films by Post Growth Annealing Temperature. *Superlattices and Micro Structures*, 156, pp.106977.
- Mursal., & Yuvita, E., 2015. The Effect of Pre-annealing Temperature on Structural Characteristics of ZnO Thin Films Deposited by Sol-Gel Method. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 4(1), pp.43-48.
- Ozcoban, M.S., Isenkuj, M.E., Sevgen, S., Acarer, S., & Tufekci, M., 2021. Modelling the Effect of Nanomaterials Addition on the Permeability of the Cocupated Clay Soil using Machine Learning Based Flow Resistance Analysis. *Applied Sciences*, 12(1), pp.186.
- Patel, N.H., 2015. *Basic Principle, Working and Instrumentation of Experimental Techniques*. Gujarat: Sardar Patel University.
- Qi, L.L., 2014. Study on Preparation of Porous ZnO Microspheres and Photocatalytic Performance. *Applied Mechanics and Materials*, 686, pp.45-50.
- Rodnyi, P.A., & Khodyuk, I.V., 2011. Optical and Luminescence Properties of Zinc Oxide (Review). *Opticals and Spectroscopy*, 111, pp.776-785.
- Salim, K., Amroun, M.M., & Azzaoui, W., 2021, Influence of Doping Concentration on the properties of Tin Doped Zinc Oxide Thin Film Prepared by Spray Pyrolysis for Photovoltaic Applications. *Int. J. Thin Film Sci Tec*, 10(3), pp.197-204.
- Shaba. E.Y., Jacob, J.O., Tijani, J.O., & Suleiman, M.A.T., 2021. A Critical Review of Synthesis Parameters Affecting the Properties of Zinc Oxide Nanoparticle and Its Application in Wastewater Treatment. *Applied Water Science*, 11, pp.41-48.
- Sidopekso, S., & Febriwiyanti, A.E., 2010. Studi Peningkatan Ouput Modul Surya dengan Menggunakan Reflektor. *Berkala Fisika*, 12 (3), pp.101-104.
- Singh, P., Singh, K.R.B., Singh, J., Prasad, P., & Singh, R.P., 2021. Bioinspired Triangular ZnO Nanoclusters Synthesized by *Argyrea nervosa* nascent Leaf Extract for the Efficient Electrochemical Determination of Vitamin C. *RSC Advance*, 11, pp.25752-25763.
- Srinatha, N., No, Y.S., Kamble, V.B., Chakravarty, S., Suriyamurthy, N., Angadi, B., & Choi, W.K., 2016. Effect of RF Power on The

- Structural, Optical and Gas Sensing Properties of RF-sputtered Al doped ZnO Thin Films. *RSC Advances*, 6(12), pp.9779–9788.
- Sugianto., Marwoto, P., Astuti, B., Zannah, R., & Yanti., 2015. Pengaruh Temperatur Deposisi terhadap Struktur dan Sifat Optik Film Tipis ZnO:Al dengan metode DC Magnetron Sputtering. *Jurnal Fisika*, 5(2)., pp.1-7.
- Sugianto., Zannah, R., Mahmudah, S.N., Astuti, B., Putra, N.M.D., Wibowo, A.A., Marwoto, P., Aryanto, D., & Wibowo, E., 2015. Pengaruh Temperatur Annealing Pada Sifat Listrik Film Tipis Zinc Oksida Doping Aluminium Oksida. *Jurnal MIPA*, 39(2), pp.115-122.
- Sulhadi., Fatiatun., Marwoto, P., Sugianto., & Wibowo, E., 2015. Variasi Suhu Deposisi pada Struktur, Sifat Optik dan Listrik Film Tipis Seng Oksida dengan Doping Galium (ZnO:Ga). *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 11(1), pp.93-99.
- Taylor, C.M., Ramires-Canon Angela, Wenk, J., & Mattia, D., 2019. Enhancing the Photocorrosion Resistance of ZnO Nanowires Photocatalysis. *Journal of Hazardous Materials*, 378, pp.120799.
- Vu, D.V.K.D.H., Nguyen, C.X., & Trinh, T.Q., 2019. Comparison of Structural at Electrical Properties of ZnO Based n-type Thin Films with Different Dopant for Thermo Electric Applicarion. *Journal of Sol Gel Scienece and Technology*, 91, pp.146-153.
- Widodo, S., 2012. Teknologi Pendeposisian Film Tipis Metal Dengan Metode DCSputtering. *Seminar Nasional Fisika*, 1, pp.76-81.
- Xin, M., 2021. Growth Temperature on ZnO:Al Thin Films Morphology and Optical Properties. *Surface Eengineering*, 37(37), pp.1476-1483.
- Zayed, M., Ahmed, A.M., & Shaban, M., 2019. Synthesis and Characteruzation of Nano Porous ZnO and Pt/ZnO Thin Films for Dye Degradation and Water Splitting Application. *International Journal of Hydrogen Eneregy*, 44(33), pp.17630-17648.

- Zhang, S., Zhang, T., Liu, Z., Wang, J., Yu, L., Xu, J., Chen, K., & Baburrocas, P.R., 2021. Highly Flexible Radial Tandem Junction Thin Film Solar Cells With Excellent Power to Weight Ratio. *Nano Energy*, 86, pp.106121.
- Zheng, J., Zhaq, Q., Tang, T., Yincalvin, J., Quilty, D., Renderos, G.D., Liu, X., Deng, Y., Wang, L., & Archer, L.A., 2021. Reversible Epitaxial Electrodeposition of Metals in Battery Anodes. *Science*, 366(6465), pp.645-648.