



**DEPOSISI DAN KARAKTERISASI FILM TIPIS
CdS/CdTe:Cu YANG DITUMBUHKAN DENGAN
METODE DC MAGNETRON SPUTTERING**

SKRIPSI

**disajikan sebagai syarat penyelesaian Studi Strata 1
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika**

**PERPUSTAKAAN
UNNES**

**oleh
Syamsul Hadi
4250408013**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

2013

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, 20 Pebruari 2013

Syamsul Hadi
4250408013



PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Deposisi dan Karakterisasi Film Tipis CdS/CdTe:Cu yang Ditumbuhkan dengan Metode *DC Magnetron Sputtering*

disusun oleh

nama : Syamsul Hadi

NIM : 4250408013

telah dipertahankan di hadapan Sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada tanggal 20 Pebruari 2013.

Panitia:

Ketua

Sekretaris

Prof. Dr. Wiyanto, M.Si.

NIP. 19631012 198803 1 001

Dr. Khumaedi, M.Si.

NIP. 19630610 198901 1 002

Ketua Penguji

Dr. Sugianto, M.Si.

NIP. 1961029 199303 1 001

Anggota Penguji /
Pembimbing Utama

Anggota Penguji /
Pembimbing Pendamping

Dr. Putut Marwoto, M.S.

NIP. 19630821 198803 1 004

Drs. Ngurah Made D.P., M.Si., Ph.D.

NIP.19670217 199203 1 002

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

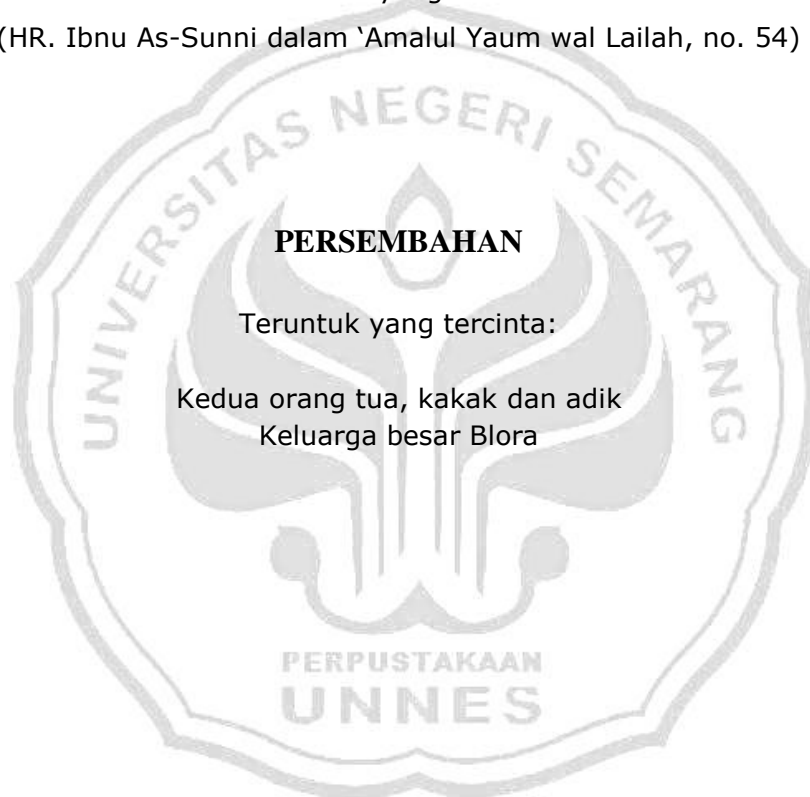
“Ya Allah, sungguh aku memohon kepada-Mu ilmu yang manfaat, rizki yang baik dan amalan yang diterima.”

(HR. Ibnu As-Sunni dalam ‘Amalul Yaum wal Lailah, no. 54)

PERSEMBAHAN

Teruntuk yang tercinta:

Kedua orang tua, kakak dan adik
Keluarga besar Blora



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT semata serta sholawat dan salam tercurah atas nabi-Nya yang mulia. Hanya dengan kemurahanNya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul "Deposisi dan karakterisasi Film Tipis CdS/CdTe:Cu yang Ditumbuhkan dengan Metode *DC Magnetron Sputtering*".

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang membantu dalam usaha menyelesaikan skripsi ini. Dengan penuh ketulusan hati penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Sudijono Sastroatmodjo, M.Si. Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Wiyanto, M.Si. Dekan FMIPA Universitas Negeri Semarang.
3. Dr. Khumaedi, M.Si. selaku ketua Jurusan Fisika.
4. Dr. Putut Marwoto, M.S. selaku pembimbing I yang telah membimbing serta meluangkan waktu memberikan masukan, saran dan motivasi selama penyusunan skripsi.
5. Drs. Ngurah Made D.P., M.Si., Ph.D. selaku pembimbing II yang telah bersedia memberikan koreksi kepada penulis.
6. Dr. Sugianto, M.Si. selaku penguji skripsi yang telah memberikan masukan dan bimbingan selama penelitian dan penyusunan skripsi.
7. Dr. Sulhadi, M.Si. selaku dosen wali yang dengan penuh kesabaran dan kebersahajaan telah memberikan motivasi dan bimbingan kepada penulis selama kaki berpijak di kampus konservasi.
8. Bapak, Ibu, kakak adikku, keluarga blora yang telah memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis serta memberikan kesempatan kepada penulis untuk menempuh jenjang perguruan tinggi.

9. Mas Edy wibowo, Mas Didik, Mas Agus, kakak angkatan 2007, adik angkatan 2009 dan laskar pelangi 2008 yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.
10. Segenap laboran laboratorium fisika, terima kasih atas segala bentuk bantuan yang diberikan.
11. Keluarga ulul albab yang ikhlas dalam pengabdian dan kesetiaannya dalam lingkaran masjid kampus tercinta dan memberikan testimoni bagi penulis.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih untuk selalu memberikan bantuan moral dan spiritual, semoga Allah SWT selalu mendatangkan kemudahan dan perjalanan yang tak terduga.

Tiada kesempurnaan bagi manusia sebagai makhluk yang lemah dan yang sangat membutuhkan banyak ilmu. Oleh karena itu, segala kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan.

Semoga laporan skripsi ini dapat menambah pengetahuan dan bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Semarang,

Penulis

ABSTRAK

Hadi, S. 2013. *Deposisi dan Karakterisasi Film Tipis CdS/CdTe:Cu yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Dr. Putut Marwoto, M.S. dan Pembimbing Pendamping Drs. Ngurah Made D.P., M.Si., Ph.D.

Kata kunci: film tipis CdS/CdTe:Cu, doping Cu, struktur morfologi, sifat optik, sifat listrik

Film tipis *double layer* CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu telah dideposisikan di atas substrat ITO dengan metode *dc magnetron sputtering*. Kedua film tipis tersebut dideposisikan dengan parameter yang optimal, pada temperatur substrat sebesar 330 °C, tekanan gas Ar 500 mTorr dengan daya plasma 50 watt. Karakteristik film tipis dilihat dari morfologi permukaan, sifat optik, dan sifat listrik. Analisis CCD Mikroskop menunjukkan bahwa film tipis CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu mempunyai bentuk morfologi yang homogen. Penambahan doping Cu menyebabkan morfologi film yang dihasilkan menjadi lebih homogen.

Hasil karakterisasi sifat optik dengan spektrometer Vis-Nir menunjukkan bahwa film tipis mempunyai besar energi gap yang tidak jauh beda dan koefisien absorpsi semakin meningkat dengan peningkatan jumlah konsentrasi doping Cu. Hasil karakteristik I-V menunjukkan bentuk kurva I-V yang eksponensial untuk semua film tipis yang menandakan film *double layer* tersebut membentuk sambungan p-n. Nilai resistivitas semakin menurun dan konduktivitas meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi doping Cu. Faktor idealitas dan arus muatan ruang masing-masing film mendekati nilai ideal untuk sambungan p-n film tipis CdS/CdTe.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN	ii
PENGESAHAN	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	iv
PRAKATA	v
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB	
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Permasalahan	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat penelitian	5
1.5 Sistematika Penulisan	6
II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Sel Surya	7
2.2 Material Cadmium Sulfida (CdS)	8
2.3 Material Cadmium Telluride (CdTe)	9
2.4 Material Tembaga (Cu)	10
2.5 Sifat Optik Material	11
2.6 Sifat Listrik Material	14
2.7 Sambungan p-n	16
2.8 <i>DC Magnetron Sputtering</i>	20

III METODE PENELITIAN	24
3.1 Pelaksanaan Penelitian	26
3.1.1 Pembuatan Target CdS.....	26
3.1.2 Pembuatan Target CdTe:Cu.....	26
3.1.3 Preparasi Substrat.....	26
3.1.4 Deposisi Film Tipis CdS	27
3.1.5 Deposisi Film Tipis CdTe:Cu	29
3.2 Karakterisasi Film Tipis CdS/CdTe:Cu	31
3.2.1. Karakterisasi CCD (<i>charge coupled device</i>) Mikroskop	31
3.2.2. Karakterisasi Spektrometer Vis-Nir.....	32
3.2.3. Karakterisasi I-V	32
I-V HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Hasil Karakterisasi dengan CCD Mikroskop	37
4.2 Hasil Karakterisasi dengan Spektrometer Vis-Nir.....	39
4.3 Hasil Karakterisasi dengan I-V Meter.....	42
4.4 Pembahasan.....	48
4.5 Hubungan struktur morfologi, sifat optik, dan sifat listrik.....	51
V PENUTUP	52
5.1 Simpulan	52
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Parameter penumbuhan film tipis CdS, CdS/CdTe, dan CdS/CdTe:Cu	31
4.1 Hasil karakterisasi sifat listrik film tipis CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu dengan metode <i>two-probe</i>	45
4.2 Faktor idealitas dan arus muatan ruang film tipis CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu	47



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Proses <i>sputtering</i> pada permukaan target secara fisis	22
2.2 Skema reaksi dalam chamber <i>dc magnetron sputtering</i>	23
3.1 Diagram alir penelitian penumbuhan film tipis CdS/CdTe:Cu	25
3.2 Skema pengukuran I-V pada film tipis CdS/CdTe:Cu.....	33
3.3 Pengukuran resistansi film tipis CdS/CdTe:Cu dengan metode <i>two-probe</i> ...	34
4.1 Skema konfigurasi film tipis CdS/CdTe:Cu	36
4.2 Citra permukaan film tipis dengan perbesaran 2400 kali.....	37
4.3 Spektrum Transmittansi film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%).....	40
4.4 Grafik kuadrat koefisien absorpsi film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%) dan CdS/CdTe:Cu(5%)	41
4.5 Grafik hasil pengukuran arus-tegangan film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%)	43
4.6 Grafik $\ln(I)$ -V panjar maju film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%).....	46

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1 Perhitungan konsentrasi doping Cu pada target CdTe:Cu(2%)	57
2 Perhitungan konsentrasi doping Cu pada target CdTe:Cu(5%)	58
3 Foto Alat Penelitian dan Karakterisasi.....	59



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi yang terus meningkat dan cadangan bahan bakar fosil yang semakin menipis memaksa manusia untuk mencari sumber-sumber energi alternatif. Sumber energi yang biasa dijadikan sebagai energi alternatif antara lain tenaga air, tenaga angin, geothermal, biomassa, dan sumber energi matahari. Sumber energi alternatif diharapkan segera diwujudkan dalam teknologi baru yang dapat mengatasi kebutuhan energi dunia yang semakin menipis, serta untuk melindungi bumi dari pemanasan global dan polusi lingkungan. Upaya pencarian sumber energi terbarukan sebaiknya memenuhi syarat yaitu menghasilkan jumlah energi yang cukup besar, efisiensi yang besar, biaya ekonomis dan tidak berdampak negatif terhadap lingkungan.

Generasi pemanfaatan energi matahari sangat diharapkan menjadi suatu teknologi yang sangat menjanjikan untuk pemenuhan energi dalam skala besar. Penggunaan energi matahari ini memperkenalkan tanpa adanya kontaminasi langsung dengan lingkungan sehingga merupakan konsekuensi terhadap perhatian masalah lingkungan global. Pemanfaatan energi matahari ini yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik dan kemudian dikenal dengan istilah sel surya.

Sel surya terdiri dari beberapa sel dan jenisnya beragam. Penggunaan sel surya telah banyak di gunakan di negara-negara berkembang dan negara maju dimana pemanfaatannya tidak hanya pada lingkup yang kecil tetapi sudah banyak digunakan untuk keperluan industri sehingga energi matahari dapat dijadikan sebagai sumber energi alternatif. Indonesia merupakan negara tropis yang dilalui oleh garis khatulistiwa sehingga memiliki potensi menerima panas matahari yang lebih banyak daripada sebagian negara lain.

Energi surya dalam dunia internasional lebih dikenal sebagai *solar cell* atau *photovoltaic cell*, merupakan sebuah divais semikonduktor yang memiliki permukaan yang luas dan terdiri dari rangkaian dioda tipe p-n, yang mampu mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Pengertian *photovoltaic* sendiri merupakan proses mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Kata *photovoltaic* berasal dari bahasa Yunani *photos* yang berarti cahaya dan *volta* yang merupakan nama ahli fisika dari Italia yang menemukan tegangan listrik.

Fotovoltaik merupakan teknologi yang membangkitkan daya listrik arus searah (*Direct Current*) yang diukur dalam watt (W) atau kilowatt (kW) dari material semikonduktor saat mereka teriluminasi oleh foton. Selama cahaya menyinari sel surya, maka daya listrik akan terbangkitkan darinya. Saat cahaya berhenti, gejala kelistrikan berhenti. Sel surya tidak membutuhkan *recharge* seperti baterai kering biasa.

Dalam akhir tengah abad ini, semikonduktor tipe paduan golongan II-VI banyak diminati oleh ahli teknologi dan bidang keilmuan karena celah pita (*band*

gap) energi yang dimiliki menunjukkan sifat-sifat fisik yang baik. *Direct band gap* dari material-material semikonduktor ini mencakupi semua area spektral dari panjang gelombang dekat infra merah sampai ultra ungu. Material-material yang termasuk *band gap* lebar mempunyai kandungan berupa campuran kalkogen Zn dan Cd seperti ZnTe, ZnS, dan CdTe. Material-material ini adalah bahan yang penting yang secara umum dipakai untuk aplikasi divais seperti sel surya, detektor infra merah, dioda elektroluminesen, laser, fosfor, saklar, dan detektor radiasi.

Sel surya CdTe merupakan salah satu teknologi fotovoltaik film tipis yang sangat menjanjikan. CdS dan CdTe adalah dua pasangan material yang ideal untuk aplikasi sel surya. CdS yang termasuk semikonduktor tipe-n dengan band gap 2,4 eV sesuai untuk material *window* karena mampu meneruskan sebagian besar spektrum cahaya agar sampai pada lapisan *absorber* dengan sempurna dan untuk menghindari banyaknya cahaya yang mengalami *scattering*.

Performansi sel surya CdTe didasarkan pada formasi *barrier back contact* yang rendah. Hal ini biasanya dengan cara menambahkan material tembaga (Cu) sebagai elemen yang penting selama proses kontak. Karakteristik *back contact* dan tegangan *open-circuit* dapat ditingkatkan dengan penambahan sejumlah Cu yang optimal selama proses (Demtsu *et al.*, 2007). Hal tersebut lazim dilakukan karena Cu yang secara cepat berdifusi dari *back contact* menuju sambungan utama dipercaya bisa meningkatkan kualitas sambungan dan mengurangi degradasi film. Alasan lain Cu digunakan sebagai doping pada film tipis CdTe adalah karena rendahnya level doping dan konsentrasi hole CdTe sehingga Cu meningkatkan jumlah konsentrasi hole

sehingga bisa digunakan sebagai doping untuk meningkatkan efisiensi konversi sel surya.

Sel surya *heterojunction* CdS/CdTe merupakan sebuah pilihan yang sangat tepat untuk generasi sel surya selanjutnya. Sifat optik dan listrik dari struktur *heterojunction* CdS/CdTe bergantung pada karakteristik *window layer*, material *absorber*, kualitas sambungan dan kondisi deposisi. Penelitian Wu *et al.* (2002) melaporkan bahwa Sel surya CdS/CdTe sudah mampu mencapai efisiensi konversi energi sampai 16,5%. Selanjutnya, film tipis CdTe dengan penambahan doping Cu yang digunakan untuk memperbaiki performansinya dan ditumbuhkan pada film tipis CdS akan membentuk suatu pasangan material yaitu CdS/CdTe:Cu yang ideal untuk aplikasi sel surya.

Banyak metode yang dapat digunakan untuk menumbuhkan film tipis *multilayer* diantaranya adalah *close-spaced sublimation* (CSS), *vapor-transport deposition* (VTD), *physical-vapor deposition*, *metal organic chemical vapor deposition* (MOCVD), *molecular beam epitaxy* (MBE), *pulsed laser deposition*, dan *electrodeposition* (McCandless and Sites, 2003). Metode yang digunakan untuk mendeposisi lapisan tipis CdS/CdTe:Cu dalam penelitian ini adalah metode *dc magnetron sputtering*.

Deposisi Film tipis CdS/CdTe:Cu dengan metode *dc magnetron sputtering* ini merupakan kelanjutan dari penelitian Marwoto *et al.* (2012) yang telah menumbuhkan film tipis CdTe:Cu beserta karakterisasinya. Dalam penelitian ini material CdTe:Cu dideposisikan pada film tipis CdS yang kemudian membentuk

konfigurasi film tipis *double layer* CdS/CdTe:Cu dengan penambahan Cu sebagai pendoping. Film tipis dengan doping Cu yang berhasil ditumbuhkan diharapkan mempunyai kelebihan daripada film tipis tak terdoping. Reaktor *dc magnetron sputtering* yang digunakan untuk mendeposisikan film tipis tersebut tersedia di laboratorium fisika material universitas negeri semarang dan sudah berhasil menumbuhkan berbagai film tipis dari material-material tertentu.

1.2 Perumusan Permasalahan

Permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh doping Cu pada sifat optik dan sifat listrik film tipis CdS/CdTe yang ditumbuhkan di atas substrat ITO menggunakan metode *DC Magnetron Sputtering*.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan menentukan sifat optik, sifat listrik, dan pengaruh konsentrasi doping Cu pada lapisan tipis CdS/CdTe:Cu yang ditumbuhkan dengan metode *DC Magnetron Sputtering*.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi film tipis CdS/CdTe:Cu yang ditumbuhkan pada substrat ITO dengan menggunakan metode *dc magnetron sputtering*. Penambahan doping Cu pada film tipis CdS/CdTe:Cu yang terbentuk diharapkan dapat diketahui kelebihan dan kekurangannya dibandingkan

dengan film tipis yang telah dibuat pada penelitian sebelumnya yang tanpa menggunakan doping Cu terutama pada sifat optik dan sifat listrik dalam aplikasi sebagai piranti sel surya maupun piranti optoelektronik lainnya.

1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini disusun dalam 5 Bab yang diawali dengan halaman judul, abstrak, halaman pengesahan, halaman motto, halaman persembahan, kata pengantar, daftar isi, daftar gambar dan daftar tabel. Bab 1 berisi latar belakang masalah, permasalahan, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan skripsi. Bab 2 menjelaskan kajian pustaka yang merupakan landasan teoritis dalam penelitian ini. Kajian pustaka berisi penjelasan mengenai sel surya, material CdS, material CdTe, material Cu, sifat optik material, sifat listrik material, sambungan p-n, dan *dc magnetron sputtering*. Metode penelitian dibahas dalam Bab 3 yaitu meliputi pembuatan target CdS, pembuatan target CdTe:Cu, preparasi substrat, langkah deposisi lapisan tipis CdS dan CdTe:Cu, karakterisasi film tipis CdS/CdTe:Cu dan metode analisis data. Bab 4 memaparkan hasil penelitian, analisis data dan pembahasan hasil penelitian. Analisis dan pembahasan hasil penelitian meliputi analisis dan pembahasan morfologi, sifat optik, dan sifat listrik film tipis CdS/CdTe:Cu. Simpulan hasil penelitian dan saran dipaparkan dalam Bab 5. Bagian akhir skripsi berisi daftar pustaka dan lampiran yang terkait dengan penelitian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya

Sel surya adalah elemen aktif yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Sel surya terbuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub positif dan negatif. Apabila cahaya jatuh pada permukaan sel surya maka akan timbul perbedaan tegangan. Penyinaran cahaya pada susunan sel surya 1 m^2 dapat menghasilkan daya listrik orde 100 watt (Sudjatmoko, 2003). Cara kerja sel surya adalah dengan memanfaatkan teori cahaya sebagai partikel. Sebagaimana diketahui bahwa cahaya baik yang tampak maupun yang tidak tampak mempunyai dua sifat yaitu bisa sebagai gelombang dan bisa sebagai partikel yang disebut dengan foton. Sel surya dirancang untuk menyerap semua cahaya tampak yang melewatinya.

Sel surya paling sederhana merupakan sambungan dua jenis semikonduktor yaitu tipe p dan tipe n. Sambungan p-n tersebut akan membentuk tiga daerah yaitu daerah tipe p, tipe n dan daerah deplesi. Ketika energi surya mengenai sel surya, kemudian akan dihasilkan arus difusi dan arus generasi sebagai arus foto. Serapan energi surya sangat dipengaruhi oleh energi gap material. Dengan demikian untuk meningkatkan efisiensi konversi sel surya dapat dilakukan dengan memilih material dengan energi gap yang tepat atau dengan sistem tandem sehingga mampu menyerap sebagian besar spektrum energi surya.

Sejarah perkembangan industri *photovoltaic (PV)* telah berjalan sekitar lima puluh tahun, dan telah banyak pula penelitian dilakukan dengan harapan suatu saat dapat menghasilkan sel surya yang murah dan layak bersaing dengan tenaga listrik buatan seperti hidro atau nuklir untuk memecahkan permasalahan akan kebutuhan tenaga listrik yang ramah terhadap lingkungan hidup di seluruh lapisan dunia. Pada akhir abad 19, aliran listrik sel surya ditemukan oleh ahli fisika Jerman bernama Alexandre Edmond Becquerel secara kebetulan dimana berkas sinar matahari jatuh pada larutan elektro kimia bahan penelitian yang mengakibatkan muatan elektron pada larutan meningkat dan pada saat itu juga belum ada penjelasan ilmiah mengenai peristiwa tersebut

2.2 Material Cadmium Sulfida (CdS)

Material yang digunakan sebagai bahan sel surya seperti CdTe dan CuInSe₂, umumnya menggunakan CdS sebagai material *window layer* untuk meneruskan cahaya yang diserap oleh CdTe dan CuInSe₂ serta sebagai material tipe n untuk *p-njunction* solar sel (Lee *et al.*, 1999:172). Urbańczyk (2005) menggunakan MOCVD pada waktu proses deposisi CdS.

Material CdS dengan struktur heksagonal mempunyai keunggulan untuk aplikasi sel surya sebagai *window layer* karena kestabilannya dan mempunyai *band gap* 2,4 eV pada suhu ruangan. Parameter-parameter optis semikonduktor CdS sangat penting untuk diketahui karena semikonduktor II-VI ini banyak diaplikasikan

pada piranti optoelektronik seperti fotodetektor dan sel surya, terutama parameter-parameter optis di bagian bawah dan dekat daerah absorpsi fundamental.

2.3 Material Cadmium Telluride (CdTe)

CdTe merupakan material yang mendekati ideal untuk fotovoltaik film tipis karena memiliki beberapa sifat-sifat yang menguntungkan. *Band gap* CdTe (1.42 eV) membuatnya menjadi material yang sangat cocok untuk konversi fotovoltaik. Bagaimanapun juga nilai mutlak dari energi band gap film sangat dipengaruhi oleh proses deposisi dan kondisi film itu sendiri. Struktur pita semikonduktor dapat diselidiki secara langsung dengan mengukur spektrum absorpsinya. Film CdTe menunjukkan absorpsi tinggi dalam rentang cahaya tampak dan dekat infra merah. CdTe telah dijadikan material yang sangat menjanjikan dalam aplikasi bidang fotovoltaik, detektor sinar X dan detektor sinar gamma (Burgelman *et al.*, 2005). CdTe merupakan material *direct band gap*. Nilai energi bandgap 1.5 eV yang secara sempurna tepat dengan spektrum surya. Koefisien absorpsi CdTe berada dalam rentang 10^5 per cm.

Dengan koefisien absorpsi yang tinggi, lapisan CdTe yang sangat tipis (hanya beberapa mikron) mampu menyerap sampai 90% energi foton surya yang datang. Deposisi CdTe memerlukan temperature yang tinggi. Pada kondisi temperatur tinggi, Cd yang menguap dan Cd yang mengalami kekosongan bergabung dalam kisi yang dihasilkan dalam konduktivitas tipe p.

Energi ikat CdTe yang besarnya 5.75 eV membuatnya stabil secara termal. Sel surya dengan absorber CdTe secara umum mudah dibuat dengan berbagai metode dan efisiensi sel mencapai lebih dari 10% sebagaimana telah dilakukan oleh para peneliti (Compaan *et al.*, 2004: 815-822).

2.4 Material Tembaga (Cu)

Tembaga (Cu) digunakan sebagai akseptor dopan untuk film tipis CdTe. Cu dapat memperbaiki struktur mikro sehingga meningkatkan kualitas kristal. Selain itu, Cu juga dapat menurunkan resistivitas sehingga meningkatkan konduktivitas film. Tembaga dapat dideposisi dari Cu murni atau paduan Cu, seperti Cu_xTe . Banyak parameter yang dilakukan untuk menginvestigasi pengaruh Cu seperti ketebalan Cu, deposisi Cu, dan temperatur *annealing*. Deposisi campuran Cu_xTe yang paling baik untuk aplikasinya sebagai divais sel surya adalah Cu_2Te (Wu *et al.*, 2007: 5798). Hasil penelitian Marwoto (2012) menunjukkan bahwa film CdTe:Cu mempunyai struktur morfologi yang lebih homogen dan nilai resistivitas yang menurun tajam dibandingkan dengan struktur morfologi film CdTe yang ditumbuhkan tanpa doping.

Kehadiran Cu dalam sebuah kristal tunggal CdTe berperan sebagai ion *interstitial* (Cu^+) yang akan menimbulkan *shallow state*. Selain itu kehadiran Cu juga dapat mengganti posisi atom Cd dan membentuk *deep acceptor state* (Cu_{cd}) serta dapat pula membentuk $(\text{Cu}_i^+ + \text{V}_{\text{cd}}^{-2})$ dan $(\text{Cu}^+ - \text{Cu}_{\text{cd}})$ kompleks. Kompleks tersebut meliputi Cu dan cadmium *vacancies* yang merupakan *shallow acceptor* (Dzhafarov *et*

al., 2005: 372). Cu merupakan pengotor dengan kemampuan berpindah tempat yang tinggi dalam film CdTe. Oleh karena itu Cu dapat berdifusi dari *back contact* ke *interface* selama fabrikasi dan selanjutnya dapat mengubah karakteristik fotovoltaiik menjadi lebih baik.

Peran Cu dalam film CdS/CdTe mempunyai dua fungsi yaitu Cu secara umum dapat diterima karena dapat membantu pembentukan sebuah kontak ohmik yang lebih baik dengan meningkatkan doping tipe-p (hole) dalam CdTe dan Cu juga dianggap komponen yang sangat penting karena kemampuannya yang bisa memperbaiki degradasi sel melalui polikristalin CdTe sampai sambungan sel. Difusi Cu dalam kristal tunggal CdTe dapat terjadi dalam dua kelompok, yaitu *fast diffusion* dimana difusi Cu yang komponennya adalah Cu_i^+ dan *slower diffusion* yaitu difusi Cu yang komponennya adalah Cu_{cd} dan kompleks. Hasil difusi Cu dalam sebuah redistribusi atom Cu disertai beberapa perubahan struktur lokal. Hal tersebut perlu diselidiki juga terkait difusi termal Cu pada sampel kristal CdTe. Selain itu juga pada difusi termal dan fotostimulasi Cu dalam film tipis CdTe dan degradasi sel CdS/CdTe masih dalam kajian literatur (Dzafarof *et al.*, 2004).

2.5 Sifat Optik Material

Sifat optik menentukan karakteristik film tipis yang ditentukan oleh interaksi film terhadap cahaya. Sifat optik dari CdS/CdTe:Cu dapat diketahui dari spektrum refleksi, transmisi dan absorpsinya. Spektrum transmisi menunjukkan fungsi transmisi terhadap panjang gelombang. Spektrum absorpsi menunjukkan fungsi

koefisien absorpsi terhadap energi foton cahaya. Nilai transmisi film tipis diperoleh dalam bentuk spektrum transmisi (dalam %) terhadap panjang gelombang cahaya (λ).

Dari fenomena optik juga dapat diketahui informasi mengenai besarnya *band gap* material (E_g). Terdapat beberapa proses yang dapat berkontribusi dalam absorpsi. Pada energi foton yang tinggi yaitu lebih dari energi *gap*, absorpsi terjadi oleh transisi elektron dari pita valensi yang penuh menuju pita konduksi yang kosong. Untuk energi di bawah energi *gap*, radiasi diserap karena formasi dari transisi eksiton dan elektron antara pita dan impuritas. Transisi dari pembawa muatan bebas dalam pita energi menghasilkan rangkaian absorpsi yang akan naik dengan menurunnya energi foton. Setiap material mampu mengabsorpsi cahaya karena adanya interaksi antara foton dengan elektron dan struktur ikatan dari atom, ion atau molekul yang menyusun material tersebut. Cahaya yang ditransmisikan oleh suatu material tergantung pada seberapa besar cahaya yang dipantulkan (*reflected*) dan yang diserap (*absorbed*) oleh material. Untuk foton dengan panjang gelombang (λ), jumlah dari besarnya nilai reflektansi, absorpsi dan transmiansi adalah satu (Sugianto, 2005: 97-98).

$$R+T+A = 1 \quad (2.1)$$

Bermula dari panjang gelombang tersebut dapat diketahui energi gelombang, energi cahaya dirumuskan dalam bentuk Persamaan (2.2).

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

dengan E energi gelombang cahaya (joule), h konstanta planck yang besarnya $6,63 \times 10^{-34}$ Js, c kecepatan cahaya dalam ruang hampa (3×10^8 m/s), dan λ adalah panjang gelombang cahaya (m).

Dengan menggunakan spektrometer Vis-Nir dapat diperoleh data transmitansi yang merupakan perbandingan antara intensitas cahaya setelah melewati material semikonduktor (dalam penelitian ini adalah film tipis CdS/CdTe:Cu) akan ditentukan besar transmitansinya dengan intensitas cahaya mula-mula yang mengenainya yang dinyatakan dengan Persamaan (2.3).

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.3)$$

T menyatakan besarnya transmitansi material semikonduktor (dalam %), I merupakan intensitas cahaya setelah melewati bahan dan I_0 adalah intensitas cahaya mula-mula. Dengan asumsi besarnya intensitas radiasi berkurang secara eksponensial terhadap ketebalan film, maka Persamaan (2.3) dapat dinyatakan dalam Persamaan (2.4) dan (2.5).

$$I = I_0 \exp(-\alpha b) \quad (2.4)$$

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha b) \quad (2.5)$$

dengan I_0 adalah intensitas cahaya mula-mula yang mengenai sampel, I adalah intensitas cahaya yang ditransmisikan setelah melewati bahan (sampel) dan b adalah ketebalan film (Lawrence *et al.*, 1997:60). Dari data transmitansi yang diperoleh dengan menggunakan spektrum Vis-Nir selanjutnya dihitung besarnya

koefisien absorpsi optik dengan mensubstitusikan Persamaan (2.3) dalam Persamaan (2.5) sehingga diperoleh Persamaan (2.8).

$$T = e^{-\alpha b} \quad (2.6)$$

$$-\alpha b = \ln T \quad (2.7)$$

$$\alpha = \frac{-\ln T}{b} \quad (2.8)$$

dengan α merupakan koefisien absorpsi optik. Dari data energi cahaya yang digunakan dalam pengukuran transmitansi dan besarnya koefisien absorpsi optik, sehingga dapat dibuat grafik hubungan antara energi foton terhadap kuadrat dari koefisien absorpsi (α^2), yang selanjutnya disebut sebagai grafik absorpsi, dari kurva pada grafik absorpsi ini dapat ditentukan lebar celah pita energi (E_g).

2.6 Sifat Listrik Material

Sifat listrik film tipis dapat diketahui dari resistivitas, konduktivitas, dan jenis pembawa muatannya. Konduktivitas merupakan kemampuan suatu material dalam mengalirkan panas atau listrik. Ketika medan listrik diberikan pada suatu material, elektron dalam material tersebut akan mengalir berlawanan dengan arah medan dan membawa arus listrik.

Resistivitas sebuah semikonduktor ρ ditentukan dengan Persamaan

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (2.9)$$

dengan n dan p adalah konsentrasi elektron bebas dan *hole*, dan μ_n dan μ_p adalah mobilitas elektron dan mobilitas *hole*. Resistivitas dapat dihitung dari pengukuran muatan pembawa (*carrier*) dan mobilitasnya. Dalam hal ini, resistivitas dapat diukur bila besar muatan pembawa (*carrier*) dan mobilitasnya diketahui. Secara umum muatan pembawa dan mobilitas tidak dapat diketahui secara langsung, sehingga memerlukan sebuah alternatif teknik pengukuran resistivitas yang lain (Schroder, 1990).

Teknik dengan metode probe empat titik dan probe dua titik merupakan salah satu metode yang sudah umum digunakan untuk pengukuran resistivitas walaupun metode probe dua titik memiliki kelemahan untuk diinterpretasikan. Susunan dalam metode probe dua titik berupa satu untuk probe arus dan probe yang lain untuk tegangan. Potensial V pada jarak r dari elektroda membawa arus I dalam sebuah material dengan resistivitas ρ dapat ditentukan dengan Persamaan (2.10) dan Persamaan (2.11).

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.10)$$

dan nilai ρ adalah

$$\rho = \frac{2\pi r V}{I} \quad (2.11)$$

Satuan resistivitas biasanya menggunakan satuan ohm-cm.

Konsentrasi pembawa muatan n dan p tidak sama jika sampel didoping. Kemungkinan salah satu pembawa lebih dominan bergantung pada semikonduktor

tipe n atau tipe p. Untuk semikonduktor intrinsik, konsentrasi n sama dengan konsentrasi p seperti terlihat dalam Persamaan

$$\sigma = ne(\mu_e + \mu_h) \quad (2.12)$$

dengan $n = n_i$ adalah konsentrasi intrinsik.

Resistivitas (ρ) merupakan sifat bahan yang tidak bergantung pada bentuknya dan harganya berbanding terbalik dengan konduktivitas. Material yang mempunyai nilai konduktivitas yang besar maka muatan *carrier* dapat dengan mudah mengalir dalam material. Hubungan antara resistivitas terhadap konduktivitas ditunjukkan pada Persamaan (2.13).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.13)$$

Persamaan ini mengandung makna bahwa semakin kecil resistivitas maka konduktivitasnya akan semakin tinggi sehingga mempunyai sifat listrik yang lebih baik. Material dengan konduktivitas yang tinggi mampu mengalirkan muatan pembawa dalam jumlah besar.

2.7 Sambungan p-n

Sambungan p-n adalah gabungan bahan semikonduktor tipe p dan semikonduktor tipe n. Sesaat setelah terjadi penyambungan, pada daerah sambungan semikonduktor terjadi perubahan. Salah satu contoh sambungan p-n adalah dioda. Dioda adalah semikonduktor yang mengubah tegangan AC ke DC dan hanya membolehkan arus yang mengalir hanya satu arah. Dioda dibentuk dari gabungan semikonduktor tipe p

dan semikonduktor tipe n yang membentuk sambungan p-n. Sambungan p-n bisa dianggap memiliki panjar maju ataupun panjar mundur. Sambungan p-n dianggap memiliki panjar maju ketika potensial positif dipasang pada bagian tipe p dan potensial negatif pada bagian tipe n. Panjar mundur terjadi ketika potensial positif dipasang pada bagian tipe n dan potensial negatif dipasang pada bagian tipe p.

Pada daerah tipe n memiliki sejumlah elektron yang akan dengan mudah terlepas dari atom induknya. Pada daerah tipe p, atom aseptor menarik elektron (atau menghasilkan lubang). Kedua pembawa muatan mayoritas tersebut memiliki cukup energi untuk mencapai material pada sisi lain sambungan. Pada hal ini terjadi difusi elektron dari tipe n ke tipe p dan difusi lubang dari tipe p ke tipe n. Proses difusi ini tidak berlangsung selamanya karena elektron yang sudah berada di tempatnya akan menolak elektron yang datang kemudian. Proses difusi berakhir saat tidak ada lagi elektron yang memiliki cukup energi untuk mengalir.

Daerah yang sangat tipis dekat sambungan disebut daerah deplesi (*depletion region*) atau daerah transisi. Daerah ini dapat membangkitkan pembawa muatan minoritas saat terdapat cukup energi termal untuk membangkitkan pasangan lubang-elektron. Salah satu dari pembawa muatan minoritas ini, misalnya elektron pada tipe p, akan mengalami pengaruh dari proses penolakan elektron difusi dari tipe n dan mengakibatkan elektron minoritas ini akan ikut tertarik ke semikonduktor tipe n. Gerakan pembawa muatan akibat pembangkitan termal ini lebih dikenal sebagai *drift*. Situasi akan stabil saat arus difusi sama dengan arus drift.

Pada daerah sambungan atau daerah deplesi yang sangat tipis terjadi pengosongan pembawa muatan mayoritas akibat terjadinya difusi ke sisi yang lain. Kosongnya pembawa muatan mayoritas di daerah deplesi akan meninggalkan lapisan muatan positif di daerah tipe n dan lapisan muatan negatif di daerah tipe p.

Besarnya konsentrasi pembawa muatan mayoritas yang melewati sambungan p-ntergantung pada tegangan dan temperatur. Arus kedua yang melewati sambungan adalah arus *drift* atau arus pergeseran. Arus *drift* terjadi karena adanya pergerakan pembawa muatan minoritas yang melewati sambungan p-n yang arahnya berlawanan dengan arah pergerakan pembawa muatan mayoritas. Tidak seperti pembawa muatan mayoritas, konsentrasi pembawa muatan minoritas tidak tergantung pada tegangan dan temperatur. Sehingga arus total yang melewati sambungan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I_{total} = I_{drift e} + I_{drift e} \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) + I_{drift h} + I_{drift h} \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.14)$$

Pada saat kondisi setimbang terjadi $I_{drift e} = -I_{drift e}$ dan $I_{drift h} = -I_{drift h}$

Persamaan (2.14) dapat ditulis :

$$I_{total} = I_{drift e} \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right\} + I_{drift h} \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right\} \quad (2.15)$$

Secara ringkas persamaan (2.15) dapat ditulis menjadi :

$$I_{total} = (I_{drift e} + I_{drift h}) \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right\} \quad (2.16)$$

Nilai $(I_{drift e} + I_{drift h})$ merupakan arus jenuh dari sistem dan diberi simbol I_s atau I_o , sehingga persamaan (2.16) dapat ditulis menjadi :

$$I_{total} = I_o \left\{ \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right\} \quad (2.17)$$

dimana e adalah muatan elektron (1.6×10^{-19} J), V adalah tegangan (volt), K_B adalah konstanta Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), T adalah temperatur (Kelvin), n adalah faktor ideal dari sambungan p-n. Untuk tegangan bias maju yang tinggi, nilai n bernilai sekitar 1 saat proses difusi dominan, sedangkan untuk tegangan bias maju yang rendah nilai n sekitar 2 saat proses rekombinasi dominan. Ada juga sebuah area transisi dimana $1 < n < 2$.

Dari persamaan (2.17) dapat dijelaskan bahwa suatu diode berprategangan maju (*forward biased*) apabila tegangan (V) positif, ini berarti menunjukkan nilai positif arus diode (I) mengalir dari sisi persambungan-p menuju sisi persambungan-n. Faktor ideal merupakan fenomena fisik seperti efek permukaan, rekombinasi dan tunneling. Untuk panjar maju dimana $> \frac{nkT}{q}$, maka Persamaan (2.17) dapat ditulis menjadi :

$$I_{total} \sim I_o \left\{ \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right\} \quad (2.18)$$

atau dapat juga ditulis

$$\ln I_{total} = \ln I_o \left\{ \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right\} \quad (2.19)$$

Untuk keperluan sel surya, semikonduktor tipe n berada pada lapisan atas semikonduktor tipe p yang menghadap kearah datangnya cahaya matahari, dan ketebalan lapisan semikonduktor tipe n dibuat jauh lebih tipis dari semikonduktor tipe p, sehingga cahaya matahari yang jatuh ke permukaan sel surya dapat terus terserap

dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor tipe p. Dalam penelitian ini, bertindak sebagai semikonduktor tipe n adalah material CdS dan material CdTe:Cu sebagai semikonduktor tipe p.

Ketika sambungan semikonduktor ini terkena cahaya matahari, maka elektron mendapat energi dari cahaya matahari untuk melepaskan dirinya dari semikonduktor tipe n, daerah deplesi maupun semikonduktor tipe p. Terlepasnya elektron ini meninggalkan hole pada daerah yang ditinggalkan oleh elektron yang disebut dengan fotogenerasi elektron-lubang (*elektron-hole photogeneration*), yakni terbentuknya pasangan elektron dan hole akibat cahaya matahari.

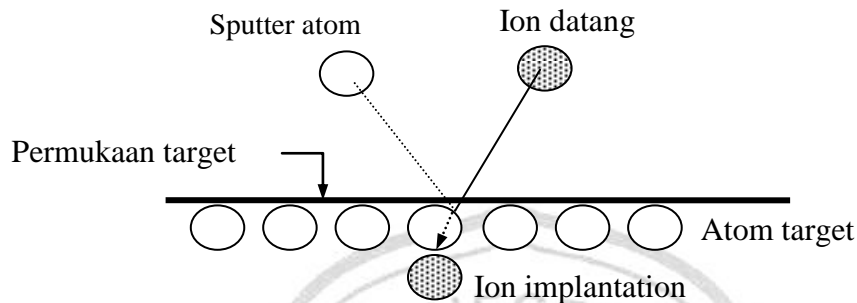
Cahaya matahari dengan panjang gelombang yang berbeda membuat fotogenerasi pada sambungan p-n berada pada bagian sambungan p-n yang berbeda pula. Spektrum merah dari cahaya matahari yang memiliki panjang gelombang lebih panjang mampu menembus daerah deplesi hingga terserap oleh semikonduktor tipe p yang akhirnya menghasilkan proses fotogenerasi. Spektrum biru dengan panjang gelombang yang jauh lebih pendek hanya terserap di daerah semikonduktor tipe n. Selanjutnya, dikarenakan pada sambungan p-n terdapat medan listrik, elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor tipe n, begitu pula dengan *hole* yang tertarik ke arah semikonduktor tipe p.

2.8 DC Magnetron Sputtering

Teknologi sputtering adalah suatu teknologi untuk membuat lapisan tipis dan modifikasi permukaan (*surface treatment*). Teknik ini merupakan pengembangan dari teknik *coating* yang sudah lazim digunakan. Keunggulan teknik *sputtering* ini dibanding dengan teknik *coating* adalah bahan yang akan dilapiskan tidak harus dipanaskan sampai meleleh, sehingga sangat menguntungkan untuk mendeposisikan bahan-bahan yang mempunyai titik leleh tinggi. Lapisan yang diperoleh mempunyai daya rekat yang baik karena atom-atomnya dapat masuk lebih dalam pada permukaan substrat, dengan demikian umur pakai lapisan yang terdeposit lebih lama.

Deposisi *sputtering* merupakan proses deposisi uap fisikal untuk menumbuhkan film tipis. *Sputtering* berarti menghamburkan material dari sebuah target dan menumbuhkannya pada sebuah substrat. Target adalah sumber materialnya. Substrat ditempatkan dalam chamber yang vakum dan dipompa untuk proses tekanan yang ditentukan. Proses *sputtering* dimulai saat muatan negatif diberikan kepada material target yang kemudian menghasilkan plasma atau pemancaran cahaya. Gas-gas ion yang bermuatan positif dibangkitkan dalam wilayah plasma yang ditarik kepada pelat target dengan bias negatif dengan kecepatan yang sangat tinggi. Tumbukan ini menciptakan sebuah transfer momentum dan melepaskan partikel berukuran atom dari target. Partikel-partikel ini yang ditumbuhkan sebagai sebuah film tipis pada permukaan substrat.

Proses *sputtering* pada permukaan target secara fisis dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1.

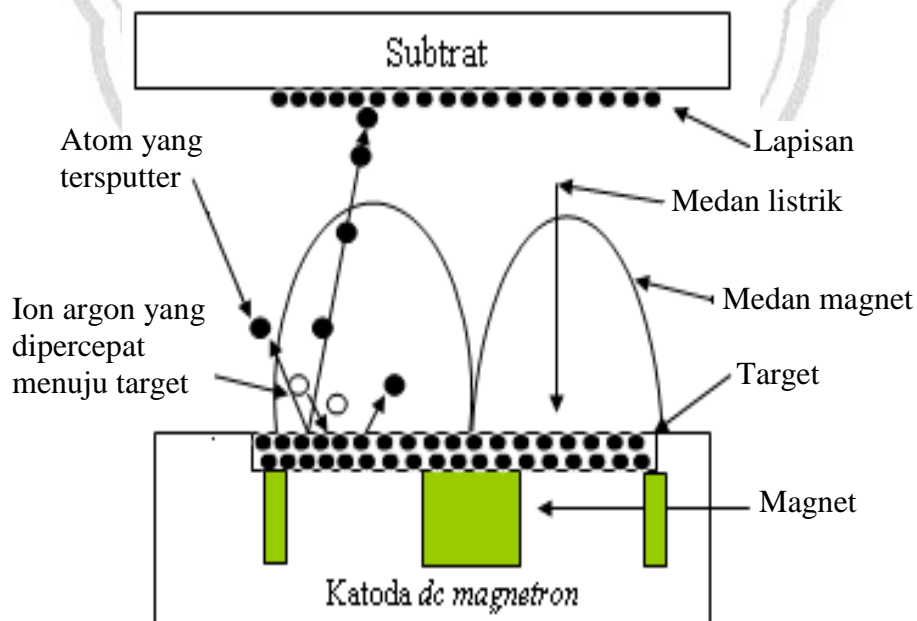


Gambar 2.1. Proses *sputtering* pada permukaan target secara fisis

Teknik *Sputtering* secara ekstensif digunakan dalam industri semikonduktor untuk menumbuhkan film tipis dari berbagai macam material dalam pemrosesan rangkaian terpadu (*integrated circuit*). Anti refleksi lapisan tipis *dicoating* pada kaca yang berguna untuk aplikasi bidang optik juga ditumbuhkan dengan *sputtering*. Karena rendahnya temperatur substrat yang digunakan, *sputtering* adalah sebuah metode yang ideal untuk deposisi logam kontak untuk transistor film tipis. Teknik *sputtering* ini juga digunakan untuk fabrikasi sensor film tipis, film tipis sel surya, sentilever logam serta *interconnect*, dan lain sebagainya.

Pada penelitian ini film tipis CdS/CdTe:Cu ditumbuhkan dengan *home made dc magnetron sputtering*. Metode ini mempunyai beberapa kelebihan, di antaranya adalah lapisan yang terbentuk mempunyai komposisi yang serupa dengan bahan target (Sudjatmoko, 2003), *low growth temperature*, dan kontrol saat pendopongan dapat dilakukan dengan baik (Compaan, 2004).

DC magnetron sputtering menggunakan sistem magnet yang diletakkan dibawah katoda. Magnet membentuk lingkupan medan magnet untuk membelokkan partikel bermuatan. Elektron-elektron dikurung dalam lingkupan medan magnet dekat target dan mengakibatkan ionisasi pada gas argon. Jumlah ion-ion yang ditarik ke permukaan target menjadi lebih banyak. Semakin banyak ion-ion yang menumbuk target, hasil *sputtering* semakin meningkat. Proses *sputtering* juga dapat menimbulkan pemanasan pada target akibat tembakan ion-ion berenergi, sehingga dapat menyebabkan atom-atom oksida yang lebih ringan menguap dan resistansinya berkurang serta untuk menjaga kekuatan magnet agar tidak hilang maka daerah target dialiri dengan air pendingin. Skema reaksi dalam chamber *dc magnetron sputtering* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



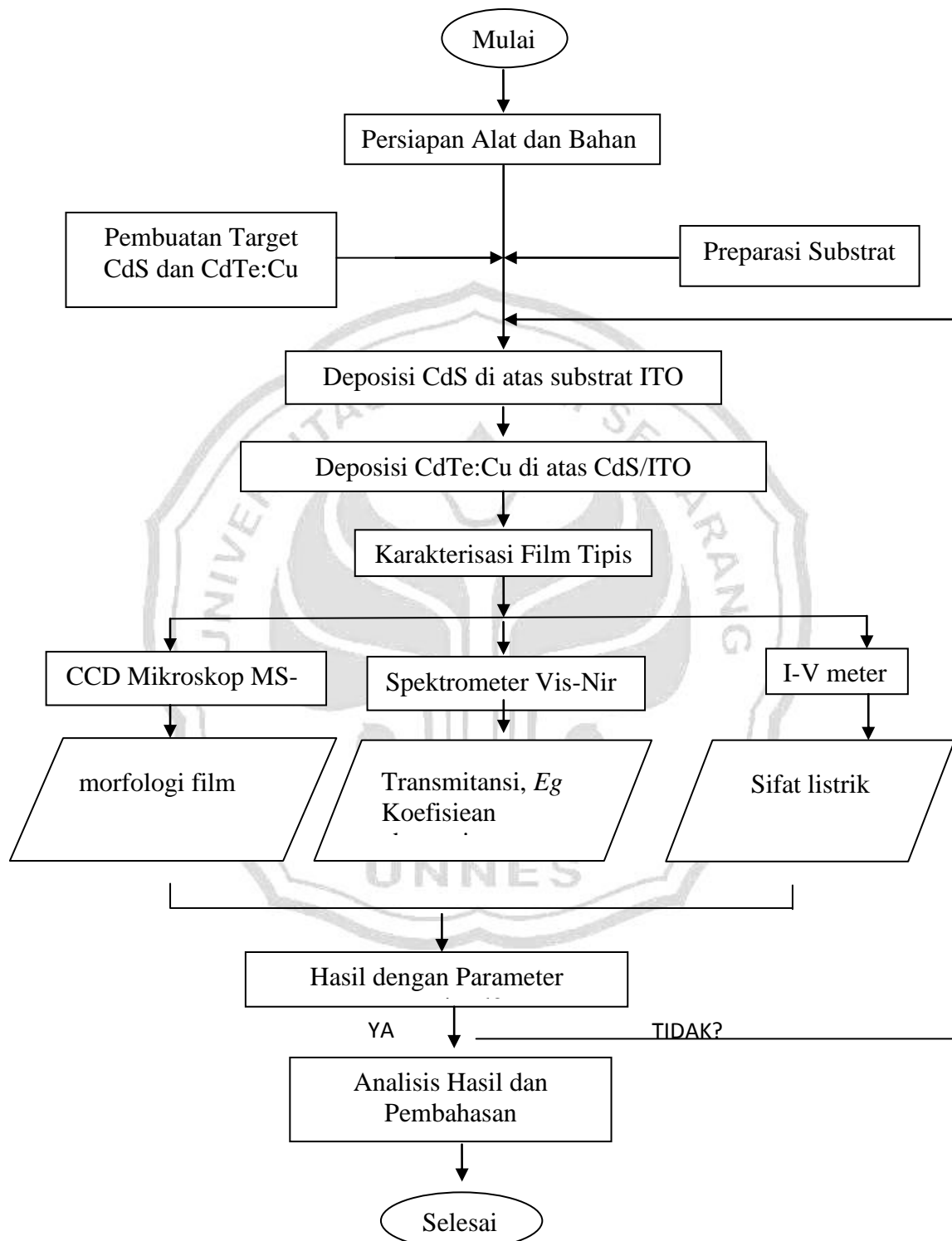
Gambar 2.2 Skema reaksi dalam chamber *dc magnetron sputtering* (Wibowo, 2008)

BAB 3

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen. Deposisi film tipis CdS/CdTe:Cu dilakukan di Laboratorium Fisika Material Jurusan Fisika UNNES menggunakan reaktor *dc magnetron sputtering*. Karakterisasi morfologi film CdS/CdTe:Cu menggunakan karakterisasi CCD (*charge coupled device*) mikroskop, sifat optik menggunakan spektrometer Vis-Nir, dan sifat listrik menggunakan I-V meter yang kesemuanya dilakukan di laboratorium Fisika FMIPA UnI-Versitas Negeri Semarang (UNNES).

Eksperimen ini dilakukan dengan membuat target berupa pelet CdS dan pelet CdTe:Cu. Deposisi film tipis CdS/CdTe:Cu diatas substrat ITO dengan parameter deposisi yang optimal. Deposisi film tipis *double layer* CdS/CdTe:Cu dilakukan dalam dua tahap, yaitu deposisi film CdS diatas substrat ITO dan deposisi film CdTe:Cu di atas CdS. Diagram alir penelitian deposisi film tipis CdS/CdTe:Cu ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian deposisi film tipis CdS/CdTe:Cu

3.1 Pelaksanaan Penelitian

3.1.1 Pembuatan target CdS

Target berupa pelet CdS yang dibuat dari serbuk CdS dengan kemurnian 99,99% dengan massa total CdS adalah 15 gram. Mekanisme pembuatannya meliputi penggerusan selama 2 jam, pemadatan atau pengepresan dengan sistem pompa hidrolik menjadi pelet dengan diameter 2 cm, pelet disintering pada suhu 700 °C selama 1 jam dan kemudian didinginkan. Pelet CdS dapat digunakan sebagai target dalam deposisi film tipis.

3.1.2 Pembuatan Target CdTe:Cu

Pembuatan target CdTe:Cu(2%) dan CdTe:Cu(5%) dibuat dari serbuk CdTe dan Cu₂Te dengan kemurnian CdTe 99,99% dan Cu₂Te 99,9%. Massa total campuran CdTe dan Cu₂Te adalah 15 gram untuk CdTe:Cu(2%) dan 10 gram untuk CdTe:Cu(5%). Mekanisme pembuatannya meliputi penggerusan selama 2 jam, pemadatan atau pengepresan dengan sistem pompa hidrolik menjadi pelet dengan diameter 2,5 cm, kemudian pelet disintering pada suhu 700 °C selama 2 jam dan kemudian didinginkan. Selanjutnya, pelet CdTe:Cu dapat digunakan sebagai target dalam deposisi film tipis.

3.1.3 Preparasi Substrat

Substrat yang digunakan dalam penelitian ini adalah ITO (*indium tin oxide*). Substrat dicuci dengan menggunakan alat *ultrasonic bath*. Pencucian pertama menggunakan larutan aseton selama 5 menit, kemudian dilanjutkan dengan larutan

methanol selama 5 menit juga. Setelah itu Substrat diambil dan dikeringkan dengan menyemprotkan gas oksigen dan selanjutnya substrat siap untuk digunakan.

3.1.4 Deposisi Film Tipis CdS

Deposisi film tipis CdS dilakukan dengan menggunakan metode *dc magnetron sputtering* di laboratorium fisika material FMIPA UNNES. Berikut langkah-langkah deposisi :

1. Sebelum memasang substrat ITO dan proses pemvakuman dimulai, chamber dikondisikan dalam keadaan bersih.
2. Membuka chamber, melepas karet di dalamnya dan membersihkan dengan *tissue*. Kemudian melapisi dengan *silicon grease* Secukupnya.
3. Membersihkan anoda dan katoda *chamber* dengan amplas kemudian membersihkan lagi dengan *tissue* yang sudah dibasahi menggunakan *methanol*.
4. Membersihkan tempat karet dengan *tissue* yang sudah dibasahi dengan *methanol*.
5. Menekan tombol *reset* pada alat kemudian set suhu pada 100°C untuk memasang substrat (melekatkan pasta perak).
6. Memasang substrat ITO pada anoda menggunakan pasta perak dan target CdS ataudiletakkan pada katoda.
7. Mengeringkan pasta perak dengan memanaskan anoda, dengan mengatur temperatur substrat dengan menekan tombol **sel>S0-1> set 100>enter>sv** kemudian menjalankan suhu dengan menekan **sel>prog>run>enter>sv**.

8. Menyalakan cattu daya *heater* hingga tegangan 15 volt, melekatkan substrat ITO saat temperatur 70°C, mematikan *heater* dan menutup chamber.
9. Menghidupkan pompa vakum, dengan prosedur sbb:
Setelah vakum chamber dipanaskan sesuai suhu yang diinginkan pada proses deposisi dengan langkah sebagai berikut: Mengatur suhu dengan cara **sel>s0-1>setting yang diinginkan>enter>sv** kemudian **sel>prog>run>enter>sv**, menghidupkan power supplay *heater* maksimal 20 Volt, bersamaan dengan itu menghidupkan pompa air sebagai pendingin magnet, menunggu sampai stabil.
10. Mengatur tekanan dengan mengalirkan gas argon pada tekanan yang diinginkan dengan melihat *te vaccum gauge*
11. Setelah suhu dan tekanan stabil, menghidupkan dan mengatur plasma sesuai dengan parameter yang akan digunakan. Besarnya daya plasma dapat dihitung menggunakan persamaan : $P(\text{watt}) = V_s I - I^2 R_s$
12. Membuka *shutter* dan menunggu waktu deposisi sesuai dengan parameter deposisi yang dikehendaki.
13. Menutup *shutter*.
14. Mematikan reaktor (*cooling down*) dengan menutup gas argon dan menyeting temperatur sehingga off dengan cara **sel>prog>off>enter>sv**, menunggu suhu turun sampai 200°C matikan pompa *vacuum*, suhu 100°C mematikan pompa air dan menunggu suhu turun sampai 60°C dan memutus arus listrik. Akhirnya

chamber dibuka dengan membuka tutup *vacuum* yang terletak di sebelah *chamber* terlebih dahulu.

15. Mengambil sampeldan membersihkan *chamber* seperti keadaan semula.

3.1.5 Deposisi Film Tipis CdTe:Cu

Deposisi film CdTe:Cu meliputi deposisi CdTe:Cu(2%) dan CdTe:Cu(5%) dengan metode *dcmagnetron sputtering* dilakukan di atas film tipis CdS/ITO. Berikut Langkah pendeposisian film tipis CdTe:Cu(2%) dan CdTe:Cu(5%) :

1. Sebelum pemasangan substrat dan proses pemvakuman dimulai, *chamber* dikondisikan dalam keadaan bersih.
2. Membuka *chamber*, melepas karet di dalamnya dan membersihkan dengan *tissue*. Kemudian melapisi dengan *silicon grease* secukupnya.
3. Membersihkan anoda dan katoda *chamber* dengan amplas kemudian membersihkan lagi dengan *tissue* yang sudah dibasahi menggunakan *methanol*.
4. Membersihkan tempat karet dengan *tissue* yang sudah dibasahi dengan *methanol*.
5. Menekan tombol *reset* pada alat kemudian menyeting suhu pada 100 °C untuk memasang substrat (melekatkan pasta perak).
6. Memasang substrat pada anoda menggunakan pasta perak dan target CdTe:Cu dipasang pada katoda.
7. Mengeringkan pasta perak dengan memanaskan anoda pada suhu 100 °C.

8. Menghidupkan pompa vakum.
9. Setelah vakum chamber dipanaskan sesuai suhu yang diinginkan.
10. Tekanan diatur dengan mengalirkan gas argon.
11. Setelah suhu dan tekanan stabil, menghidupkan dan mengatur plasma sesuai dengan parameter yang akan digunakan. Besarnya daya plasma dapat dihitung menggunakan persamaan: $P(\text{watt}) = V_s I - I^2 R_s$
12. Membuka *shutter* dan menunggu waktu deposisi sesuai dengan parameter deposisi yang dikehendaki.
13. Menutup *shutter*.
14. Mematikan reaktor (*cooling down*) dengan langkah sebagai berikut:
 - a) Memutar *close* knop gas pada *dc magnetron sputtering* dan knop gas argon.
 - b) Menyetting off suhu dengan carasel >prog>off>enter>sv.
 - c) Memutar knop caturdaya heater sampai angka 0 volt kemudian matikan.
 - d) Menunggu suhu turun sampai 200 °C matikan pompa *vacuum*.
 - e) Menunggu suhu turun sampai 100 °C matikan pompa air.
 - f) Menunggu suhu turun sampai 60 °C chamber dibuka dengan membuka tutup *vacuum* yang terletak di sebelah chamber terlebih dahulu.
15. Mengambil sampel dan membersihkan chamber seperti keadaan semula.

Dalam penelitian ini dilakukan juga deposisi film CdS/CdTe tanpa doping Cu dengan langkah dan parameter deposisi yang sama dengan deposisi film CdS/CdTe:Cu. Hasil deposisi film CdS/CdTe digunakan sebagai pembandingan hasil deposisi film CdS/CdTe:Cu yang memvariasi doping Cu sebanyak 2% dan 5%. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh doping Cu terhadap sifat optik dan sifat listrik film. Tabel 3.1 menunjukkan parameter deposisi film tipis CdS, CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%).

Tabel 3.1. Parameter deposisi film tipis CdS, CdS/CdTe, dan CdS/CdTe:Cu

Deskripsi Sampel	Parameter		
	Suhu (T)	Daya Plasma (P)	Waktu Deposisi
CdS	325 °C	43 watt	1 jam
CdS/CdTe	330 °C	50 watt	2,5 jam
CdS/CdTe:Cu(2%)	330 °C	50 watt	2,5 jam
CdS/CdTe:Cu(5%)	330 °C	50 watt	2,5 jam

3.2 Karakterisasi dan Analisis Data Film Tipis CdS/CdTe:Cu

3.2.1 Karakterisasi CCD (*charge coupled device*) Mikroskop

Struktur morfologi lapisan tipis dapat diketahui dengan menggunakan CCD Mikroskop MS-804 yang telah tersedia di laboratorium fisika unnes. Struktur morfologi lapisan tipis bergantung pada kinematika deposisi yang dipengaruhi oleh temperatur substrat, sifat kimia dan gas lingkungan. Hasil karakterisasi berupa citra penampang permukaan (*surface*). Dengan menganalisis penampang tersebut dapat

diketahui adanya rongga-rongga kosong yang mengindikasikan apakah film yang ditumbuhkan memiliki ukuran butir yang seragam dan homogen.

3.2.2 Spektrometer Vis-Nir

Karakterisasi sifat optik film tipis CdS/CdTe:Cu dilakukan dengan menggunakan Spektrometer CHEMUSB4-VIS-NIR. Spektrometer Vis-Nir ini mempunyai rentang panjang gelombang 400 nm sampai dengan 1000 nm. Spektrometer tersebut digunakan untuk mengetahui spektrum transmisi. Spektrum transmisi menunjukkan karakteristik film tipis terhadap panjang gelombang cahaya yang melewatinya, spektrum reflektansi menunjukkan gelombang cahaya yang dipantulkan oleh film tipis. Spektrum absorpsi menunjukkan fungsi koefisien absorpsi terhadap energi foton cahaya.

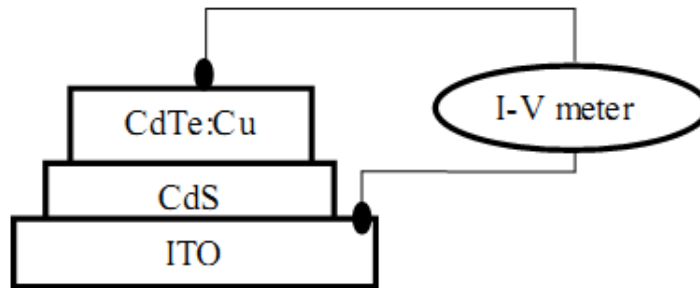
Spektrum transmisi menyatakan karakterisasi film tipis CdS/CdTe:Cu terhadap panjang gelombang cahaya yang melewatinya. Selain nilai transmittansi dan absorpsi, besarnya celah pita energi E_g dari film CdS/CdTe:Cu dapat diperoleh dengan ekstrapolasi linier terhadap sumbu energi foton dari grafik hubungan antara kuadrat koefisien absorpsi terhadap energi foton. Titik perpotongan tersebut menyatakan lebar celah pita energi dari film tipis CdS/CdTe:Cu. Data tersebut dibandingkan dengan data standar dari celah pita energi film tipis CdS/CdTe:Cu pada referensi atau dari data-data penelitian sebelumnya.

3.2.3 Karakterisasi I-V

Karakteristik I-V merupakan hubungan fisis antara arus dan tegangan. Pengukuran I-V ini dilakukan untuk mengetahui adanya sifat listrik material yang

terkandung di dalam film tipis CdS/CdTe:Cu yang ditumbuhkan dengan metode *dc magnetron sputtering*. Untuk memperoleh karakteristik I-V dilakukan pengukuran arus listrik (I) untuk tegangan panjar dc (V) yang dapat diubah-ubah. Sistem pengukuran I-V merupakan pengukuran berbasis komputer.

Karakterisasi sifat listrik film tipis CdS/CdTe:Cu dianalisis berdasarkan data dari hasil pengukuran dengan menggunakan I-V Meter. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan alat I-V Meter ELKAHFI 100. Alat tersebut merupakan alat yang dirancang untuk mengukur karakterisasi arus tegangan (I-V) yang terdiri dari sebuah sumber tegangan dan sebuah pikoamperemeter yang dapat mengukur arus mulai dari 100 pA sampai 3.5 mA. Data yang diperoleh dari pengukuran ini ialah besarnya arus setelah diberikan tegangan yang bervariasi. Data hasil pengukuran diolah dengan menggunakan software ELKAHFI-100 yang terkoneksi dengan PC (*Personal Computer*) pada saat pengukuran. Grafik ini juga memberikan informasi tentang hubungan antara arus sambungan p-n dan beda tegangan antara kedua ujung yang membentuk lengkungan, sehingga membentuk grafik eksponensial yang sesuai dengan prinsip dioda. Skema pengukuran arus-tegangan film CdS/CdTe:Cu dengan I-V meter seperti yang terlihat pada Gambar 3.2.

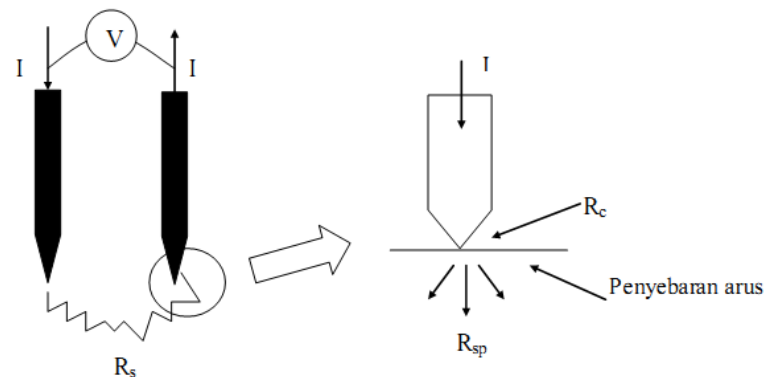


Gambar 3.2 Skema pengukuran I-V pada film tipis CdS/CdTe:Cu

Karakterisasi sifat listrik I-V meter ELKAHFI-100 menggunakan metode *two-probe* seperti diperlihatkan pada Gambar 3.3. Metode *two-probe* merupakan salah satu teknik pengukuran untuk mengetahui nilai resistivitas suatu bahan semikonduktor. Tampak pada Gambar 3.3, *probe* dialiri arus kemudian diukur tegangannya. Total resistansi diantara *two-probe* dapat dinyatakan sesuai Persamaan (3.1).

$$R_T = \frac{V}{I} = 2R_c + 2R_{sp} + R_s \quad (3.1)$$

Dengan R_c adalah resistansi kontak pada masing-masing kontak (*metalprobe*) semikonduktor, R_{sp} adalah resistansi penyebaran dari masing-masing *probe* dan R_s merupakan resistansi semikonduktor. Resistansi kontak muncul ketika *metal probe* berhubungan langsung dengan semikonduktor dan besarnya *spreading resistance* muncul ketika *probe* dialiri arus.



Gambar 3.3 Pengukuran resistansi film tipis CdS/CdTe:Cu dengan metode *two-probe* (Schroder,1990)

Pada pengukuran hambatan sampel, R_c dan R_{sp} diabaikan karena terlalu kecil.

Besarnya resistivitas film dihitung menggunakan Persamaan (3.2)

$$\rho = \frac{2\pi r V}{I} \quad (3.2)$$

dengan V adalah tegangan (volt), r adalah jarak antar *probe* (cm) dan I merupakan arus (ampere).

Faktor idealitas CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu dicari dengan memasukkan sampel ke dalam ruang dengan suhu tetap. Kemudian diamati hubungan arus dan tegangan menggunakan I-V meter. Selanjutnya, nilai tegangan dan arus yang didapatkan dibuat grafik linear dengan sumbu x adalah tegangan dan sumbu y adalah logaritma natural dari arus. Dari perpanjangan garis singgung pada plot $\ln(I)$ -V dapat diperoleh persamaan garis singgung yang merupakan linearisasi persamaan umum sambungan p-n:

Setelah diketahui nilai gradien dari grafik dan menganalogikan persamaan grafik $y = y_0 + mx$,

$$\ln I = \ln I_0 + \left(\frac{q}{nkT}\right)V \quad (3.3)$$

maka nilai faktor idealitas sampel dapat dicari menggunakan persamaan :

$$n = \frac{q}{kT} \frac{\Delta V}{\Delta \ln I} \quad (3.4)$$

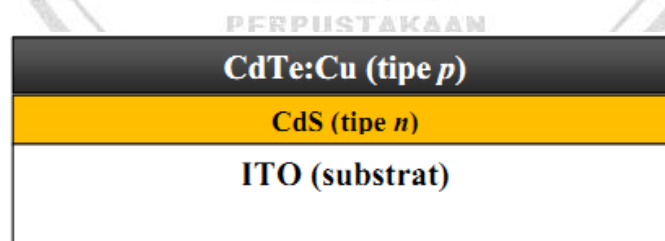
Nilai faktor idealitas n dapat juga didapatkan langsung dari perhitungan yang sesuai dengan persamaan (3.3) setelah memperoleh nilai I_0 , yaitu $y_0 = \ln I_0$, didapatkan $I_0 = \exp(y_0)$.



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konfigurasi film tipis *double layer* CdS/CdTe:Cu yang dideposisi dengan menggunakan metode *dc magnetron sputtering* secara skematis ditunjukkan pada Gambar 4.1. Deposisi dilakukan di atas substrat ITO dengan menggunakan target CdS dan CdTe:Cu. Target CdTe:Cu yang digunakan divariasikan dengan konsentrasi Cu 2% dan 5%. Penelitian diawali dengan menumbuhkan lapisan CdS pada temperatur substrat 325 °C, tekanan gas argon 500 mTorr, daya plasma 43 W dengan waktu deposisi 60 menit. Deposisi dilanjutkan dengan menumbuhkan film tipis CdTe:Cu(2%) dan CdTe:Cu(5%) di atas film CdS untuk menghasilkan film tipis CdS/CdTe:Cu(2%) dan CdS/CdTe:Cu(5%). Kedua film ini ditumbuhkan dengan parameter yang sama yaitu pada temperatur substrat 330°C, tekanan gas argon 500 mTorr, lama deposisi 150 menit dan daya plasma 50 W.

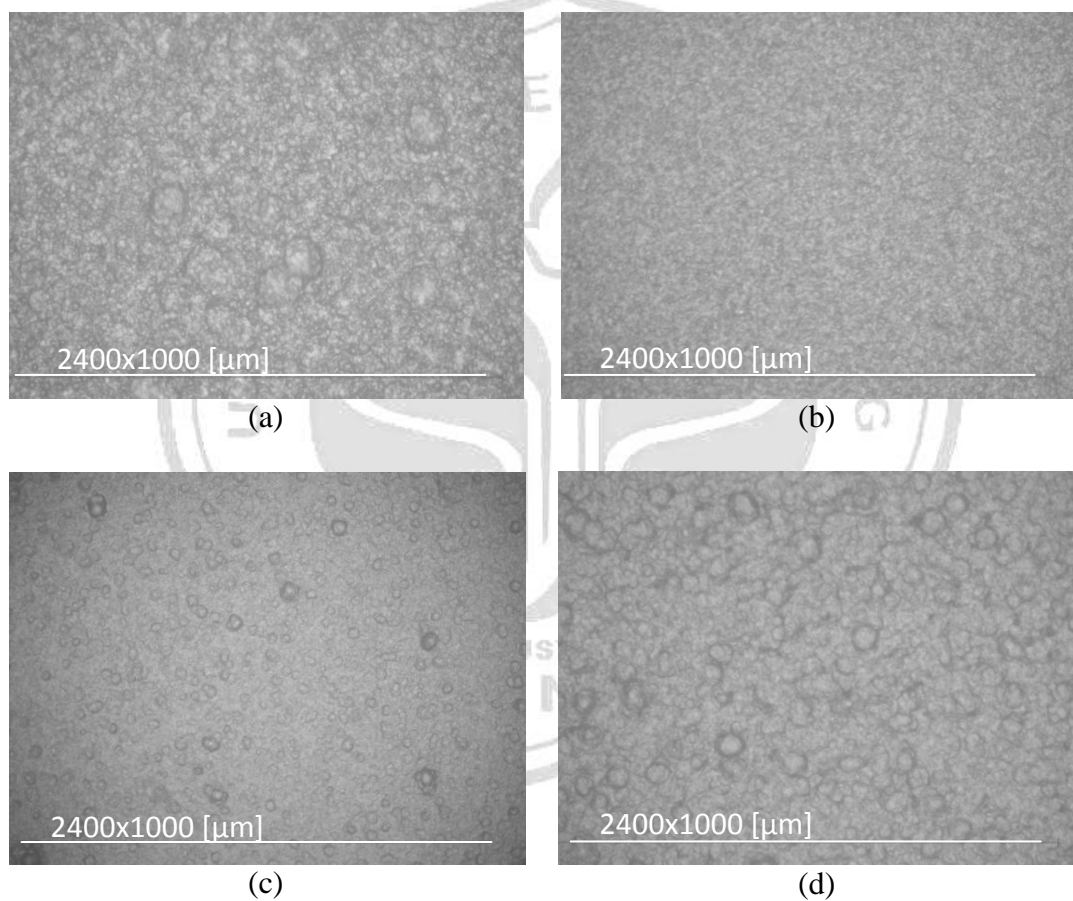


Gambar 4.1 Skema konfigurasi film tipis CdS/CdTe:Cu

Film tipis yang telah ditumbuhkan kemudian dikarakterisasi dan dianalisis. CCD (*charge coupled device*) Mikroskop MS-804 digunakan untuk mengkaji morfologi film tipis. Karakterisasi sifat optik dilakukan dengan menggunakan

spektrometer CHEMUSB4-VIS-NIR dan sifat listrik film dikarakterisasi dengan menggunakan I-V Meter ELKAHFI 100. Proses deposisi dan karakterisasi film dilakukan di laboratorium fisika material universitas negeri semarang.

4.1 Karakterisasi dengan CCD Mikroskop



Gambar 4.2 Citra permukaan film tipis dengan perbesaran 2400 kali.
(a) CdTe (b) CdS/CdTe (c) CdS/CdTe:Cu(2%) (d) CdS/CdTe:Cu(5%)

Citra permukaan lapisan tipis CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu yang ditumbuhkan pada suhu 330 °C dan daya plasma 50 watt dapat dilihat dengan

menggunakan CCD mikroskop MS-804 seperti yang terlihat pada Gambar 4.2. CCD mikroskop MS-804 merupakan salah satu alat yang digunakan untuk melihat benda-benda yang berukuran kecil hingga perbesaran 2400 kali ukuran semula.

Citra penampang permukaan yang terlihat pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa bulir yang terbentuk pada permukaan film tipis CdTe, CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%) tampak memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pemberian doping Cu pada konfigurasi film CdTe menyebabkan terjadinya evolusi morfologi film.

Morfologi permukaan film tipis CdTe pada Gambar 4.2(a) yang ditumbuhkan di atas substrat ITO terlihat kasar yang ditandai dengan adanya tumpukan-tumpukan *granular* (bulir) yang tidak homogen. Hal tersebut terjadi karena atom-atom target yang terlepas dari target bergerak secara acak sehingga atom-atom tidak tertata dengan baik pada permukaan substrat. Gambar 4.2(b) menunjukkan morfologi permukaan film tipis CdS/CdTe terlihat lebih halus dibandingkan film CdTe, perbedaan tersebut mengindikasikan film *double layer* CdS/CdTe mempunyai kualitas film yang lebih homogen dibandingkan film CdTe, walaupun pada beberapa area permukaan lain masih terdapat ruang-ruang kosong yang tidak tumbuh film.

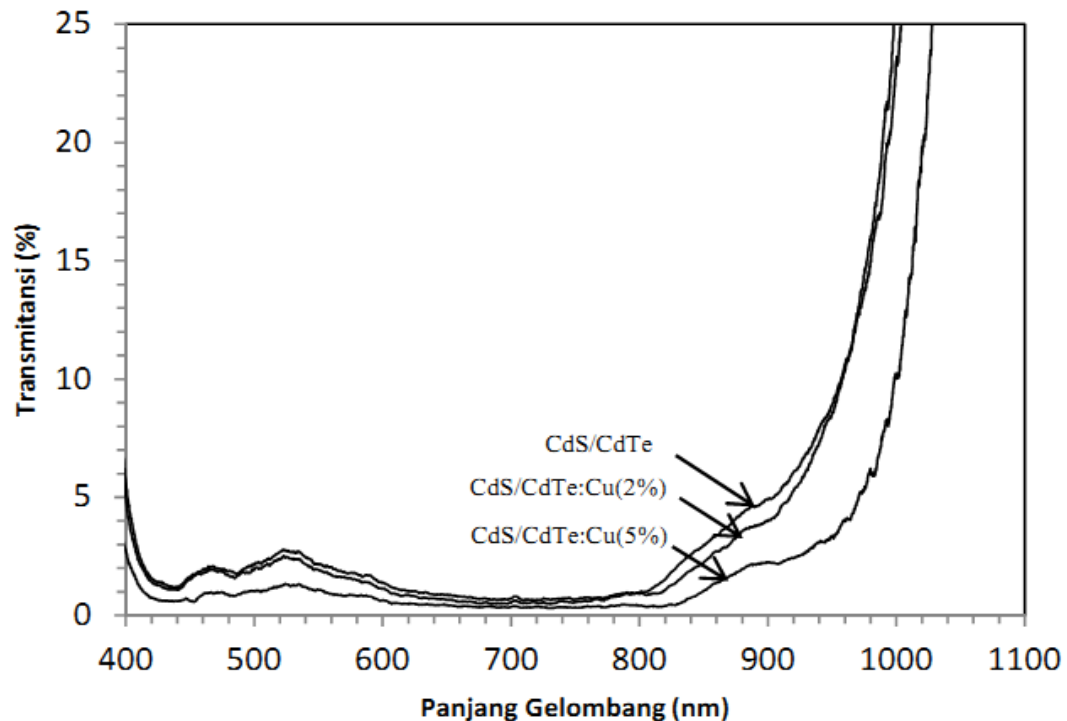
Pada film tipis CdS/CdTe:Cu, penambahan doping Cu(2%) dan Cu(5%) pada film tipis CdS/CdTe menyebabkan bulir yang dihasilkan menjadi lebih homogen seperti tampak pada Gambar 4.2.(c) dan 4.2(b). Dari citra CCD mikroskop tersebut tampak bahwa film CdS/CdTe:Cu(5%) memiliki morfologi dengan bulir yang lebih besar, homogen dan kompak dibandingkan dengan film CdS/CdTe:Cu(2%). Lany *et*

al (2001) menyatakan bahwa CdTe dalam kristal tunggal mempunyai cacat alami yang berupa cacat lokal Cd-*vacancy*, dan kehadiran Cu diduga dapat mengisi kekosongan tersebut sehingga film yang dihasilkan memiliki kerapatan yang lebih baik.

Hasil karakterisasi CCD mikroskop MS-804 dari keempat sampel tersebut memperlihatkan kualitas film yang baik. Hal ini dikarenakan parameter deposisi yang digunakan merupakan parameter yang sudah optimal dari penelitian sebelumnya terhadap material terkait. Selanjutnya, citra CCD mikroskop MS-804 dapat dijadikan petunjuk untuk mengetahui berhasil atau tidaknya film yang ditumbuhkan. Kurangnya informasi dari CCD mikroskop MS-804 mengenai ketebalan maupun komposisi kimia film selanjutnya bisa menggunakan karakterisasi SEM-EDX sehingga diperoleh informasi morfologi film yang lebih detail.

4.2 Karakterisasi dengan Spektrometer Vis-Nir

Karakterisasi sifat optik film tipis CdS/CdTe:Cu(2%) dan CdS/CdTe:Cu(5%) yang ditumbuhkan pada suhu 330 °C dan daya plasma 50 watt dilakukan dengan menggunakan Spektrometer Vis-Nir pada rentang cahaya tampak dan dekat infra merah (300-1000 nm). Kedua hasil karakterisasi sifat optik film tersebut disajikan dalam bentuk grafik transmitansi terhadap panjang gelombang serta grafik kuadrat koefisien absorpsi terhadap energi. Grafik transmitansi terhadap panjang gelombang ditunjukkan pada Gambar 4.3.

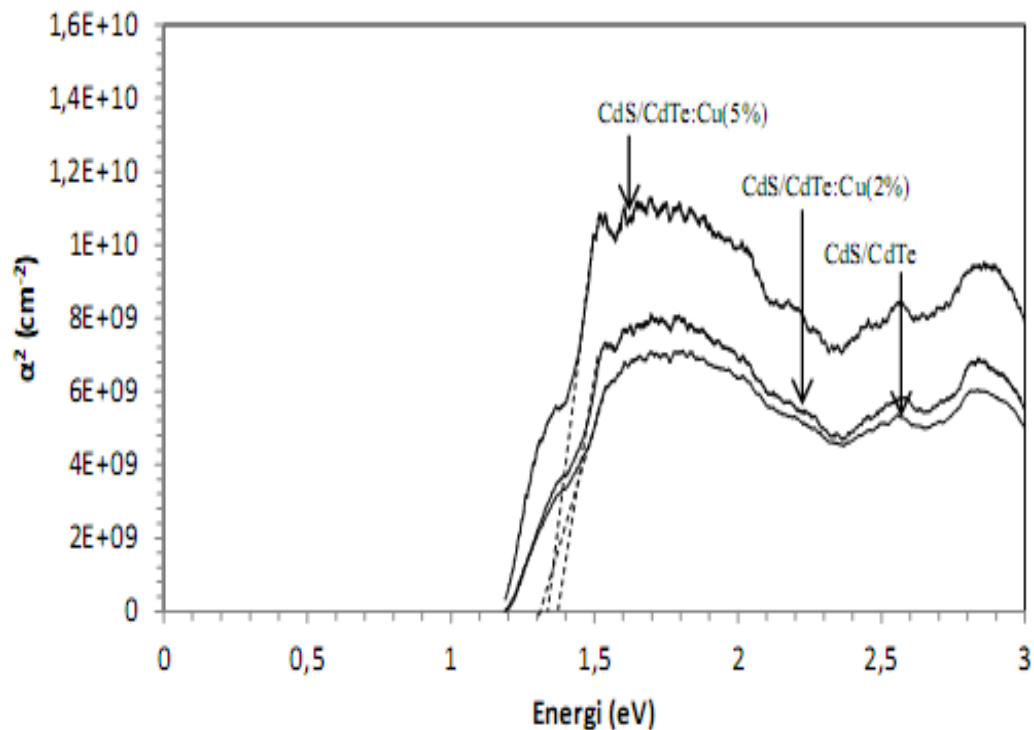


Gambar 4.3 Spektrum Transmittansi film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%)

Gambar 4.3 menunjukkan spektrum transmittansi yang terdiri dari tiga sampel film tipis yaitu CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%) dan CdS/CdTe:Cu(5%). Film tipis yang telah berhasil ditumbuhkan mempunyai koefisien absorpsi yang tinggi pada rentang panjang gelombang dibawah 800 nm (cahaya tampak). Hal ini menunjukkan bahwa pada daerah panjang gelombang 800 nm ke bawah, cahaya yang datang langsung dari matahari dapat diserap dengan baik oleh film sehingga sesuai untuk aplikasi sel surya.

Spektrum absorpsi menunjukkan besarnya koefisien absorpsi optik film tipis CdS/CdTe:Cu terhadap energi foton gelombang yang melewatinya. Dari grafik

tampak film tipis CdS/CdTe:Cu(5%) memiliki nilai transmitansi lebih rendah dari film tipis CdS/CdTe:Cu(2%) sehingga mempunyai nilai koefisien absorpsi yang lebih tinggi. Plot kuadrat koefisien absorpsi (α^2) terhadap energi foton pada film tipis CdS/CdTe:Cu ditunjukkan pada Gambar 4.4.



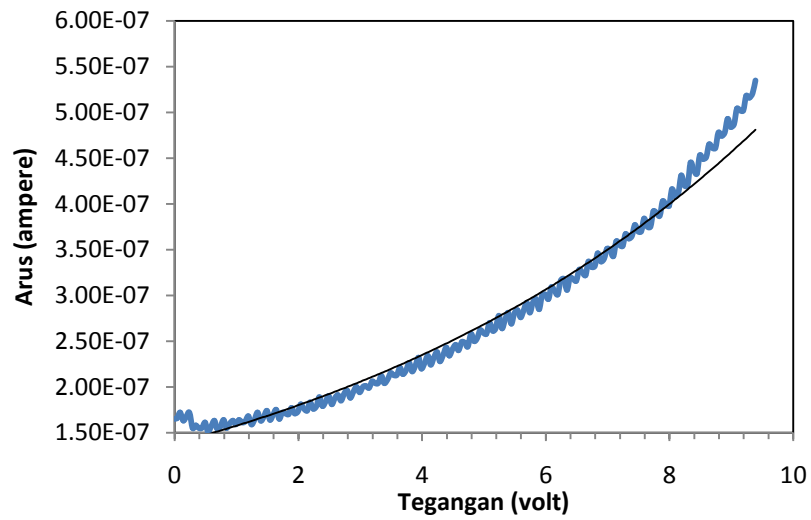
Gambar 4.4 Grafik kuadrat koefisien absorpsi film tipis CdS/CdTe , CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%)

Dari Gambar 4.4 dapat digunakan untuk menentukan besarnya celah pita energi (*bandgap*). Band gap pada film tipis dapat ditentukan dengan mengekstrapolasi linear grafik spektrum absorpsi. Gambar 4.4 menunjukkan besarnya band gap film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%) dan CdS/CdTe:Cu(5%) yang ditumbuhkan di atas substrat ITO masing-masing sebesar 1,30 eV, 1,38 eV, dan 1,35 eV. Selain

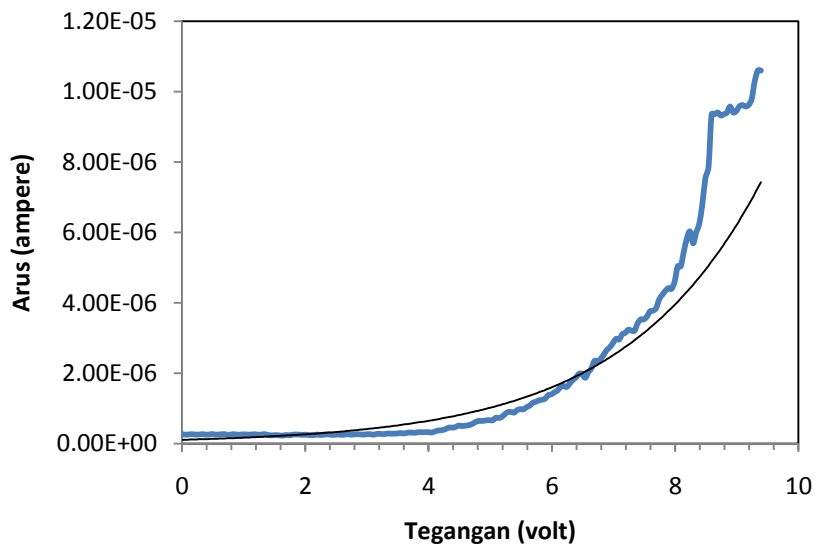
besarnya energi gap (E_g), dari grafik tersebut juga dapat ditentukan besarnya koefisien absorpsi film yaitu $1,03 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ untuk film CdS/CdTe:Cu(5%), $8,94 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ untuk film CdS/CdTe:Cu(2%) dan $8,49 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ untuk film CdS/CdTe.

4.3 Karakterisasi dengan I-V Meter

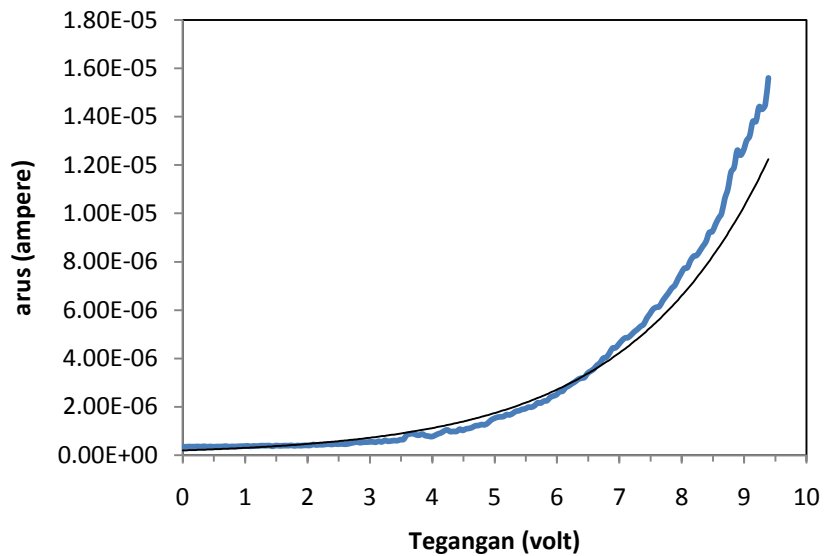
Karakterisasi sifat listrik film tipis CdS/CdTe:Cu menggunakan metode *two probe* menggunakan perangkat I-V Meter ELKAHFI 100 yang terhubung dengan komputer PC. Pengukuran I-V dilakukan dengan memvariasikan tegangan *dc* panjar maju sehingga diperoleh data arus (I) yang bersesuaian dengan setiap perubahan tegangan (V). Selanjutnya data pengukuran diplot ke dalam grafik karakteristik I-V. Berdasarkan data I-V yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai resistivitas dan konduktivitas film tipis CdS/CdTe:Cu, identifikasi film apakah menunjukkan persambungan *p-n*, menentukan arus pada daerah muatan ruang (I_0), dan faktor idealitas (n).



Gambar 4.5 (a) Grafik hasil pengukuran arus-tegangan film tipis CdS/CdTe



Gambar 4.5 (b) Grafik hasil pengukuran arus-tegangan film tipis CdS/CdTe:Cu(2%)



Gambar 4.5 (c) Grafik hasil pengukuran arus-tegangan film tipis CdS/CdTe:Cu(5%)

Gambar 4.5 (a), 4.5 (b), dan 4.5 (c) menunjukkan grafik arus-tegangan untuk film CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%) yang tampak memiliki perbedaan. Grafik arus-tegangan tersebut menunjukkan pola tidak linier yang mengindikasikan bahwa sifat listrik film tipis bersifat *schottky*. Film CdS/CdTe disini digunakan sebagai perbandingan hasil terhadap film CdS/CdTe:Cu.

Grafik arus-tegangan film tipis CdS/CdTe:Cu yang ditumbuhkan pada temperatur 330 °C dan daya plasma 50 watt semua berbentuk *schottky* disebabkan oleh terjadinya difusi doping Cu ke dalam lapisan tipis CdTe juga dikarenakan tinggi potensial penghambat (*barrier*) dapat tereduksi akibat elektron mendapat energi termal (Demtsu *et al.*, 2004). Nilai resistivitas diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan persamaan (3.2). Tabel 4.1 menunjukkan hasil perhitungan nilai

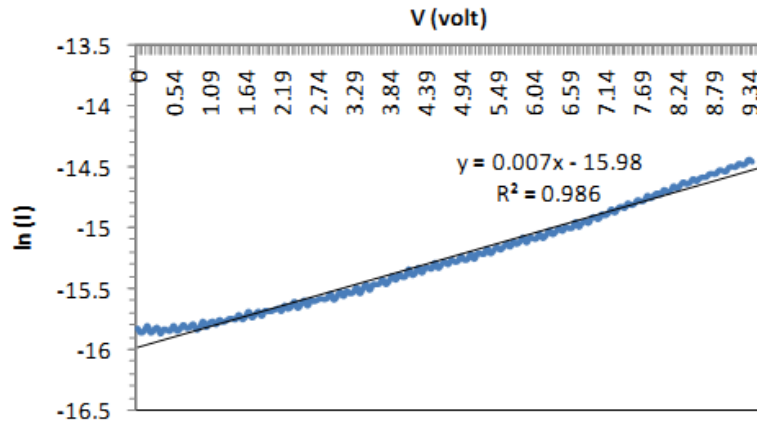
resistivitas dan konduktivitas film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%).

Tabel 4.1 Hasil karakterisasi sifat listrik film tipis CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu dengan metode *two-probe*

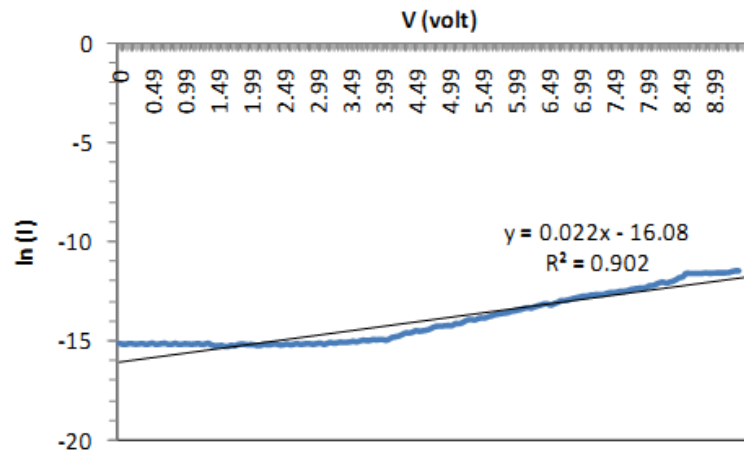
Sampel	Resistivitas Film (Ωcm)	Konduktivitas(Ωcm) ⁻¹
CdS/CdTe	$0,73 \times 10^8$	$1,37 \times 10^{-8}$
CdS/CdTe:Cu(2%)	$2,74 \times 10^7$	$0,36 \times 10^{-7}$
CdS/CdTe:Cu(5%)	$8,20 \times 10^6$	$0,12 \times 10^{-6}$

Hasil analisis pengukuran sifat listrik film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%) dan CdS/CdTe:Cu(5%) dengan menggunakan metode *two-probe* menunjukkan nilai resistivitas listrik yang berbeda. Film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%) berturut-turut mempunyai resistivitas $0,73 \times 10^8 \Omega\text{cm}$, $2,74 \times 10^7 \Omega\text{cm}$, dan $8,20 \times 10^6 \Omega\text{cm}$. Secara sederhana, nilai konduktivitas film dapat ditentukan dari kebalikan nilai resistivitasnya. Nilai konduktivitas film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%), dan CdS/CdTe:Cu(5%) berturut-turut adalah $1,37 \times 10^{-8} (\Omega\text{cm})^{-1}$, $0,36 \times 10^{-7} (\Omega\text{cm})^{-1}$ dan $0,12 \times 10^{-6} (\Omega\text{cm})^{-1}$. Film tipis CdS/CdTe:Cu yang ditumbuhkan diatas lapisan ITO menunjukkan film tersebut mempunyai sifat listrik yang baik. Substrat ITO merupakan substrat yang memiliki sifat listrik yang baik karena memiliki nilai resistivitas rendah, sehingga memiliki nilai konduktivitas yang tinggi (Compaan *et al.*, 2004).

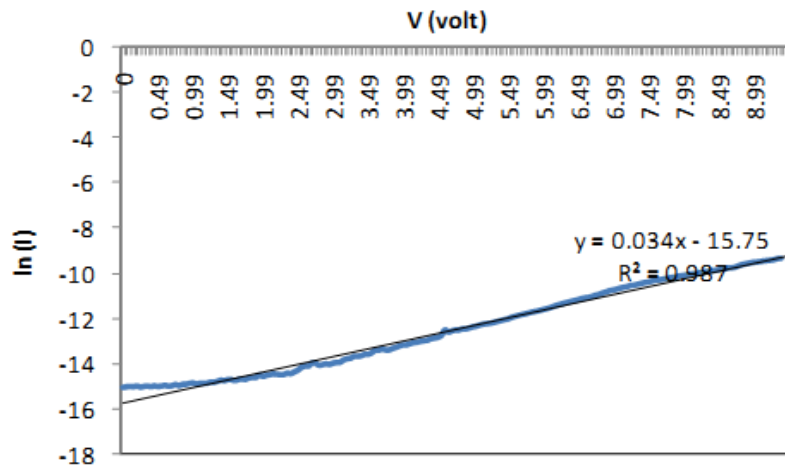
Selanjutnya untuk menentukan nilai arus pada daerah muatan ruang (I_0) dan faktor idealitas (n) dibuat grafik $\ln(I)$ terhadap V dengan cara mengekstrapolasi garis singgung hingga memotong sumbu $\ln(I)$ (atau $V=0$).



Gambar 4.6(a) Grafik $\ln(I)$ - V panjar maju film tipis CdS/CdTe



Gambar 4.6(b) Grafik $\ln(I)$ - V panjar maju film tipis CdS/CdTe:Cu(2%)



Gambar 4.6(c) Grafik $\ln(I)$ -V panjar maju film tipis CdS/CdTe:Cu(5%)

Gambar 4.6 menunjukkan gradien yang memotong sumbu $\ln(I)$. Sehingga arus pada daerah muatan ruang I_0 didapatkan nilai sebesar $1,15 \times 10^{-7} \text{ A}$, $1,06 \times 10^{-7} \text{ A}$ dan $1,49 \times 10^{-7} \text{ A}$. Faktor idealitas n dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.4). Berdasarkan hasil perhitungan, besarnya faktor idealitas (n) dan arus muatan ruang (I_0) ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Faktor idealitas dan arus muatan ruang film tipis CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu

Nama Sampel	Faktor Idealitas (n)	I_0 (ampere)
CdS/CdTe	1,05	$1,15 \times 10^{-7}$
CdS/CdTe:Cu(2%)	1,24	$1,06 \times 10^{-7}$
CdS/CdTe:Cu(5%)	1,86	$1,49 \times 10^{-7}$

Tabel 4.2 menunjukkan faktor idealitas dan arus muatan ruang dari film tipis CdS/CdTe:Cu. Nilai tersebut memiliki faktor idealitas diantara nilai satu dan dua

yang menunjukkan bahwa film mempunyai sifat listrik yang baik dan sesuai dengan teori dioda ideal sambungan p-n.

4.4 Pembahasan

Penambahan konsentrasi doping Cu pada konfigurasi CdS/CdTe:Cu menyebabkan perubahan morfologi film. Terlihat bahwa semakin banyak konsentrasi Cu, morfologi film semakin kompak dengan bulir yang semakin besar dan homogen. Hal tersebut diduga dikarenakan atom-atom Cu berdifusi ke semua sel dan mengisi kekosongan pada konfigurasi CdTe. Difusi ini terjadi sebagai akibat proses deposisi film dilakukan pada daya plasma dan suhu deposisi yang relatif tinggi. Penggunaan daya plasma yang relatif tinggi menyebabkan bertambahnya energi kinetik dan momentum atom-atom target yang menuju substrat. Bertambahnya energi kinetik dan momentum atom-atom target yang menuju substrat meningkatkan mobilitas atom-atom target menuju permukaan substrat (Sudjatmoko, 2003). Semakin tinggi suhu substrat, atom-atom yang berada pada permukaan substrat akan mudah menata diri sehingga morfologi permukaan akan lebih homogen. Bulir-bulir yang lebih homogen serta penampang film yang relatif tebal juga dapat meningkatkan sifat optik. Masing-masing atom yang tersusun dan tumbuh sebagai penyusun film mempunyai kemampuan untuk menyerap foton. Jika atom penyusunnya lebih banyak dan terdistribusi mehomogen maka film yang dihasilkan akan lebih tebal sehingga semakin besar kemampuan film tersebut untuk menyerap foton yang datang.

Bentuk morfologi dan struktur kristal sangat berpengaruh terhadap sifat optik film tipis CdS/CdTe:Cu. Semakin baik bentuk morfologi dan struktur suatu film tipis akan menghasilkan sifat optik yang baik dengan intensitas absorpsi yang tinggi. Bentuk morfologi film tipis dianggap baik jika mempunyai struktur film yang homogen, dengan kata lain terdapat banyak atom pada permukaan substrat sehingga film tipis tersebut mempunyai intensitas yang tinggi dan mempunyai daya serap sinar yang tinggi sehingga kualitas sifat optik dari film tipis akan menjadi semakin baik (Fitria, 2011). Film yang diindikasikan tumbuh dengan morfologi permukaan yang homogen dengan kristalinitas yang baik akan memiliki transfer elektron dan mobilitas pembawa muatan yang tinggi.

Penambahan Cu pada film CdS/CdTe dapat meningkatkan koefisien absorpsi film tanpa mengubah energi gap film secara signifikan. Ketiga film CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%) dan CdS/CdTe:Cu(5%) memiliki energi gap yang relatif sama tetapi memiliki kemampuan absorpsi yang berbeda. Film dengan doping Cu 5% memiliki koefisien absorpsi yang paling tinggi diikuti film dengan doping 2% dan film tanpa doping memiliki koefisien absorpsi paling rendah.

Kemampuan film tipis yang telah ditumbuhkan dalam mengabsorpsi cahaya sudah sangat baik. Hal ini diketahui dari karakterisasi morfologi permukaan yang menunjukkan bahwa film tipis yang tumbuh ditumbuhi atom-atom target yang cukup mehomogen. Semakin tebal suatu bahan maka cahaya yang terabsorpsi semakin besar. Apabila film yang dihasilkan masih terlalu tipis maka cahaya yang ditransmisikan akan semakin besar dan akan menyebabkan nilai E_g semakin

tinggi. Semakin tebal suatu bahan maka cahaya yang terabsorpsi semakin besar. Wu (2004) mengemukakan bahwa CdS/CdTe mampu mengabsorpsi ~99% spektrum cahaya yang datang menggunakan ketebalan CdTe mencapai ~2 μm . Oleh karena itu dibutuhkan CdS/CdTe:Cu yang lebih tebal untuk mendapatkan hasil yang maksimum.

Pada umumnya film tipis CdTe mempunyai resistivitas listriknya yang tinggi, dalam rentang mega ohms (Rehana, 2007). Nilai yang besar ini kurang menguntungkan dalam pemanfaatan untuk aplikasi sel surya. Untuk aplikasi sel surya berbasis film tipis, resistivitas film perlu diturunkan. Resistivitas listrik film tipis salah satunya dapat diturunkan dengan penggunaan doping. Pada penelitian ini digunakan tembaga (Cu) sebagai doping untuk menurunkan nilai resistivitas film tipis CdTe.

Pemberian doping Cu pada konfigurasi CdS/CdTe yang ditumbuhkan telah berhasil menurunkan resistivitas film. Film CdS/CdTe tanpa doping memiliki resistivitas paling tinggi, diikuti film dg doping Cu 2% dan film dengan doping Cu 5% memiliki resistivitas paling kecil.

Nilai resistivitas listrik film menurun dengan bertambahnya konsentration doping Cu dan film akan menjadi jenuh ketika penambahan doping mencapai nilai maksimal. Densitas muatan pembawa juga meningkat seiring meningkatnya persentase Cu dalam film CdS/CdTe. Penurunan resistivitas film secara jelas menunjukkan bahwa terjadi peningkatan konsentrasi pembawa muatan dan mobilitas pembawa muatan tersebut (Gupta *et al*, 2006). Meningkatnya persentase Cu dalam CdTe akan menghasilkan peningkatan muatan pembawa tipe p dan menurunnya nilai resistivitas film. Resistivitas listrik film berbanding terbalik dengan konduktivitas

film tersebut. Ini berarti bahwa pemberian doping Cu pada konfigurasi CdS/CdTe dapat juga diartikan bahwa Cu mampu meningkatkan konduktivitas film.

Film tipis CdS/CdTe:Cu yang telah ditumbuhkan memiliki faktor idealitas diantara 1 dan 2 yang berarti film tipis CdS/CdTe:Cu mempunyai sifat listrik yang baik karena mempunyai nilai faktor idealitas seperti diode sambungan p-n yang riil. Faktor idealitas mengindikasikan derajat kualitas sambungan p-n pada film (Ramelan, 2010:138). Nilai idealitas n yang tinggi (menyimpang dari nilai ideal) menunjukkan bahwa nilai tersebut mengalami deviasi (penyimpangan) dari karakteristik diode ideal. Adanya jumlah *defect* yang cukup besar dalam material amorf atau polikristalin mengakibatkan nilai faktor idealitas menjadi semakin tinggi (Babkair, 2010). Semakin baik nilai faktor idealitas mendekati nilai ideal maka film memiliki kualitas persambungan yang semakin baik. Film tipis CdTe/CdS dikatakan baik jika memiliki faktor idealitas lebih dari dua (Batzner *et al.*, 2000). Tambahan material Cu dalam film CdS/CdTe:Cu dalam penelitian ini terlihat bisa memengaruhi nilai faktor idealitas film CdS/CdTe:Cu dan hal ini belum ada penjelasan.

4.5 Hubungan antara Struktur morfologi, Sifat Optik, dan sifat Listrik

Dari hasil penelitian dapat diketahui hubungan antara struktur morfologi, sifat optik dan sifat listrik film tipis CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu. Film yang telah berhasil ditumbuhkan mempunyai karakteristik yang baik. Citra CCD mikroskop

menunjukkan film tipis CdS/CdTe:Cu yang ditumbuhkan dengan suhu 330 °C dan daya plasma 50 watt memiliki bulir yang lebih besar dan homogen. Penambahan doping Cu sebanyak 5% menyebabkan morfologi yang dihasilkan lebih kompak dan lebih homogen daripada film dengan doping 2% dan tanpa doping.

Struktur morfologi permukaan yang tampak homogen akan memiliki kemampuan absorpsi yang tinggi, transfer muatan yang lebih baik, dan mobilitas pembawa muatan yang tinggi dibandingkan dengan permukaan yang kasar sehingga film tipis CdS/CdTe:Cu memiliki karakteristik yang baik dibandingkan dengan film *single layer* dan film yang tak terdoping.

Film tipis CdS/CdTe:Cu yang mempunyai kualitas persambungan yang baik, konduktivitas listrik yang tinggi serta memiliki koefisien absorpsi yang juga tinggi pada rentang cahaya tampak sesuai untuk diaplikasikan sebagai sel surya film tipis. Dalam konfigurasi film *double layer* sudah tampak bahwa pemberian doping Cu pada film tipis CdS/CdTe dapat meningkatkan sifat optik dan sifat listrik film.

BAB 5

SIMPULAN DAN SARAN

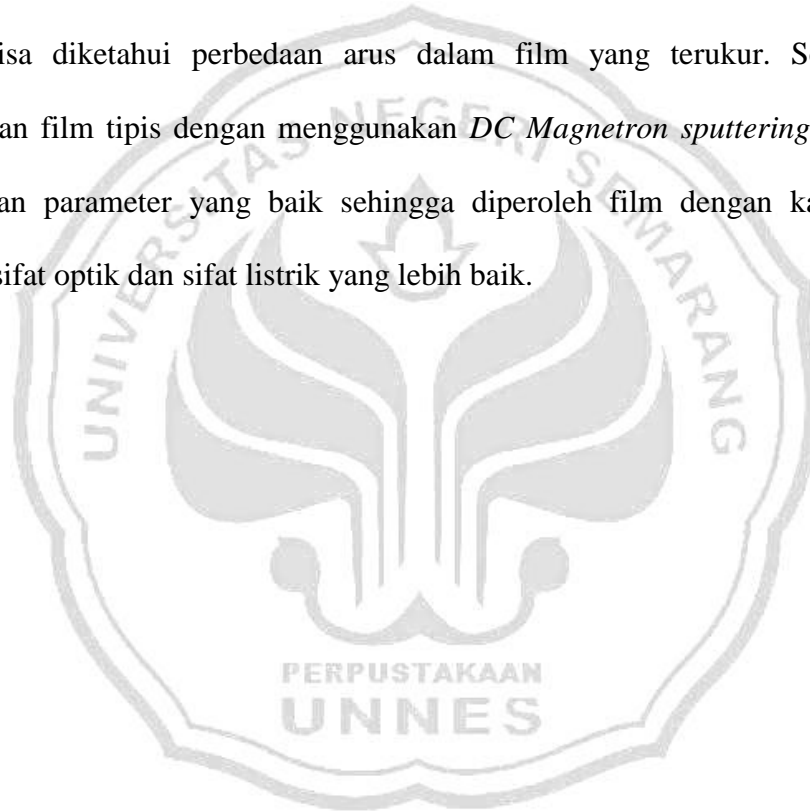
5.1 Simpulan

Film tipis CdS/CdTe, CdS/CdTe:Cu(2%) dan CdS/CdTe:Cu(2%) dideposisikan di atas substrat ITO pada temperatur 330 °C dan daya plasma 50 W dengan metode *dc magnetron sputtering*. Citra CCD mikroskop menunjukkan lapisan tipis CdS/CdTe dan CdS/CdTe:Cu mempunyai morfologi yang homogen. Penambahan doping Cu 5% menyebabkan morfologi film yang dihasilkan lebih homogen dan kompak yang menyebabkan kualitas kristal meningkat. Film tipis dengan doping Cu memiliki E_g dan koefisien absorpsi yang tinggi. Nilai resistivitas semakin menurun dan konduktivitas yang semakin meningkat saat penambahan konsentrasi Cu lebih banyak. Faktor idealitas film telah mencapai nilai ideal untuk sambungan p-n. Nilai faktor idealitas suatu film yang menunjukkan karakteristik diode sambungan p-n ideal maka film memiliki kualitas persambungan yang baik.

Film dengan kualitas persambungan yang baik, konduktivitas listrik yang tinggi serta memiliki koefisien absorpsi yang juga tinggi pada rentang cahaya tampak sesuai untuk diaplikasikan sebagai sel surya film tipis. Terlihat bahwa pemberian doping Cu pada film tipis CdS/CdTe dapat meningkatkan sifat optik dan sifat listrik film.

5.2 Saran

Penelitian lebih lanjut terhadap deposisi film tipis *double layer* CdS/CdTe:Cu yang ditumbuhkan di atas substrat ITO bisa dilakukan dengan memvariasi konsentrasi doping Cu yang lain. Pengukuran I-V film sebaiknya dilakukan pada dua keadaan yaitu dalam keadaan terang (*light*) dan gelap (*dark*) sehingga bisa diketahui perbedaan arus dalam film yang terukur. Selanjutnya, pendeposisian film tipis dengan menggunakan *DC Magnetron sputtering* sebaiknya menggunakan parameter yang baik sehingga diperoleh film dengan karakteristik morfologi, sifat optik dan sifat listrik yang lebih baik.



DAFTAR PUSTAKA

- Babkair, S.S. 2010. Charge Transport Mechanisms and Device Parameters of CdS/CdTe Solar Cells Fabricated by Thermal Evaporation. Saudi Arabia: King Abdulaziz University. *JKAU: Sci*, Vol.22 No.1, P.21-33.
- Burgelman, M., J. Verschraegen, & J. Penndorf. 2005. Temperature Dependence of the Diode Ideality Factor in CuInS₂-on-Cu-tape Solar Cells. *Elsevier: Thin Solid Films* Vol.480–481, P.307–311
- Batzner, D.L. M.E. Oszan, D. Bonnet, K. Bucher. 2000. Device Analysis Methods for Physical Cell Parameters of CdTe/Cds Solar Cells. *Elsevier: Thin Solid Films* P.288-292
- Bylica, A., P. Sagan, I. Virt, G. Wisz, M. Bester, I. Stefaniuk, & M. Kuzma. 2006. Layers of CdTe and CdS Obtained by PLD on ITO Substrates. *Science Direct*, 511-512:439-442.
- Compaan, Alvin D., Akhlesh Gupta, Sunghyun Lee, Shanli Wang, & Jennifer Drayton. 2004. High Efficiency Magnetron Sputtered CdS/CdTe Solar Cells. *Elsevier: Solar Energy*, 77:815–822
- Demtsu, S.H., D.S. Albin, J.R. Sites, W.K. Metzger, & A. Duda. 2007. Cu-related Recombination in CdS/CdTe Solar Cells. *Science Direct: Thin Solid Films* Vol.516, P. 2251–2254
- Dzhafarov, T.D., S.S. Yesilkaya, N. Yilmaz Canli, & M. Caliskan. 2004. Diffusion and Influence of Cu on Properties of CdTe Thin Films and CdTe/CdS Cells. *Elsevier: Solar Energy Materials & Solar Cells* 85 (2005)371–383
- Riyanti, F.D. 2011. *Struktur dan Sifat Optik Film Tipis CdS/CdTe yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi. Semarang: FMIPA UnI-Versitas Negeri Semarang.
- Gupta, A., V. Parikh, A.D. Compaan. 2006. High Efficiency Ultra-thin Sputtered CdTe Solar Cells. *Science Direct: Solar Energy Materials & Solar Cells*. Vol.90, P.2263–2271

- Marwoto, P., N.M. Darmaputra, Sugianto, Z. Othaman, E. Wibowo, & S.Y. Astuti. 2012. Peningkatan Kualitas Film Tipis CdTe sebagai Absorber Sel Surya dengan Menggunakan Doping Tembaga (Cu). *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 8 : 215-221
- McCandless. B.E., Sites, J.R. 2003. Cadmium Telluride Solar Cell, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley. New York, pp.628-631.
- Lany, S., V. Ostheimer, H. Wolf, & Th. Wichert. 2001. Vacancies in CdTe: Experiment and Theory. *Elsevier: Physica B 308–310 (2001) 958–962*
- Lee, Y.H., W.J. Lee, Y.S. Kwon, G.Y. Yeom, & J.K. Yoon. 1999. Effects of CdS on the Physical Properties of Polycrystalline CdTe Films. *Elsevier*, 341:172-175.
- Lawrence, H. 1998. Cathodoluminescence, Photoluminescence and Optical Absorbance Spectroscopy of Aluminium Gallium Nitride Films. *Jurnal Mater Res. Vol. 13. No. 9. Sept 1998.*
- Ramelan, *et al.* 2010. Karakteristik Sifat Listrik dan Efek Annealing Al/n-GaSb Schottky dengan Menggunakan DMTe (Dimethyltellurium). *Jurnal Sains dan Matematika*, vol.15 nomor 3.
- Schroder, D.K. 1990. *Semiconductor Material and Device Characterization*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Sudjatmoko. 2003. *Aplikasi Teknologi Sputtering untuk Pembuatan Sel Surya Lapisan Tipis*. Workshop: Sputtering untuk Rekayasa Permukaan Bahan. Yogyakarta: Puslitbang Teknologi Maju Batan: 3
- Sugianto, & Upik Nurbaiti. 2005. *Buku Ajar Fisika Zat Padat*. Semarang: UNNES.
- Urbanczyk, M., Jakubik, Wieslaw, Maciak, & Erwin. 2005. Sensor Properties of Cadmium Sulphide (CdS) Thin Film In Surface Acoustic Wave System- Preliminary Results. *Molecular and Quantum Acoustics*, vol 26:273-281.
- Wibowo, E. 2007. *Struktur Mikro dan Sifat Optik Film Tipis CdTe sebagai Bahan Pembuatan Sel Surya yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron sputtering*. Skripsi. Semarang: FMIPA UnI-Versitas Negeri Semarang.

- Wu, X., Dhere, R.G., Yan, Y., Romero, M.J., Zhang, Y., Zhou, J., Dehart, C. & Perkins, D.A. 2002. High Efficiency Polycrystalline CdTe Thin Film Solar Cells with an Oxygenated Amorphous CdS Window Layer. *Proc. 29th IEEE PVSC*, 531-534.
- Wu, X., Zhou. J., , A. Duda, G. Teeter, & S.H. Demtsu. 2007. The Formation of different Phases of Cu_xTe and Their Effects on CdTe/CdS Solar Cells. *Science Direct*, 515 (2007): 7364-7369.
- Rehana, Z. 2007. *Preparation and Characterization of Thin Film Polycrystalline Solar Cells*. Pakistan: Lahore College for Women UnI-Versity.



LAMPIRAN 1

PERHITUNGAN KONSENTRASI DOPING PADA TARGET CdTe:Cu(2%)

Bahan : CdTe dan Cu₂Te

Massa campuran : 15 gram

Hasil yang diharapkan : CdTe:Cu(2%)

Perhitungan

$$\text{Mr CdTe} = 240,01$$

$$\text{Mr Cu}_2\text{Te} = 254,69$$

$$\text{Mol CdTe} = \frac{\text{Massa campuran}}{\text{Mr}} = \frac{15}{240,01} = 0,062497 \text{ mol}$$

$$2\% \text{ Mol (CdTe:Cu)} = \frac{\text{Mol Cu}}{\text{Mol CdTe}}$$

$$0,02 = \frac{\text{Mol Cu}}{0,062497}$$

$$\text{Mol Cu} = 0,0001249 \text{ mol}$$

$$\text{Massa Cu}_2\text{Te} = \text{Mol Cu} \times \text{Mr Cu}_2\text{Te}$$

$$= 0,0001249 \times 254,69$$

$$= 0,31835 \text{ gram}$$

$$\text{Massa CdTe} = \text{Massa campuran} - \text{Massa Cu}_2\text{Te}$$

$$= 15 - 0,31835$$

$$= 14,68165 \text{ gram}$$

LAMPIRAN 2

PERHITUNGAN KONSENTRASI DOPING Cu PADA TARGET CdTe:Cu(5%)

Bahan : CdTe dan Cu₂Te

Massa campuran : 10 gram

Hasil yang diharapkan : CdTe:Cu(5%)

Perhitungan

$$\text{Mr CdTe} = 240,01$$

$$\text{Mr Cu}_2\text{Te} = 254,69$$

$$\text{Mol CdTe} = \frac{\text{Massa campuran}}{\text{Mr}} = \frac{10}{240,01} = 0,041665 \text{ mol}$$

$$5\% \text{ mol (CdTe: Cu)} = \frac{\text{Mol Cu}}{\text{Mol CdTe}}$$

$$0,05 = \frac{\text{Mol Cu}}{0,041665}$$

$$\text{Mol Cu} = 0,00208325 \text{ mol}$$

$$\text{Massa Cu}_2\text{Te} = \text{Mol Cu} \times \text{Mr Cu}_2\text{Te}$$

$$= 0,00208325 \times 254,69$$

$$= 0,53058 \text{ gram}$$

$$\text{Massa CdTe} = \text{Massa campuran} - \text{Massa Cu}_2\text{Te}$$

$$= 10 - 0,53058$$

$$= 9,46941 \text{ gram}$$

LAMPIRAN 3
FOTO ALAT PENELITIAN DAN KARAKTERISASI



DC magnetron Sputtering



*Proses Deposisi Film Tipis
di dalam Chamber*



Pelet CdS



Pelet CdTe



Pelet CdTe:Cu(2%)



Pelet CdTe:Cu(5%)

Lanjutan Lampiran 3



Larutan preparasi substrat



Ultrasonic Bath (pencuci substrat)



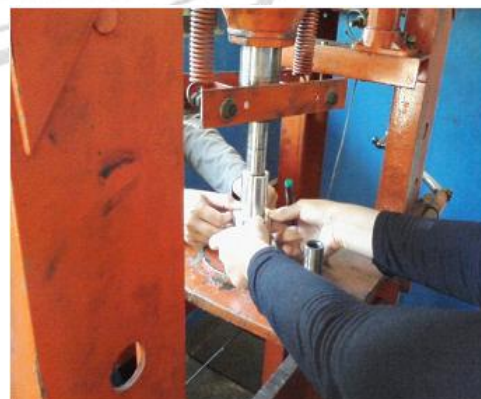
**Spektrometer Vis-Nir
CHEMUSB4VIS-NIR + PC**



CCD Mikroskop MS-804



I-V meter ELKAHFI 100 + PC



Alat pres pembuatan target

