



beda tegangan antara dinding ruangan dengan filamen panas adalah dibiarkan tetap  $\sim 100$  V. Medan magnet yang sengaja ditimbulkan sejajar dengan filamen tungsten (diameter tangkai tungsten 2mm), secara bersamaan dengan medan magnet yang dihasilkan oleh filamen memberikan trayektori (arah) dan memperbesar kemungkinan terjadinya ionisasi. Ion yang diharapkan dihasilkan dari gas Hydrogen. Filamen diberi arus dari sumber arus 4 kV DC. Biasanya dengan arus sebesar 1 A sudah cukup menimbulkan berkas yang cukup kuat, walaupun tersedia sampai batas 3 A. Gas plasma yang memasuki ruangan telah terionisasi dan ion meninggalkan sumber (*source*) melalui celah berbentuk segiempat. Sumber dihubungkan dengan transformer isolasi 80 kV, sehingga tegangan sumber dapat dinaikkan sampai maksimum 40 kV. Pada saat operasi, tekanan diukur pada range  $10^{-5}$  sampai  $2 \times 10^{-4}$  Torr.

Berkas yang diekstraksi dari sumber tidaklah murni, beberapa muatan, partikel poli-atom, serta *impurity* dengan masa yang hampir sama dengan masa Hydrogen juga ikut serta dan biasanya secara umum sangat tidak diharapkan. Untuk keperluan itu digunakan penganalisa masa elektromagnetik. Magnet penganalisa masa ini dapat membangkitkan fluks magnet uniform sebesar 11 kGaus selebar tabung 14 cm. Ini adalah magnet sektor  $60^\circ$  dengan berkas radius netral sepanjang 40 cm. Berkas ion biasanya setinggi 4 cm dari target dan lebarnya  $\leq 2$ mm. Uniformitas doping didapatkan dengan melakukan sapuan (*scanning*) berkas hanya dalam arah horizontal. Berkas digerakkan secara magnetik sepanjang target dengan menambahkan tegangan sinusoidal kecil di atas tegangan percepatan 40 kV. Modulasi kecepatan sinusoidal dari berkas yang terekstraksi kemudian dikonversikan melalui magnet penganalisa menjadi kecepatan sapuan horizontal. Ini kesemuanya diperlukan untuk mendapatkan hasil yang uniform.

Ruang target yang dipakai dalam implantasi adalah aluminium berbentuk struktur kubus dan mempunyai ruangan terpisah di sisinya yang dapat divakumkan dengan pompa rotari. Sistem seperti ini memungkinkan untuk membiarkan ruangan target dalam tekanan atmosfer pada saat peletakan sampel. Magnet permanen diletakkan di atas dan di bawah target memberikan medan magnet yang dapat mengembalikan elektron sekunder kembali ke target selama proses ion implantasi berlangsung. Di dalam ruang target ada blok tembaga yang dipasang pada baja stainless dingin yang dapat digunakan untuk cairan nitrogen dalam mendinginkan substrat yang panas. Sampel diletakkan di atas tembaga sesuai dengan arah berkas untuk mengurangi efek *'channeling'* selama proses ion implantasi. Substrat dipanaskan dan ditutup dengan tutup segiempat di depan target bila diperlukan, sehingga luasan yang tersapu oleh ion dapat ditentukan secara pasti.

## PERCOBAAN

Sebelum percobaan sampel disiapkan dengan tahapan persiapan sebagai berikut:

- Beberapa sampel dari ingot yang berbeda dari senyawa kristal tunggal  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  dipilih untuk percobaan ini.
- Sampel dipilih yang bebas retakan dan void. Pada percobaan ini dilakukan pengujian sampel untuk senyawa kristal tunggal  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  dengan komposisi  $x=0\%$ ,  $5\%$ ,  $20\%$ , dan  $25\%$ .
- Sebelum dilakukan pengujian kristal tunggal quaterner  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  diperlukan persiapan. Cuplikan dipotong-potong berbentuk lempengan (*wafers*) kemudian dipoles dengan amplas kertas dari ukuran 2000 sampai dengan pasta ukuran 3 dan 1 mm serta pemolesan secara vibrasi dengan bubuk Aluminium Oksida berukuran 0,05 mm.
- Sampel kemudian dibersihkan dengan genklene untuk menghilangkan lemak yang biasanya dipakai untuk menempelkan wafer selama pemolesan berlangsung.
- Selanjutnya dilakukan proses etsa yaitu larutan 1% Bromine dalam alkohol selama 60 detik, atau larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{K}_2\text{CrO}_7$  selama 5 detik. Lalu dibersihkan dengan air deioniasi.
- Sampel kemudian dibagi menjadi 3 region (bagian) dengan menorehkan permukaannya. Setiap region menerima dosis ion implantasi berbeda. Region pertama sebagai region non-implantasi, dan dua region lainnya diimplantasi dengan  $\text{H}^+$  dengan dosis berlainan. Ketika ion  $\text{H}^+$  ditembakkan ke permukaan tertentu pada kristal, maka kedua region lainnya ditutup dengan pelat metal. Metoda ini dipakai untuk memastikan bahwa karakteristik konduktivitas yang dihasilkan didapat dari sampel kristal yang sama sehingga memiliki nilai perbandingan yang dapat dipertanggungjawabkan.
- Setelah ion implantasi, sampel kemudian dianiling dalam vakum pada suhu  $300^\circ\text{C}$ , untuk mengaktivasi *'dopant'* dan menghilangkan kerusakan permukaan.
- Sampel kemudian diukur fotokonduktivitasnya. Untuk keperluan ini dua buah kontak kecil diperlukan untuk setiap region dengan dosis implantasi berbeda. Kontak dibuat dengan mengevaporasi titik metal dipermukaannya, dengan menggunakan masker untuk menutupi permukaan lainnya. Evaporasi dilakukan dengan alat *'Thermal evaporator'* yang divakum pada tekanan  $5 \times 10^{-6}$  Torr dan metal untuk kontak diupkan pada *boat* tungsten.
- Pasta perak kemudian dipakai untuk menempelkan kawat perak rambut pada kontak tersebut. Semua kontak dicek dengan *'curve tracer'* Tektronix 575 untuk dipastikan bahwa setiap kontak memiliki karakteristik *'ohmic'*. Kontak tidak dapat dipakai bila karakteristik tidak linier sampai dengan 5 mA.

Sampel dengan kawat perak dipasangkan pada *PC-board* dan kawat perak disolder pada terminalnya. Resistivitas sampel diukur dengan *Four point probe* dan spektrum fotokonduktifitasnya diukur pada panjang gelombang antara 700-1500 nm, berhubungan dengan energi 'photon'  $h\nu = 0,8-1,8$  eV. Bandgap didapatkan dengan mem-plot  $(ah\nu)^2$  terhadap 'photon' energi,  $h\nu$ . Plot grafik ini ditunjukkan pada Gambar 5 sampai dengan Gambar 8.

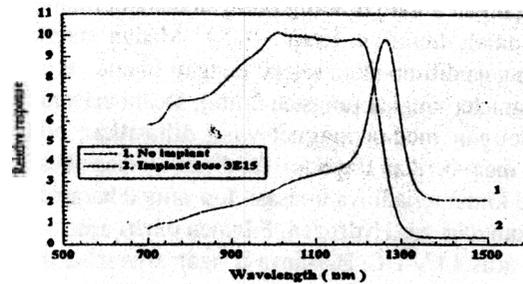
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 1 sampai dengan 4 menunjukkan spektrum fotokonduktifitas yang didapat dari sampel tipe -p dari kristal tunggal  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CuIn}_{0,95}\text{Ga}_{0,05}\text{Se}_2$ ,  $\text{CuIn}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{Se}_2$ ,  $\text{CuIn}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{Se}_2$  berturut-turut sebelum dan sesudah ion implantasi  $\text{H}^+$ . Hasil membuktikan bahwa setelah dosis  $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , hanya  $\text{CuInSe}_2$  menunjukkan respon perubahan terhadap energi 'photon' yang berhubungan dengan panjang gelombang 1300 nm. Tipe konduktifitas juga berubah dari tipe -p menjadi -n setelah ion implantasi. Hasil pengukuran resistivitas dan ion implantasi ditunjukkan pada Tabel 1.

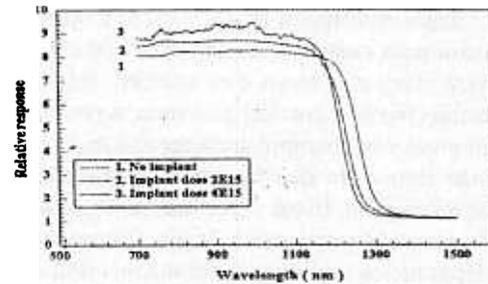
Spektrum fotokonduktifitas menunjukkan bahwa respon sebelum implantasi dari bahan kristal  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  lebih lebar dari pada  $\text{CuInSe}_2$ . Tetapi bahan  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{S}$  menunjukkan perubahan yang lebih kecil setelah implantasi  $\text{H}^+$  sampai dosis  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . Beberapa puncak kecil terlihat pada panjang gelombang sekitar 700 sampai 1200 nm. Ini mungkin berhubungan dengan ketidaksempurnaan struktur dan sedikit defiasi akibat tidak uniformnya bahan [2]. Sudut absorpsi (*absorption edge*) menunjukkan bentuk eksponensial untuk semua sampel. Bentuk ini dapat kemungkinan akibat medan listrik yang berhubungan dengan ionisasi 'impurity' dan ketidaksempurnaan struktural [3].

Plot  $(ah\nu)^2$  terhadap  $h\nu$  dipakai untuk menentukan bandgap dari sampel dengan mengekstrapolasikan bagian yang linier pada grafik. Hasilnya menunjukkan bahwa bandgap bahan ini sesuai dengan hasil yang telah dipublikasikan oleh Ciszek dkk [4] dan Chu dkk. [5] sebagaimana ditabelkan pada Tabel 2 di bawah ini.

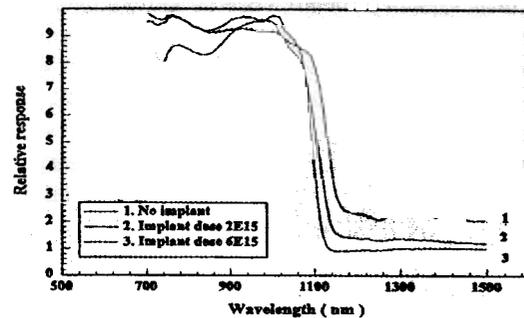
Bertambahnya bandgap dan resistivity paduan  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  serta perubahan konduktifitas pada bahan  $\text{CuInSe}_2$  setelah ion implantasi  $\text{H}^+$  dapat diasosiasikan dengan beberapa kemungkinan atau faktor penyebab. Pada saat ini telah diketahui bahwa karakteristik elektrik dari bahan kristal  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  sangat dipengaruhi oleh populasi dislokasi atom atau atom vakansi lainnya. Implantasi ion  $\text{H}^+$  telah menyebabkan terisinya kekosongan atom ini dengan atom-atom H, sehingga secara pasti menambah besarnya resistivity bahan. Sebaliknya secara teoritis penempatan ion  $\text{H}^+$  di dalam



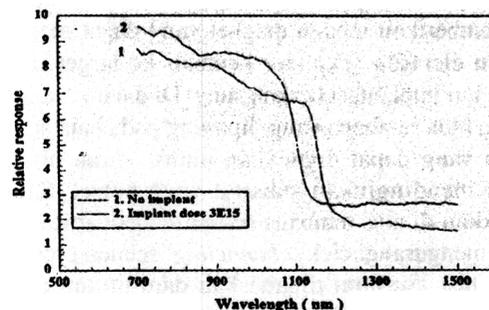
Gambar 1. Spektrum fotokonduktifitas dari kristal tunggal p-CuInSe<sub>2</sub> diukur pada suhu ruangan, sebelum dan sesudah ion implantasi H<sup>+</sup>.



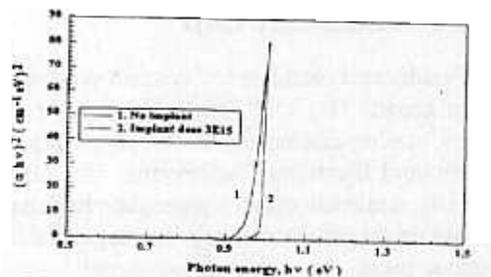
Gambar 2. Spektrum fotokonduktifitas dari kristal tunggal p-CuIn<sub>0,95</sub>Ga<sub>0,05</sub>Se<sub>2</sub> diukur pada suhu ruangan, sebelum dan sesudah ion implantasi H<sup>+</sup>.



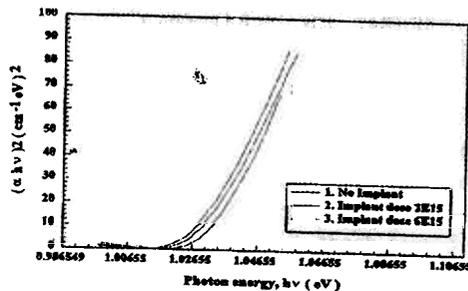
Gambar 3. Spektrum fotokonduktifitas dari kristal tunggal p-CuIn<sub>0,8</sub>Ga<sub>0,2</sub>Se<sub>2</sub> diukur pada suhu ruangan, sebelum dan sesudah ion implantasi H<sup>+</sup>.



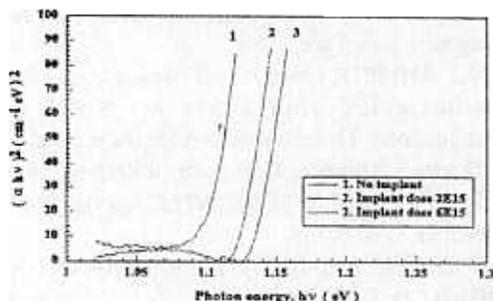
Gambar 4. Spektrum fotokonduktifitas dari kristal tunggal p-CuIn<sub>0,75</sub>Ga<sub>0,25</sub>Se<sub>2</sub> diukur pada suhu ruangan, sebelum dan sesudah ion implantasi H<sup>+</sup>.



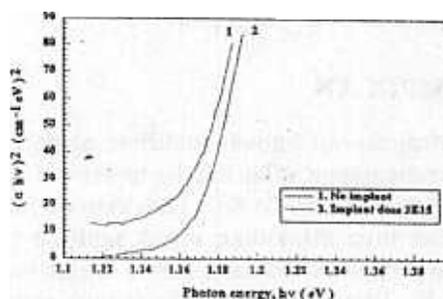
Gambar 5. Grafik  $(\alpha h\nu)^2$  terhadap energi photon  $h\nu$  untuk mengkalkulasi bandgap kristal tunggal p- $\text{CuInSe}_2$ , sebelum dan sesudah ion



Gambar 6. Grafik  $(\alpha h\nu)^2$  terhadap energi photon



Gambar 7. Grafik  $(\alpha h\nu)^2$  terhadap energi photon  $h\nu$  untuk mengkalkulasi bandgap kristal tunggal p- $\text{CuIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Se}_2$ , sebelum dan sesudah ion implantasi  $\text{H}^+$ .



Gambar 8. Grafik  $(\alpha h\nu)^2$  terhadap energi photon  $h\nu$  untuk mengkalkulasi bandgap kristal tunggal p- $\text{CuIn}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{Se}_2$ , sebelum dan sesudah ion implantasi  $\text{H}^+$ .

Tabel Data sampel sebelum dan sesudah ion implantasi

| Sampel  | Sebelum ion implantasi |                                     | Sesudah ion implantasi<br>Dengan dosis $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ |                                     |
|---|------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
|   | Tipe konduktifitas     | Resistivitas ( $\Omega\text{-cm}$ ) | Tipe konduktifitas  | Resistivitas ( $\Omega\text{-cm}$ ) |
| $\text{CuInSe}_2$                               | p                      | 0,43                                | -   | -                                   |
| $\text{CuIn}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{Se}_2$ | p                      | 0,05                                | P   | 0,46                                |
| $\text{CuIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Se}_2$   | p                      | 0,04                                | P   | 0,04                                |
| $\text{CuIn}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{Se}_2$ | p                      | 0,02                                | -   | -                                   |

| Sampel  | Sesudah ion implantasi<br>Dengan dosis $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ |                                     | Sesudah ion implantasi<br>Dengan dosis $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ |                                     |
|---|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
|   | Tipe konduktifitas  | Resistivitas ( $\Omega\text{-cm}$ ) | Tipe konduktifitas  | Resistivitas ( $\Omega\text{-cm}$ ) |
| $\text{CuInSe}_2$                               | n   | 1,06                                | -   | -                                   |
| $\text{CuIn}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{Se}_2$ | p   | -                                   | p   | 8,15                                |
| $\text{CuIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Se}_2$   | p   | -                                   | p   | 0,05                                |
| $\text{CuIn}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{Se}_2$ | p   | 0,08                                | -   | -                                   |

Tabel 2. Bandgap energi untuk  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

| Sampel  | Bandgap sebelum ion implantasi (eV) | Bandgap setelah ion implantasi (eV), dengan dosis ion |                                    |                                    |
|---|-------------------------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|
|   |                                     | $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$                    | $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ | $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ |
| $\text{CuInSe}_2$                               | 0,96                                | -   | 0,98                               | -                                  |
| $\text{CuIn}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{Se}_2$ | 1,024                               | 1,026   | -                                  | 1,03                               |
| $\text{CuIn}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{Se}_2$   | 1,095                               | 1,12  | -                                  | 1,13                               |
| $\text{CuIn}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{Se}_2$ | 1,16                                | -   | 1,168                              | -                                  |

atom vakansi ini seharusnya menyebabkan berkurangnya bandgap karena ion-ion ini akan menempatkan dirinya pada pusat-pusat rekombinasi yang letaknya berada di antara pita valensi dan pita konduksi. Dengan demikian akhirnya akan mempersempit bandgap. Namun demikian dalam percobaan ini terjadi fenomena yang sebaliknya yang masih belum dapat dijelaskan penyebabnya. Sangat sedikit sekali literatur yang menjelaskan karakteristik bahan  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  ini menyebabkan peneliti mengalami kesulitan untuk mencari referensinya. Untuk hal ini perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan melakukan analisa dengan menggunakan SEM/ TEM terhadap bahan  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  ini.

## KESIMPULAN

Pengukuran fotokonduktifitas dapat dipakai untuk menentukan nilai band-gap sampel paduan  $\text{CuInSe}_2$  dan  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ . Pengukuran fotokonduktifitas juga dilakukan untuk melihat respon terhadap perubahan spektrum cahaya setelah implantasi ion  $\text{H}^+$ . Bertambahnya band-gap serta resistivitas bahan sampel paduan  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ , serta perubahan konduktivitas setelah implantasi ion  $\text{H}^+$  diasosiasikan berhubungan dengan beberapa faktor. Salah satu kemungkinan tersebut adalah bahwa ion  $\text{H}^+$  mengisi kekosongan atom pada state akseptor Cu vacancy. Secara teoritis dengan mengisi state akseptor Cu vacancy seharusnya membawa pengaruh pada mengecilnya bandgap, namun oleh sebab yang belum dapat dijelaskan yang terjadi adalah fenomena sebaliknya.

Sedangkan bertambahnya resistivitas bahan dapat dijelaskan secara teoritis bahwa dengan terisinya kekosongan atom (atomic vacancies) oleh ion  $\text{H}^+$ , dengan sendirinya mobilitas elektron makin berkurang. Ini menyebabkan bertambahnya resistivitas bahan.

Masih banyaknya fenomena yang belum dapat diterangkan secara teoritis dalam penelitian ini secara pasti masih membuka kesempatan untuk penelitian lanjutan terhadap bahan ini, terutama penelitian terhadap mikrostrukturnya dengan menggunakan SEM atau TEM

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Dr. R D Tomlinson dan Dr. Mike Yakushev, masing-masing adalah staf pengajar jurusan Electronic and Electrical Engineering, University of Salford, UK, dan rekan-rekan sejawat yang telah banyak membantu dalam penelitian dan penulisan makalah ini. Dan semua pihak yang tidak sempat penulis sebutkan satu persatu.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. S M SZE, *VLSI Technology*, Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1988.
- [2]. EJAZ AHMED, *Growth and Characterization of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Thin Films for Solar Cell Applications*, Thesis submitted for the requirement of Doctor Phillosphy, University of Salford, 1995
- [3]. D REDFIELD, M AFROMOWITZ, *Applied Physics Letter*, **11**, (1967), 138.
- [4]. T. F. CISZEK, R BACEWICZ, J.R. DURRANT, S. K. DEBB, D DUNLAVY, *Crystal Growth and Photoelectrical Properties of  $\text{CuAg}_{1-x}\text{InSe}_2$  and  $\text{CuIn}_y\text{Ga}_{1-y}\text{Se}_2$  Solid Solutions*, Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference, New York, 1987, 1448-1453.
- [5]. J W CHU, A J DONOHOO, D HANEMAN, *Properties of  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ , Solar Energy Materials and Solar Cells*, **25**, (1992), 87.