

PENGARUH VARIASI DOSIS DAN ENERGI ION FOSFOR TERHADAP RESISTIVITAS SILIKON AMORF TER-HIDROGENASI

Agus Santoso, Sayono

Puslitbang Teknologi Maju - Batan

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI DOSIS DAN ENERGI ION FOSFOR TERHADAP RESISTIVITAS SILIKON AMORF TER-HIDROGENASI. Telah dilakukan penelitian pengaruh dosis dan energi ion fosfor terhadap resistivitas silikon amorf terhidrogenasi. Implantasi ion fosfor dilakukan dengan energi dari 10 keV sampai dengan 80 keV, sedangkan dosis ion 1×10^{15} s/d $1,2 \times 10^{16}$ ion/cm². Pengujian cuplikan ikatan atom fosfor pada silikon amorf terhidrogenasi dilakukan dengan spektrometer inframerah dan XRD. Sedangkan pengukuran resistivitas dilakukan dengan menggunakan metode probe empat titik. Dari hasil analisa dengan spektrum infra merah diperoleh bahwa ikatan Si-H pada a-Si:H diimplantasi dengan ion fosfor terjadi pada angka gelombang SiH, SiH₂, dan SiH₃ pada angka gelombang 2347,2 dan 2395,4 cm⁻¹ merupakan vibrasi regang. Sedangkan pada angka gelombang 1082 cm⁻¹ merupakan vibrasi regang dari Si-O yang berasal dari Si-O-Si. Ikatan fosfor pada a-Si:H ditunjukkan angka gelombang 420 cm⁻¹, 434 cm⁻¹ dan 476 cm⁻¹ merupakan vibrasi regang dengan bentuk ikatan Si-P. Banyaknya dosis dan besar energi ion berpengaruh terhadap penurunan resistivitas a-Si:H. Resistivitas a-Si:H minimum sebesar $1,713 \times 10^{-1}$ ohm cm diperoleh pada energi 60 keV, dosis $6,21 \times 10^{15}$ ion/cm².

Kata kunci : silikon amorf, fosfor, implantasi ion, infra merah

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF DOSE AND ENERGY VARIATION OF FOSFOR ION ON THE RESISTIVITIES OF HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON. Influence of ion dose and energy variation of fosfor implanted into hydrogenated amorphous silicon for various dose and energy has been carried out. Ion dose and energy were varied respectively from 1×10^{15} – 1.2×10^{16} ion/cm² and 10 – 80 keV. Existence of fosfor on hydrogenated amorphous silicon was analyzed using infrared spectrometry, while the resistivity was measured using four point probe method. It was found that Si-H, SiH₂, and SiH₃ bonding on a-Si:H implanted fosfor was occurred at the wave number of 2347,2 cm⁻¹ and 2395,4 cm⁻¹ as a stretching vibration mode, wave number 1082 cm⁻¹ as a stretching vibration mode of Si-O and 420 cm⁻¹, 434 cm⁻¹ and 476 cm⁻¹ wave number as a P-Si stretching vibration mode. The increasing of ion dose and energy will decrease the resistivities of the a-Si:H. The minimum resistivity in orde of $1,713 \times 10^{-1}$ ohm cm was achieved at the energy of ion 60 keV and dose $6,21 \times 10^{15}$ ion/cm²

Keyword : silicon amorphous, phosfor, ion implantation. infrared

LATAR BELAKANG

Pada saat ini teknologi lapisan tipis dan pemanfaatannya telah berkembang dengan pesat, dan lapisan tipis yang sedang diteliti dan dikembangkan secara intensif adalah dalam bidang semikonduktor untuk pembuatan piranti elektronika seperti transistor lapisan tipis (*thin film transistor*), fotodetektor, rangkaian hibrid dan sel surya. Selama ini bahan semikonduktor yang banyak digunakan pada dunia industri adalah semikonduktor dengan stuktur kristal. Bahan semikonduktor jenis kristal biaya produksinya

sangat besar, maka dikembangkan semikonduktor jenis amorf, sehingga bisa menekan biaya produksi. Diantara bahan amorf adalah silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H). Lapisan tipis silikon amorf mempunyai keunggulan dari segi ekonomi, tetapi juga mempunyai kelemahan pada sifat optis dan elektrik. Silikon amorf bila digunakan untuk bahan sel surya kelemahannya adalah konversi energinya baru mencapai 13 %. Hingga saat ini masih banyak dilakukan penelitian untuk meningkatkan efisiensi konversi energi.

Salah satu cara untuk meningkatkan kualitas bahan a-Si:H adalah dengan menambahkan bahan pengotor yang antara lain adalah fosfor sehingga menjadi semikonduktor ekstrinsik atau tak murni. Tujuan pengotoran ini adalah supaya sifat listrik dari semikonduktor a-Si:H dapat dioptimalkan. Jenis pengotor untuk bahan semikonduktor yaitu fosfor atau boron. Proses pengotorannya dapat dilakukan dengan metode ion implantasi menggunakan akselerator atau plasma lucutan pijar^[1,3].

Pada penelitian ini pembuatan lapisan tipis a-Si:H menggunakan sputtering dengan lempeng a-Si sebagai target dan kaca sebagai substrat sedangkan gas masukannya berupa gas hidrogen. Dengan gas hidrogen lapisan yang terjadi pada substrat berupa a-Si:H. Untuk meningkatkan kualitas dari a-Si:H maka cuplikan didoping dengan fosfor menggunakan mesin implantasi ion 100 keV yang ada di P3TM. Energi ion divariasi dari 10 keV s/d 80 keV dan dosis ion 1×10^{15} s/d $1,2 \times 10^{16}$ ion/cm². Karakterisasi cuplikan menggunakan spektroskopi infra merah, hal ini dilakukan untuk mengetahui keberhasilan masuknya atom hidrogen kedalam a-Si sehingga terbentuk ikatan kovalen antara Si dengan H pada lapisan tipis a-Si:H dan juga ikatan P dengan Si. Struktur amorf a-Si:H dianalisa dengan difraksi sinar X, sedangkan untuk menentukan pengaruh dosis dan energi ion terhadap resistivitas digunakan metode probe empat titik.

TEORI

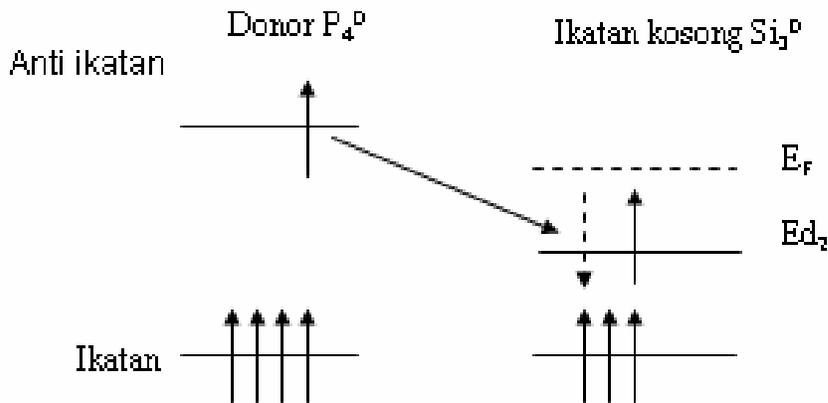
Atom fosfor pada ketidakmurnian semikonduktor kristal berfungsi sebagai pengotor dan menggantikan kedudukan silikon yang memiliki bilangan koordinasi empat. Kelebihan satu elektron

atom fosfor dipromosikan menuju anti ikatan menjadi pembawa muatan bebas dalam pita konduksi. Sedangkan fosfor yang menggantikan kedudukan silikon akan menimbulkan lubang pada pita valensi^[2].

Struktur silikon amorf merupakan jaringan acak dengan bilangan koordinasi berbeda sehingga pengotor atau dopan harus menyesuaikan ikatannya dengan bilangan koordinasi ikatan jaringan acak. Fosfor dan boron sebagai dopan pada silikon amorf berada dalam koordinasi tiga ikatan. Hal tersebut menyebabkan fosfor dan boron berperan sebagai pengotor tak aktif.

Proses doping dapat terjadi bila atom dopan dalam keadaan terionisasi. Atom fosfor bermuatan positif memiliki konfigurasi koordinasi empat ikatan dan membentuk donor terionisasi P_4^+ . Suatu rapat keadaan cacat dalam (*density defect*) berupa ikatan kosong dapat mengambil elektron dari donor terionisasi.

Keadaan ikatan donor dengan cacat ditunjukkan pada Gambar 1. Orbital hibrida sp^3 donor P_4^0 terbagi menjadi tingkat donor ikatan dan anti ikatan. Cacat silikon memiliki bilangan koordinasi tiga ikatan dan satu ikatan kosong di tengah celah energi. Perpindahan dari donor menuju ikatan kosong menghasilkan perubahan energi ($E_p - E_{d2}$). E_p adalah tingkat energi dopan dalam hal ini fosfor. E_{d2} merupakan tingkat energi cacat dalam keadaan dua elektron yaitu dua subkulit masing-masing mempunyai 1 elektron. Perpindahan elektron tersebut menghasilkan pasangan dopan dan energi cacat pada energi rendah. Energi Fermi terletak diantara tingkat energi donor dengan tingkat energi cacat keadaan dua elektron^[4].



Gambar 1. Diagram perpindahan energi elektron dari donor menuju cacat^[4].

Pergerakan energi Fermi dari celah menuju tepi pita akibat pengotoran mengubah kesetimbangan kedudukan elektron pada keadaan cacat. Keadaan cacat D_c akan mengeksitasi elektron menuju pita konduksi pada a-Si:H tipe n. Sementara keadaan cacat D_+ mengambil elektron dari pita valensi pada a-Si:H^[3].

Sifat bahan lapisan tipis juga ditentukan oleh ketebalan lapisan. Untuk mengetahui ketebalan lapisan tipis a-Si:H yang dihasilkan dapat dihitung dengan menggunakan data-data dari spektrum transmisi yang dihasilkan dari analisa menggunakan UV - VIS yang menunjukkan hubungan antara transmisi dengan angka gelombang. Secara matematis dapat dituliskan dengan persamaan 1 dan 2.

$$n_i = \frac{(1+n_0) + \sqrt{(1+n_0)^2 - 4n_0 T_c}}{2\sqrt{T_c}} \quad (1)$$

$$d = \frac{1}{2 \times n_i \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \quad (2)$$

dengan :

- d = ketebalan lapisan tipis (nm)
- n_i = index bias lapisan tipis
- n_0 = index bias kaca (1,5)
- T_c = transmitansi minimum
- λ_1 = panjang gelombang puncak spektrum pertama (nm)
- λ_2 = panjang gelombang puncak spektrum kedua (nm)

Implantasi Ion adalah suatu metode untuk memasukkan/mendeposisikan atom pengotor pada target lapisan tipis silikon amorf terhidrogenasi. Pada penelitian ini digunakan fosfor sebagai atom pengotornya (atom dopan). Implantasi ion fosfor ke dalam a-Si:H menyebabkan penetrasi ion fosfor ke dalam target bergantung pada energi ion, massa atom target, massa pengotor (dopan), nomor atom dan rapat jenis material target. Sedangkan jangkauan ion dopan ke dalam target menurut (*Dearmaley dkk*) dirumuskan sebagai berikut:

$$R_i(A) = \frac{60 m_i (m_i + m_t) (Z_i^{2/3} + Z_t^{2/3})^{1/2}}{\rho m_i Z_i Z_t} E \quad (3)$$

dengan :

- $R_i(A)$ = jangkauan ion terimplantasi
- m_i = massa ion dopan (amu)
- m_t = massa ion target (amu)
- Z_i = nomor atom ion dopan
- Z_t = nomor atom target
- ρ = rapat massa atom target (g/cm³)
- E = energi ion dopan (keV)

Dari persamaan 3 terlihat bahwa besarnya jangkauan penetrasi ion dopan berbanding langsung dengan energi ion.

Jumlah pengotor yang harus di dopankan pada target bergantung pada lamanya proses impantasi ion. Sedangkan banyaknya dosis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$D = \frac{I t}{e A} \quad (4)$$

dengan :

- D = dosis ion dopan (ion/cm²)
- I = arus ion dopan (ampere)
- t = waktu (detik)
- e = muatan elektron (1,602 x 10⁻¹⁹ C)
- A = luas arus berkas (cm²)

TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Deposisi Lapisan Tipis a-Si:H

Sebelum proses deposisi dimulai, target Si substrat dipasang pada tempatnya masing-masing. Pelapisan tipis silikon *amorf* pada substrat gelas dilakukan dengan teknik *DC sputtering*. Pada *DC sputtering* ini lapisan tipis silikon *amorf* dihasilkan dalam tabung reaktor plasma.

Substrat

Bahan untuk substrat adalah kaca preparat yang dipotong berukuran (10 × 20 × 2) mm. Sebelum digunakan sebagai substrat, kepingan kaca preparat tersebut dicuci secara bertahap di dalam *ultrasonic cleaner*. Pencucian bertahap tersebut dimaksudkan untuk melarutkan kotoran dan minyak yang mungkin melekat pada kaca. Pada pencucian

tahap pertama digunakan larutan *detergent* sebagai pelarut, sedangkan pada pencucian tahap kedua digunakan alkohol 99 %. Selanjutnya kepingan kaca preparat dikeringkan dalam *oven* bersuhu 100 °C selama 1 jam hingga kering dan siap digunakan. Untuk menghindari pengotoran kembali, substrat disimpan dalam wadah yang kedap debu dan pengambilannya selalu dilakukan dengan pinset.

Deposisi Lapisan Tipis a-Si:H

Peralatan sistem sputtering yang digunakan terdiri dari tabung reaktor plasma, pompa vakum, vakum meter, sumber tegangan DC, gas argon dan gas hidrogen. Target silikon (a-Si) dipasang pada tempat target yang berfungsi sebagai katoda di dalam tabung reaktor plasma dan substrat kaca diletakkan pada anoda. Tabung reaktor plasma divakumkan sampai orde 10^{-5} torr dengan pompa vakum rotari dan difusi. Pemvakuman ini dimaksudkan untuk membersihkan partikel-partikel yang tidak dikehendaki. Setelah tingkat kevakuman mencapai orde 10^{-5} torr, kemudian gas argon dialirkan ke dalam tabung reaktor plasma melalui katup yang digunakan untuk mengatur tekanan gas hingga tingkat kevakuman menjadi 5×10^{-4} torr. Kemudian sumber tegangan DC dihidupkan sehingga terjadi plasma lucutan pijar pada tabung *sputtering*, maka gas argon terionisasi. Ion-ion argon akan menumbuk target Si sehingga terjadi percikan atom Si. Substrat kaca akan mendapatkan percikan ion Si, sehingga ion Si akan menyisip pada susunan atom substrat kaca. Untuk mendapatkan lapisan tipis a-Si:H yang baik dilakukan dengan bervariasi suhu substrat dari 150 °C s/d 300 °C, lama deposisi dari 1 jam sampai dengan 3 jam. Pada proses dc sputtering gas penembaknya target (a-Si) adalah argon. Gas hidrogen dimasukkan bersama gas argon sehingga lapisan tipis yang terbentuk sudah berupa a-Si:H.

Proses Implantasi Fosfor

Setelah tahap persiapan cuplikan selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah proses doping fosfor kedalam cuplikan dengan menggunakan teknik implantasi ion. Mesin implantasi ion yang digunakan adalah akselerator ion energi rendah jenis Cockroft-Walton buatan P3TM BATAN yang mampu mempercepat berbagai jenis ion hingga mencapai energi sekitar 100 keV. Dengan mesin ini dapat dilakukan implantasi berbagai jenis ion dengan berbagai nilai dosis dan energi ion. Pada penelitian ini implantasi dilakukan dengan dopan fosfor dosis dari 1×10^{15} s/d $1,2 \times 10^{16}$ ion/cm² serta energi dari 10 keV s/d 80 keV.

Analisa Struktur Kristal

Untuk menganalisa struktur kristal dari lapis a-Si:H hasil penumbuhan digunakan alat XRD. Informasi langsung yang dapat diperoleh dari pengujian ini adalah intensitas (cacah) yang disajikan pada sumbu tegak, dan sudut hamburan (2θ) yang disajikan pada sumbu datar. Dari informasi intensitas ini dapat untuk menentukan posisi (letak) dari atom-atomnya. Sedangkan dari informasi sudut hamburan (2θ) dapat digunakan untuk menghitung jarak antar bidang, bidang-bidang hamburan serta struktur kristal beserta parameter kisinya.

Analisa Spektrometer Infra Merah

Cuplikan a-Si:H fosfor dianalisa untuk mengetahui ikatan atomnya dengan spektrometer infra merah. Dari spektrum infra merah tersebut dapat untuk menentukan ikatan kimia yang ada dalam cuplikan tersebut. Spektrometer infra merah mempunyai keunggulan yaitu dapat menentukan adanya hidrogen pada cuplikan yang dianalisa. Karakterisasi cuplikan hasil implantasi ion menggunakan spektroskopi inframerah dilakukan di Laboratorium FMIPA UNS.

Perhitungan ketebalan lapisan dihitung dengan rumus (2) dan pengukuran resistivitas menggunakan probe empat titik.

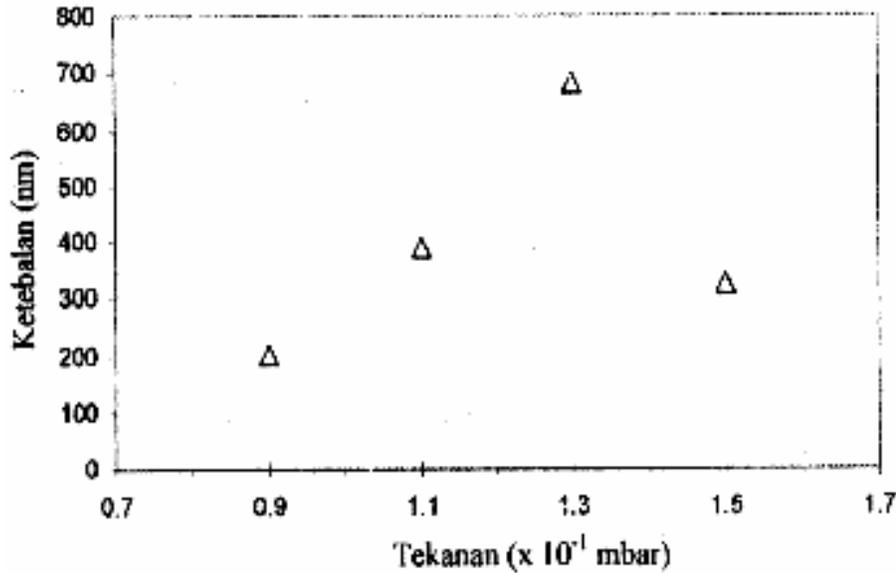
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini telah dibuat lapisan tipis a-Si:H dengan DC sputtering untuk beberapa variasi tekanan $9,0 \times 10^{-2}$ mbar, $1,1 \times 10^{-1}$ mbar, $1,3 \times 10^{-1}$ mbar dan $1,5 \times 10^{-1}$ mbar dengan parameter lain dibuat konstan yaitu jarak antara elektroda 1,9 cm, waktu deposisi 1 jam, tegangan operasi 2 kV dan arus 45 mA. Pengaruh antara tekanan gas dengan terhadap ketebalan ditunjukkan pada Gambar 2.

Dari Gambar 2 diperoleh bahwa ketebalan lapisan tipis yang paling tebal pada tekanan $1,3 \times 10^{-1}$ mbar. Berdasarkan data dari UV – VIS dihitung dengan rumus 2 maka diperoleh ketebalan pada tekanan $1,3 \times 10^{-1}$ mbar sebesar 684 nm. Hal ini disebabkan pada tekanan tersebut terjadi plasma lucutan pijar yang optimum untuk gas sputter argon mengakibatkan ion target terdeposisi pada substrat menjadi optimal. Sedangkan pada tekanan rendah pembentukan plasma tidak optimum sehingga ion target yang terdeposisi pada substrat menjadi berkurang. Untuk tekanan tinggi jumlah ion

menjadi lebih sedikit sehingga jumlah ion target yang terdepositasi pada substrat juga berkurang. Berdasarkan hasil tersebut diatas maka selanjutnya

pembuatan lapisan tipis a-Si:H dibuat pada tekanan vakum 1.3×10^{-1} mbar, waktu deposisi 1 jam dan jarak elektroda 1,9 cm.



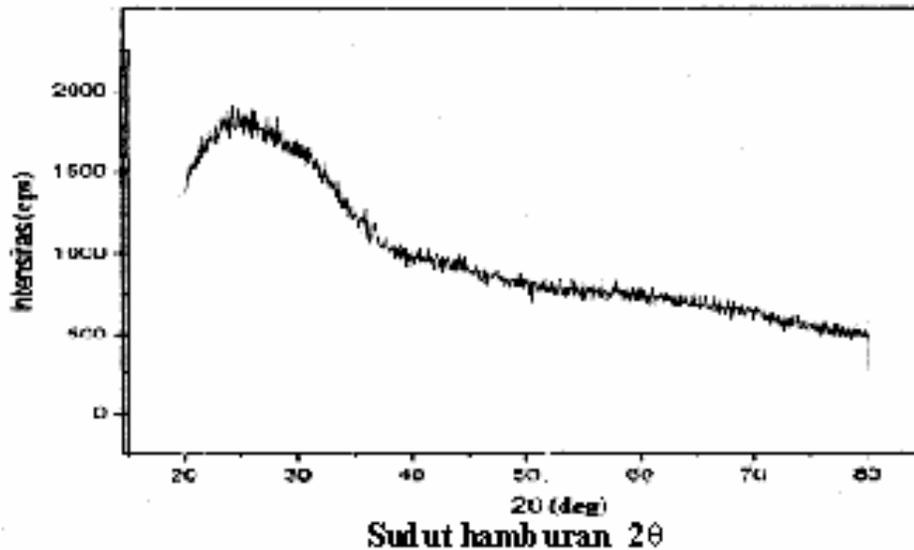
Gambar 2. Grafik hubungan antara tekanan vakum dengan ketebalan lapisan tipis.

Hasil Uji Lapisan Tipis a-Si:H Dengan XRD

Hasil pengukuran struktur kristal dengan XRD dari cuplikan a-Si: H ditunjukkan pada Gambar 3

Dari Gambar 3 terlihat bahwa tidak ada pun-

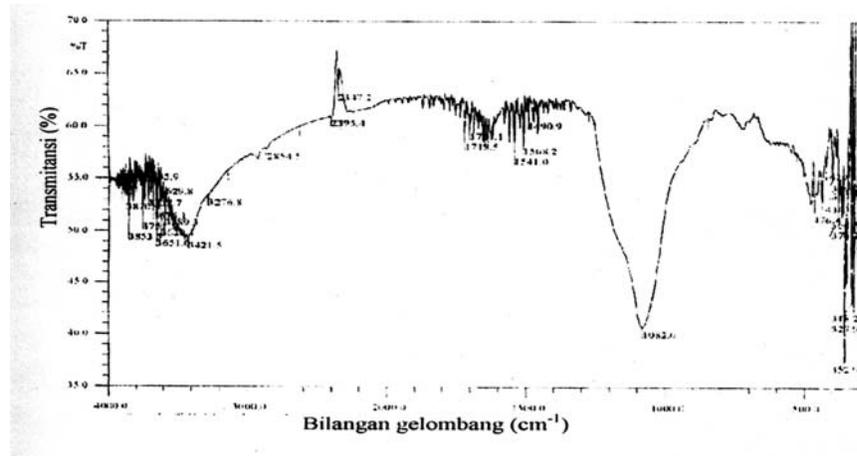
cak spektrum dari cuplikan a-Si:H sehingga tidak mempunyai bentuk struktur kristal. Dengan demikian cuplikan tersebut berstruktur amorf. Hal ini sesuai karena struktur amorf berbentuk acak dan tidak teratur maka tidak muncul puncak-puncak spektrumnya.



Gambar 3. Spektrum cuplikan (a-Si:H)-P yang dianalisa dengan XRD.**Spektrum Infra Merah Dari Cuplikan a-Si:H**

Dari Gambar 4 diperoleh bahwa terdapat puncak-puncak spektrum yang menunjukkan ikatan apa saja yang terdapat pada cuplikan a-Si:H. Spektrum cuplikan dari hasil uji menggunakan infra merah bertujuan untuk mengetahui ikatan-ikatan yang terdapat pada cuplikan. Karakterisasi cuplikan menggunakan spektroskopi inframerah diperoleh gambar spektrum seperti disajikan pada Gambar 4.

Menurut Street, vibrasi regang SiH, SiH₂, dan SiH₃ pada a-Si:H terdapat pada angka gelombang sekitar 1900 cm⁻¹ sampai 2500 cm⁻¹ dari spektrum diatas muncul pada angka gelombang 2347,2 dan 2395,4 cm⁻¹. Sedangkan menurut Siversein bahwa puncak 1000 cm⁻¹ s/d 1110 cm⁻¹ merupakan vibrasi regang dari Si-O yang berasal dari Si-O-Si muncul pada angka gelombang 1082 cm⁻¹.

**Gambar 4 Spektrum infra merah a-Si:H sesudah diimplantasi dengan energi 60 keV, dosis ion $1,3 \times 10^{16}$ ion/cm².****Tabel 1. Puncak Spektrum cuplikan a-Si:H dengan infra merah.**

No.	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	Intensitas %	No.	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	Intensitas %
1.	318,2	42,396	17.	2347,2	63,452
2.	327,9	43,099	18.	2395,4	60,964
3.	337,5	54,184	19.	32854,5	57,776
4.	352,9	37,515	20.	3276,8	53,390
5.	364,5	51,447	21.	3421,5	49,253
6.	376,1	51,487	22.	3589,3	51,464
7.	399,2	54,895	23.	3620,1	52,284
8.	420,5	55,971	24.	3629,8	51,410
9.	434,0	52,907	25.	3651,0	51,116
10.	476,4	52,613	26.	3676,1	52,097
11.	1082,0	40,745	27.	3712,7	53,319
12.	1490,9	60,743	28.	3735,9	52,779
13.	1508,2	58,346	29.	3751,3	52,225
14.	1541,0	58,552	30.	3853,5	51,305

15.	1701,1	59,748	31.	3870,9	52,955
16.	1718,5	59,834	32.	3905,6	52,638

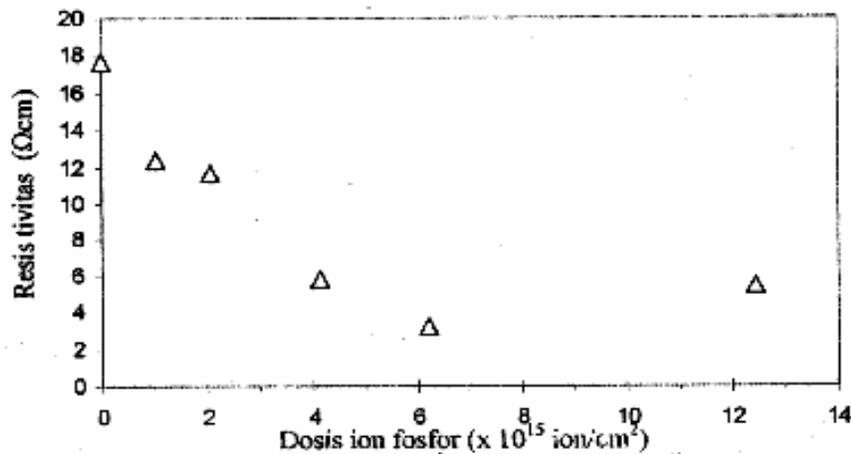
Ikatan fosfor dengan Si muncul pada angka gelombang 420 cm^{-1} , 434 cm^{-1} dan 476 cm^{-1} merupakan vibrasi regang dengan bentuk ikatan Si-P [7]. Pada daerah 1900 cm^{-1} s/d 1500 cm^{-1} merupakan vibrasi regang C-H dan muncul pada angka gelombang 1508 cm^{-1} , 1541 cm^{-1} , 1701 cm^{-1} , dan 1718 cm^{-1} , serta kemungkinan juga pada angka gelombang 1490 cm^{-1} hal ini karena dekat dengan angka gelombang 1500 cm^{-1} [6]. Munculnya ikatan vibrasi regang C-H diakibatkan oleh adanya aseton yang masih tersisa pada cuplikan saat dilakukan pembersihan sebelum dianalisa dengan infra merah. Puncak spektrum diatas angka gelombang 3000 cm^{-1} merupakan vibrasi regang O-H. Adanya puncak spektrum yang tidak diinginkan kemungkinan disebabkan sampel masih mengandung alkohol atau uap air pada saat proses pembersihan substrat.

Dari hasil analisa spektrum a-Si:H fosfor menggunakan infra merah menunjukkan bahwa ion fosfor yang diimplantasikan kedalam a-Si:H telah berhasil. Hal ini ditunjukkan dengan adanya ikatan

P-Si, pada cuplikan a-Si:H yang telah diimplantasi dengan ion fosfor.

Pengaruh Dosis Ion Terhadap Resistivitas Lapisan a-Si:H

Grafik hasil pengukuran resistivitas terhadap perubahan dosis ion dengan energi tetap disajikan pada Gambar 5. Dari Gambar 5 menunjukkan bahwa penambahan ketidakmurnian ion fosfor mengakibatkan nilai resistivitas sampel a-Si:H mengalami perubahan. Hal ini mengindikasikan bahwa ion-ion fosfor telah berikatan dengan atom Si dan menciptakan aras donor. Dengan adanya aras donor baru maka daerah terlarang akan menyempit sehingga energi gap makin kecil. Energi gap kecil maka kebolehdjian elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi semakin besar, sehingga resistivitas semakin kecil. Resistivitas terkecil diperoleh pada dosis $6,21 \times 10^{15}$ ion/ cm^2 dengan nilai sebesar $2,42 \times 10^{-1} \Omega \text{ cm}$.



Gambar 5. Grafik pengaruh dosis ion terhadap resistivitas a-Si:H P pada energi 60 keV.

Pengaruh Energi Ion Terhadap Resistivitas Lapisan a-Si:H

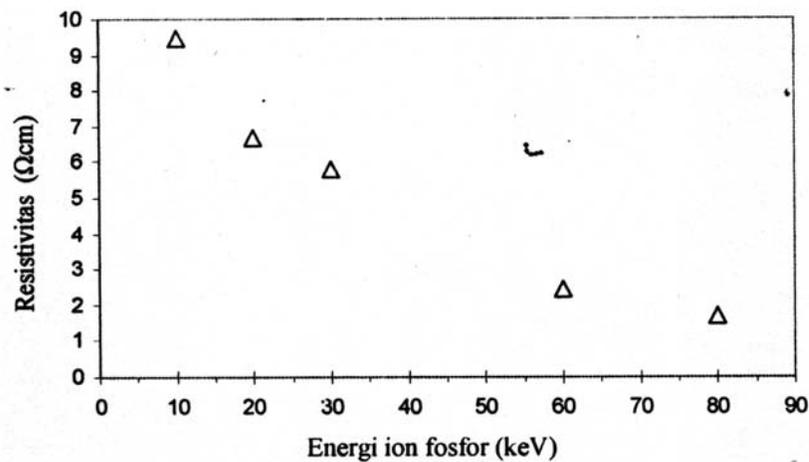
Implantasi ion fosfor terhadap a-Si:H dilakukan dengan variasi dosis dengan energi tetap dan variasi energi dengan dosis tetap. Gambar 6 menunjukkan bahwa pengaruh penambahan energi ion fosfor pada dosis ion tetap ternyata resistivitasnya akan berkurang. Energi ion semakin

besar maka kemampuan ion fosfor menembus lapisan tipis a-Si:H semakin dalam. Penetrasi ion fosfor semakin dalam akan mengurangi cacat pada a-Si:H. Berkurangnya cacat (*dagling bond*) a-Si:H maka struktur kristalnya akan lebih baik sehingga sifat listriknya menjadi lebih baik. Sifat listrik lebih baik maka resistivitas lapisan tipis berkurang. Hal ini sesuai dengan hasil yang diperoleh dimana kedalaman penetrasi ion fosfor berbanding langsung

dengan energi ion dopan. Pemberian ion fosfor pada a-Si:H menyebabkan terjadinya perubahan nilai resistivitas. Hal ini disebabkan karena tingkat aseptor pada keadaan dangkal (*shallow states*) di atas pita valensi. Aseptor pada keadaan dangkal diperluas oleh ketidak teraturan pada a-Si:H dan membentuk pita tumpang tindih dengan ekor pita valensi.

Sebagian pengotor fosfor merupakan pengotor berkoordinasi empat ikatan (*four fold dopan*) yang akan memperoleh elektron dari pita valensi seperti aseptor pada semikonduktor kristal, akan tetapi rapat keadaan pengotor berkoordinasi empat ikatan sangat kecil. Sebagian proses pengotoran melibatkan rapat keadaan cacat yang

berada pada tengah celah pita energi. Tingkat aseptor diatas pita valensi akan menerima elektron dari cacat ikatan kosong. Transfer elektron tersebut akan mengubah kesetimbangan jumlah elektron pada keadaan cacat sehingga ikatan kosong akan bermuatan positif D_+ . Kesetimbangan kedudukan elektron pada keadaan cacat dapat tercapai melalui eksitasi elektron dari pita valensi menuju ke keadaan cacat sehingga keadaan muatannya akan netral. Eksitasi elektron akan menyebabkan lubang pada pita valensi. Posisi lubang pada pita valensi menghasilkan mobilitas lubang yang relatif tinggi sehingga mengakibatkan sebagai penghantar listrik. Hal tersebut mengakibatkan konduktivitas a-Si:H meningkat dan sebaliknya resistivitas menurun^[1, 4, 5].



Gambar 6. Pengaruh energi ion terhadap resistivitas pada dosis ion $6,21 \times 10^{15}$ ion/cm².

Pada Gambar 6 menunjukkan hubungan antara energi ion fosfor dengan resistivitas, makin besar energi ion maka makin kecil resistivitasnya. Resistivitas (a-Si:H)-P minimum diperoleh pada energi 60 keV yaitu sebesar $1,713 \times 10^{-1}$ ohm cm. Hal ini disebabkan karena dengan meningkatnya energi ion maka penetrasi ion ke dalam a-Si:H semakin dalam. Ion dengan energi rendah memiliki kedalaman penetrasi yang dangkal sehingga terkonsentrasi pada daerah permukaan a-Si:H.

Untuk dosis yang sama, peningkatan energi ion menyebabkan ion menembus lapisan a-Si:H lebih dalam dibanding ion berenergi rendah. Hal ini menyebabkan tumpang tindihnya kerusakan akibat dosis yang besar pada ion yang berenergi tinggi tidak sebesar yang berenergi rendah. Ion berenergi

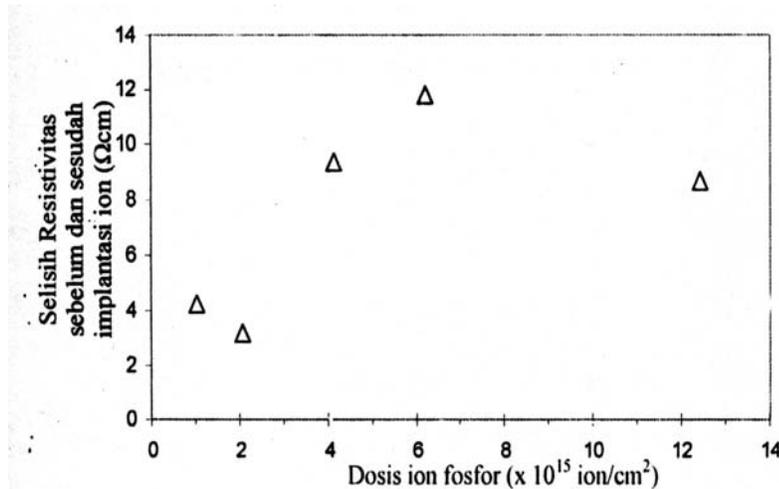
tinggi akan mempunyai jangkauan penetrasi yang lebih dalam di dalam bahan, akibatnya untuk dosis yang

sama pada ion yang berenergi tinggi menyebabkan perubahan resistivitas yang lebih besar dibanding ion berenergi rendah.

Ion berenergi rendah mempunyai penetrasi dangkal, sehingga ion dopan terkonsentrasi di lapisan permukaan dan terbatas pada volume tertentu. Menurut Dearnely (1973) distribusi kerusakan radiasi berada dekat permukaan lapisan dibandingkan dengan posisi yang lebih dalam. Kerusakan radiasi dapat mengakibatkan sebagian dopan tidak bersifat aktif sehingga perubahan nilai resistivitas lebih kecil dibanding ion berenergi tinggi. Hal ini sesuai dengan hasil yang ditunjukkan

pada Gambar 7. Dari Gambar 7 dapat disimpulkan bahwa perubahan resistivitas maksimum terjadi

pada energi ion 60 keV yaitu sebesar $13,090 + 0,047$ ohm cm.



Gambar 7. Grafik pengaruh dosis terhadap perubahan resistivitas a-Si:H P pada energi 60 keV.

Pengambilan terhadap cuplikan a-Si:H terimplantasi dengan variasi dosis dan energi memberikan akibat yang sama yaitu adanya penurunan nilai resistivitas. Hal ini disebabkan karena semakin teraturannya atom-atom di dalam cuplikan^[5].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa data maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Ketebalan maksimum diperoleh pada tekanan vacuum $1,3 \times 10^{-1}$ mbar, tegangan 2 kV, arus 45 mA, waktu deposisi 1 jam dan jarak elektrode 1,9 cm sebesar 684 nm.
2. Dari analisa spektrum inframerah menunjukkan ikatan Si-H pada a-Si:H sebelum diimplantasi dengan ion fosfor terjadi pada bilangan SiH, SiH₂, dan SiH₃ pada a-Si:H pada angka gelombang 2347,2 dan 2395,4 cm⁻¹. Sedangkan pada angka gelombang 1082 cm⁻¹ merupakan vibrasi regang dari Si-O yang berasal dari Si-O-Si. Ikatan fosfor dengan Si muncul pada angka gelombang 420 cm⁻¹, 434 cm⁻¹ dan 476 cm⁻¹ merupakan vibrasi regang dengan bentuk ikatan Si-P. Pada daerah 1900 cm⁻¹ s/d 1500 cm⁻¹ merupakan vibrasi regang C-H dan muncul pada angka gelombang 1508 cm⁻¹, 1541 cm⁻¹, 1701

cm⁻¹, dan 1718 cm⁻¹. Puncak spektrum diatas angka gelombang 3000 cm⁻¹ merupakan vibrasi regang O-H. Dengan analisa infra merah menunjukkan bahwa ion fosfor telah terimplantasi pada a-Si:H.

3. Besarnya dosis dan energi ion berpengaruh terhadap penurunan resistivitas a-Si:H. Resistivitas a-Si:H minimum $1,713 \times 10^{-1}$ ohm cm diperoleh pada energi 60 keV, dosis $6,21 \times 10^{15}$ ion/cm².
4. Dari hasil analisa diatas menunjukkan bahwa parameter deposisi dan pemberian dopan sangat berpengaruh pada sifat listrik dan optik lapisan tipis yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami tujukan kepada Sdr. Al. Sunarto, Sumarmo, dan Mujiono dari staf bidang akselerator, serta Joko Ristanto dari FMIPA UNS yang telah banyak membantu penelitian ini, sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar dan berhasil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] MATSUDA, A., *Amorphous Silicon From Glow Discharge Plasma*, Proceeding Inter-

- national Workshop on The Physics Material, Universitas Indonesia, Jakarta, 1998.
- [2] NOERDIN, D., *Elusidasi Struktur Senyawa Organik Dengan Cara Spektroskopi Ultra-lembayung dan Inframerah*, Penerbit Angkasa Bandung, 1985.
- [3] RYSEL, H., RUGE, I., *Ion implantation*, John Wiley and Son, New York, 1996.
- [4] STREET, RA., *Hydrogenated Amorphous Silicon*, Cambridge Solid State University Press, Cambridge, 1991.
- [5] H. RINNERT, M VERGNAT., *Influence of the Subtract Temperature on the Structure and the Optical Properties of Amorphous Si:H Thin Film Prepared by Reactive Evaporation*, Thin Solid Film 403-404, 2002.
- [6] SILVERSTEIN, BARSLER AND MORRIL., *Spectrometric Identivication of Organic Compounds*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [7] CLARA D, CRAVER, *Desk Book of Infrared Spectra*, Second Edition, Coblentz Society Inc, Kirkwood USA, 1986.
- [8] DEARNELEY G, FREEMAN JH, NELSEN RS SREPHEN, *Ion Implantation*, North Holland Publishing Company Inc, New York, 1973.

TANYA JAWAB

Trimardji A.

- Pada skema DC-sputtering, mana yang diground-kan, katoda atau anoda?
- Untuk mengukur resistansi digunakan metode four point probe atau hanya multimeter biasa?
- Apa aplikasi dari penelitian ini?
- Sebenarnya yang penting bukan selisih resistivitas, tetapi perubahan persentase.

Agus Santoso

- Pada DC-sputtering yang digroundkan adalah anodanya.
- Untuk mengukur resistansi digunakan metode four point probe.
- Aplikasi penelitian ini adalah sebagai bahan dasar sel surya.
- Saran kami terima.

Hidayati

- Mohon penjelasan bahwa spektrum UV-Vis bisa digunakan untuk analisis tebal lapisan suatu padatan setahu saya UV-vis digunakan untuk analisis bentuk cair.

Agus Santoso

- Dari spektrum UV-Vis dapat dihitung indeks bias, dihitung dengan persamaan (1). Dari hasil persamaan (1) dimasukan kedalam persamaan (2) maka akan diperoleh ketebalan lapisan.