

## KEMUNGKINAN PENGGUNAAN REAKTOR TRIGA MARK II UNTUK IRADIASI SILIKON

Arlinah K\*, Teuku Alfa\*\*, Dede Sofia W\*\*, Apriswati\*\*, Wawan Handiaga\*\*, Asikin\*\*, Ahlar  
Oemri, Muchyar

\* Pusat Reaktor Serba Guna - Badan Tenaga Atom Nasional

\*\* Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

\*\*\* P3FT - Badan Tenaga Atom Nasional

### ABSTRAK

KEMUNGKINAN PENGGUNAAN REAKTOR TRIGA MARK II UNTUK IRADIASI SILIKON. Penggunaan fluks neutron dari reaktor penelitian untuk memproduksi semi-konduktor telah dilakukan banyak orang. Iradiasi silikon, biasa disebut Si doping, dapat dilakukan pada reaktor daya menengah seperti reaktor TRIGA Bandung. Penelitian pada reaktor ini terutama didorong oleh keinginan untuk mengembangkan penelitian terapan di PPTN. Semikonduktor silikon ekstrinsik adalah silikon yang mengandung pengotor (impurities). Jika doping dilakukan dengan neutron, terbentuk fosfor  $^{31}\text{P}$  yang menyebabkan silikon menjadi semi-konduktor tipe-n. Reaksi yang terjadi adalah:  $^{30}\text{Si} (n, \gamma) \text{Si}^{31} \longrightarrow ^{31}\text{P} + \beta$  dengan waktu paruh 2,62 jam. Pertambahan pengotor ini akan mengubah resistivitas cuplikan. Umumnya resistivitas yang diinginkan adalah  $\rho$  awal  $> 10$ . Penelitian tahun pertama bertujuan mencari lokasi iradiasi yang menghasilkan resistivitas yang homogen. Cuplikan telah diiradiasi pada beberapa fasilitas iradiasi yaitu di atas Lazy Susan, di atas reflektor yang paling dekat dengan Lazy Susan, dan di Beamport Neutron Radiografi. Hasil pengukuran resistivitas menunjukkan bahwa fasilitas di atas Lazy Susan, mempunyai fluks termal yang cukup tinggi dan distribusi yang cukup homogen.

### ABSTRACT

THE POSSIBILITY USING OF TRIGA MARK II REACTOR FOR SILICON IRRADIATION. The use of neutron flux from research reactors for semiconductor production have been described in many papers. Silicon irradiation, commonly called as Si-doping, can be done in the intermediate-power research reactor, such as TRIGA REACTOR. The research in this reactor has the purpose to enhance the applied research in RCNT. Extrinsic Si-semiconductor is silicon with impurities in the neutron doping, impurities  $^{31}\text{P}$  change pure silicon to n-type semiconductor according to reaction:  $^{30}\text{Si} (n, \gamma) \text{Si}^{31} \longrightarrow ^{31}\text{P} + \beta$  with the half life 2.62 hours. This impurities will change the resistivity of the sample, generally, the desired resistivity is  $> 10$ . The purpose of this preliminary research is to determine the position in the reactor, where the resistivity is homogen. The samples have been irradiated in the facilities above Lazy Susan: above reflector nearest to Lazy Susan and on the Neutron Radiography Beamport. The results show that the facility above Lazy Susan has high and homogeneously distributed thermal flux.

### PENDAHULUAN

Tulisan Ramakrishnan yang dimuat di dalam Advance in Materials Technology Monitor [1], memperlihatkan bahwa transisi dari ekonomi metal menuju ekonomi material baru saat ini sedang berlangsung. Silikon termasuk pada golongan material baru. Industri seperti industri elektronika teknologi tinggi dan industri informasi dan peralatan yang sangat tinggi presisinya, membutuhkan material baru dengan karakteristik densitas tinggi, kecepatan tinggi dan ukuran kecil [2].

Material baru, contohnya, semikonduktor sangat luas penggunaannya antara lain VLSI,

USSI, AQUID dan sensor yang merupakan bagian dari peralatan kedokteran, peralatan elektronik untuk keperluan rumah tangga, sensor robot komunikasi (optik) dan alat pemantau lingkungan.

Penggunaan fluks neutron dari reaktor penelitian untuk memproduksi material baru (semikonduktor) telah dilaporkan dan dipublikasikan [3,4,5,6,7,8, 9,10]. Proses iradiasi material tersebut, menggunakan neutron, dapat meningkatkan sifat fisiknya. Iradiasi Si untuk memperoleh sifat yang lebih baik selanjutnya disebut Silikon doping dengan neutron, dising-

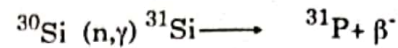
kat NTD, telah dimulai tahun 1970. Metode ini dapat memperbaiki kekurangan sifat doping secara konvensional yaitu dari segi homogenitas. Selain reaktor dengan fluks tinggi, NTD dilakukan pula dengan reaktor TRIGA Mark II [3].

Beberapa hal dapat disebutkan sebagai dorongan untuk melakukan penelitian NTD di TRIGA Mark II Bandung (PPTN). Pertama, perlu dikembangkan kegiatan penelitian di PPTN yang mengarah pada penelitian terapan. Reaktor TRIGA Mark II Bandung menyajikan dukungan dari segi fluks termal (orde  $10^{12}$  neutron/cm<sup>2</sup> detik) dari tempat iradiasi (dataran Lazy Susan) dan dari segi waktu iradiasi (bersamaan dengan iradiasi U<sup>235</sup>, jika ini masih berlanjut). Tentu saja skala produksi tidak ekonomis jika hanya dioperasikan untuk NTD saja. Penelitian yang direncanakan dua tahun dan dimulai 1991/1992 ini mempunyai tujuan meningkatkan daya guna reaktor TRIGA Mark II Bandung dan sasaran tahun 1991/1992 adalah karakterisasi cuplikan awal, berkas neutron dan karakterisasi cuplikan akhir secara kualitatif. Dari segi kualitas berkas neutron di dataran LS (Lazy Susan), dapat dikatakan baik dan hasil pengukuran resistivitas cuplikan sesudah diiradiasi memberi gambaran waktu iradiasi yang diperlukan panjang.

## TEORI

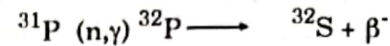
Silikon dalam bentuk semikonduktor intrinsik, berarti sifat konduktivitas listriknya masih murni ditentukan oleh konduktivitas pribadinya. Pembawa arus (current carriers) adalah elektron pada pita konduksi (conduction band) dan lubang (hole) pada pita valensi (valence band).

Semikonduktor silikon ekstrinsik adalah silikon yang mengandung pengotor (impurities) jika doping dilakukan dengan neutron, terbentuk fosfor <sup>31</sup>P yang menyebabkan silikon menjadi semikonduktor tipe-n. Sehingga di sini pembawa arus utama (majority current carriers) adalah elektron. Terdapat perbedaan jumlah pembawa arus pada Si- intrinsik [Si-i] dan Si-ekstrinsik [Si-e]. Sebagai contoh [11], pada 300 K, [Si-i] mengandung  $1,5 \times 10^{16}$  carriers/m<sup>3</sup> dan [Si-e] mengandung  $10^{21}$  carriers/m<sup>3</sup>. Proses doping dapat dilakukan selain dengan neutron, juga dengan difusi dan implementasi ion. Pilihan doping dengan neutron memberi keuntungan dari segi homogenitas. Iradiasi silikon dapat menaikkan jumlah fosfor di dalam cuplikan sampai pada harga  $\rho$  (resistivitas) yang diinginkan. Reaksi yang terjadi :



$$T_{act} = 2,62 \text{ jam.}$$

Ada reaksi samping yang merugikan yaitu:



$$T_{act} = 14,3 \text{ hari.}$$

Karena yang dituju adalah perubahan inti <sup>30</sup>Si menjadi <sup>31</sup>P maka kondisi awal cuplikan harus benar-benar diketahui secara tepat. Dalam penelitian ini secara kualitatif dilakukan pengamatan  $\rho_{awal}$  ( $\rho_{aw}$ ) yaitu resistivitas sebelum iradiasi dan  $\rho_{akhir}$  ( $\rho_{ak}$ ) yaitu resistivitas sesudah iradiasi. Resistivitas adalah kebalikan dari konduktivitas. Umumnya ketepatan yang

diinginkan adalah  $\frac{\rho_{aw}}{\rho_{ak}} > 10$ .

Jadi dengan doping neutron diinginkan  $\rho$  menjadi sekecil mungkin.

Berkas neutron yang tiba pada silikon perlu diperhatikan kualitasnya. Ini meliputi distribusi fluks termal sepanjang cuplikan, spektrum neutron serta perbandingan antara fluks termal dengan neutron cepat. Spektrum dengan bagian termal tinggi sangat diinginkan untuk mengurangi kerusakan akibat radiasi neutron cepat.

## BAHAN DAN PERALATAN

### Bahan

Silikon ingot (Si-intrinsik) yang digunakan sangat terbatas dan merupakan sumbangan dari Shin Etsu (Jepang). Demikian juga Silikon wafer, merupakan sumbangan mereka, karena sulit diperoleh di Indonesia. Bahan-bahan yang dipakai tersebut adalah: ingot dengan spesifikasi: intrinsik,  $\rho_{aw} = 3000$  Ohm-cm, bidang [1,1,1], kristal tunggal diameter 5 cm, wafer dengan spesifikasi: tipe P, F.2 (float zone), tebal 200  $\mu$ , diameter 50 mm,  $\rho_{aw}$  tidak diberikan, keping aktivasi untuk mengukur fluks dan spektrum. Untuk fluks neutron termal dipergunakan keping emas dan pembungkus kadmium, sedangkan untuk spektrum memakai keping-keping Al, Ti, Ni dan Cu.

### Peralatan

Peralatan yang digunakan adalah: reaktor TRIGA Mark II Bandung untuk iradiasi, tungku untuk annealing, four pin probe untuk mengukur  $\rho$ , P. C. A untuk mencacah keping, paket program Stay'SL untuk analisis spektrum,

SPND untuk memetakan fluks dalam arah vertikal.

## TATA KERJA

### Karakteristik berkas neutron

Dengan menggunakan keping emas  $^{197}\text{Au}$  dan reaksi  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$  dihitung fluks neutron di beberapa lokasi di dataran LS dan kemudian dipilih tempat yang memenuhi syarat fluks termal dengan orde  $> 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> detik. Pada pengukuran ini diperoleh pula harga pembandingan kadmium dan indeks epitermisnya. Self Powered Neutron Detector (SPND) digunakan untuk memetakan distribusi fluks termal ke arah vertikal pada lokasi yang ditentukan.

Beberapa keping ambang digunakan untuk memetakan spektrum di tempat tersebut dan analisisnya dilakukan dengan paket program Stay'SL, setelah dilakukan pencacahan dengan PCA.

### Karakteristik cuplikan

Pada tahap ini, karakteristik cuplikan baru dilakukan secara kualitatif dengan menggunakan pengukur resistivitas, yang disebut four pin probe, merek Veeco yaitu FPP 5000 dan FPP 1000 milik RSG dan milik LSDE / BPIS-Micro Electronic. Pada dasarnya alat ini bekerja dengan prinsip [12] adanya aliran arus diantara 2 sensor (probe) terluar dari FPP dan tegangan timbul pada permukaan silikon dan diukur oleh 2 sensor di tengah. Dengan asumsi cuplikan tipis dan cuplikan luas  $\rho_{sh}$  (resistivitas sheet) dapat dituliskan sebagai  $\rho_{sh} = (n/\ln 2) V/I = 4, 5324 V/I$ .  $V =$  tegangan,  $I =$  arus. Dan  $\rho_{sl}$  ( $\rho_{slice}$ ) didefinisikan sebagai  $\rho_{sh} \cdot x$  tebal. Dalam makalah ini  $\rho_{ak}$  dan  $\rho_{aw}$  adalah  $\rho_{sl}$ .

### Iradiasi Si

Setelah diukur  $\rho_{aw}$  maka dilakukan iradiasi Si. (Si harus dalam keadaan bersih). Untuk melakukan hal ini perlu dibuat wadah (container). Wadah dari Al yang murni dibuat untuk diletakkan di atas dataran LS. Beberapa wafer diradiasi dengan maksud mempelajari teknik iradiasi dan teknik pengukuran. Wadah diikat secara sederhana dengan kawat yang ujungnya dipegang tetap di atas tanki reaktor. Waktu iradiasi mengikuti jadwal iradiasi U, yaitu selama tujuh hari (7 x 24 jam). Selain itu dicoba pula iradiasi di Beamport untuk dua masa periode iradiasi. Dalam tahap ini, perhatian utama adalah perubahan reaktivitas. Pengukuran konstanta reaktor untuk menetapkan waktu iradiasi yang optimum akan dilakukan pada tahun yang berikutnya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap penelitian untuk tahun pertama ini meliputi, persiapan dan karakterisasi cuplikan pengukuran fluks dan spektrum dilokasi iradiasi, iradiasi ingot dan wafer serta karakterisasi-nya. Hasil yang diperoleh masing-masing dibahas pada sub-sub berikut.

### Persiapan dan karakterisasi cuplikan

Cuplikan silikon intrinsik, sulit diperoleh di Indonesia. Karenanya bantuan dari Jepang (Shin Etsu Hondotai Co Ltd) sangat berguna, karena jika tidak demikian penelitian sulit dilaksanakan. Mempersiapkan cuplikan untuk diradiasi, tidak mudah, mengingat PPTN tidak memiliki four pin probe, yaitu alat pengukur resistivitas untuk cuplikan intrinsik maupun ekstrinsik. Usaha untuk meminjam alat tersebut cukup memakan waktu, misalnya saja, four pin probe yang ada di P<sub>3</sub>FT, ketergantungan pengukuran pada tekanan tangan pengukur masih sangat besar. FPP-1000 yang ada di LSDE, tidak dapat mengukur Si-ingot yang paling ideal adalah FPP-5000 yang ada di RSG. Alat ini (FPP-5000) baru diketahui keberadaannya bulan Januari 1992. Jadi problem memperoleh alat yang baik telah menyita banyak waktu. Mengingat  $\rho_{aw}$  dari Si-ingot maupun Si-wafer yang diberikan Shin Etsu, tidak disebutkan secara jelas, maka perlu dilakukan pengukuran  $\rho_{aw}$  tersebut. Selain itu  $\rho_{aw}$  dan  $\rho_{ak}$  harus diukur dengan alat yang sama agar mendapatkan interpretasi yang baik dan diyakini. Pada Tabel 1 ditampilkan hasil pengukuran *shine resistivity* ( $\rho_{sh}$ ) untuk cuplikan yang belum diradiasi.

Hasil pada Tabel 1 dan 2 menunjukkan bahwa cuplikan awal sebelum diradiasi, cukup homogen, ingot masih intrinsik dan wafer telah didoping menjadi tipe P, meskipun tidak perlu diketahui metode doping apa yang digunakan.

### Pengukuran fluks termal, fluks cepat dan spektrum neutron.

Metode aktivasi telah biasa digunakan di PPTN, untuk mengukur fluks neutron. Untuk fluks termal digunakan keping emas, sedangkan fluks cepat diukur dengan keping Al. Spektrum neutron diukur dengan meradiasi keping aktivasi : Al, Ti, Ni, dan Cu. Hasilnya ditampilkan pada Tabel 3 berikut ini.

Sebelum lokasi LB dipilih, telah pula dilakukan pengukuran di atas reflektor yang paling dekat dengan Lazy Susan. Lokasi ini sebenarnya menarik dari segi banyaknya fluks termal ( $R_{cd}$ ) dibanding yang lain. Tabel 4 menunjuk-

Tabel 1. Hasil pengukuran  $\rho_{aw}$  cuplikan sebelum diradiasi

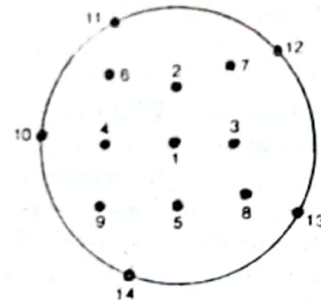
Jenis Cuplikan	No. Cuplikan	Sifat	$\rho_{aw}$ rata-rata [Ohm-cm]	V/I [Ohm]
Ingot	1	Intrinsik	3000	
Wafer	I	P	(*)	44,90
Wafer	II	P	(*)	46,45
Wafer	III	P	(*)	44,77
Wafer	IV	P	(*)	45,18
Wafer	V	P	(*)	45,15
Wafer	1	P	0,56	48,60
Wafer	2	P	0,55	47,50
Wafer	3	P	0,54	50,10
Wafer	4	P	0,55	47,40

Catatan :

\* Pada saat itu pengukur hanya mampu membaca V/I karena alat sederhana. Untuk melihat homogenitas cuplikan di seluruh permukaan, untuk cuplikan I, II, III, IV, V, VI dan VII dilakukan pemetaan yang hasilnya tertera pada Tabel 2 (diambil sebagai contoh adalah cuplikan V, cuplikan lain setara).

Tabel 2. Homogenitas Cuplikan.

Titik ke	V/I [Ohm]
1	44,7
2	45,1
3	45,2
4	44,9
5	45,5
6	45,9
7	44,9
8	45,3
9	45,1
10	45,9
11	44,7
12	44,8
13	45,1
14	45,1



Catatan :

Pengukuran diambil acak di seluruh permukaan wafer, mulai tinggi terdapat pada pinggir wafer.

Tabel 3 : Hasil fluks neutron termal dan fluks neutron cepat pada lokasi Si doping yang terpilih

$\Phi_{cepat}$ (n/cm <sup>2</sup> -det.)	$\Phi_{termal}$ (n/cm <sup>2</sup> -det.)	$R_{cd}$	Indeks epitermis
$4,576 \times 10^8$	$1,95 \times 10^{12}$	6	0,0234

Catatan:

[\*] dikonversikan pada 1 Mw. Lokasi ini diberi nama LB.

kan hasil pengukuran fluks termal reflektor (di atas dataran reflektor).

Lokasi pada reflektor sangat menarik dari segi  $R_{cd}$  yang besar dibanding dataran LS. Tetapi fluksnya rendah, sehingga tidak dipilih untuk lokasi penelitian. Spektrum neutron pada lokasi ini terpilih diukur dengan metode aktivasi ke-ping ambang dan hasil cacahan dengan PCA dimasukkan sebagai masukan untuk program Stay'SL yang dapat memetakan fluks neutron sebagai fungsi energi (spektrum). Gambar 1 berikut menunjukkan hasil pengukuran spektrum.

Tabel 4 : Karakteristik fluks neutron termal pada reflektor untuk daya 1 MW.

Tempat	$\Phi \times 10^{11}$ (n/cm <sup>2</sup> -det.)	R <sub>cd</sub>	Indeks epitermis
Reflektor Timur	3,88	21	0,006
Reflektor Selatan	6,65	13	0,009
Reflektor Barat	4,66	16	0,008
Reflektor Utara	6,03	16	0,008

Hasil iradiasi Si-ingot dan Si-wafer dan karakterisasinya.

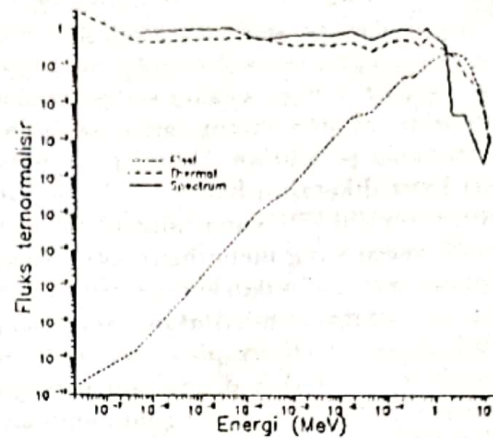
Sebelum dilakukan iradiasi dengan cuplikan pada Tabel 1, dilakukan iradiasi cuplikan sejenis yang dimaksudkan untuk melihat apakah memang benar lokasi LB dapat menghasilkan perubahan resistivitas. Hal ini mengingat harga wafer bila sampai di Indonesia setelah melalui rekanan, dapat berkisar dari 40 ribu rupiah sampai 50 ribu rupiah tiap satu wafer dengan resistivitas sekitar 10 Ohm-cm dan tebal 200 $\mu$ . Beberapa wafer iradiasinya dinilai gagal karena terendam air. Teknik iradiasinya kemudian diperbaiki. Iradiasi Si-ingot dengan diameter 5 inci tidak dapat dilakukan di LB. Karenanya dicoba di Beamport Neutron Radiografi dengan waktu iradiasi dua periode melalui masa *shut down* 4 (empat) hari. Berkas neutron di

Tabel 5 : Hasil iradiasi Si-ingot di B.P. Neutron radiografi [\*]

Titik ukur	$\rho_{ak}$ [Ohm-cm]	Jenis	$\rho_{aw}/\rho_{ak}$
1	474	N	6,329
2	466	N	6,437
3	453	N	6,622
4	462	N	6,493
5	472	N	6,355
6	533	N	5,628
7	556	N	5,395
8	554	N	5,415
9	354	N	8,474
10	362	N	8,287
11	375	N	8,000

Catatan:

[\*] Karakteristik berkas neutron di beamport neutron radiografi telah diukur dan dapat dilihat pada pustaka 13.

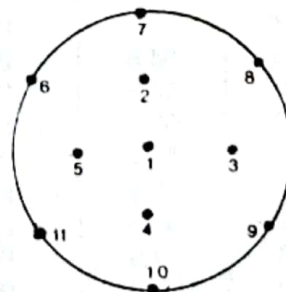


Gambar 1 : Spektrum pada lokasi LB

sini tidak homogen, maka hasilnya dapat dibayangkan tidak homogen pula. Tetapi tujuan iradiasi di sini lebih ditekankan pada perubahan  $\rho$  yang terjadi.

Tabel 5 menunjukkan hasil iradiasi di beamport.

Apa yang diperoleh dengan radiasi Si di beamport tentu saja masih di bawah standar kualitas yang diinginkan dari suatu pekerjaan doping, yaitu perbandingan  $\rho_{aw}/\rho_{ak}$  masih di bawah nilai 10. Iradiasi Si-wafer yang pertama dilakukan, adalah untuk menguji apakah teknik iradiasi dan teknik pengukuran cukup



dapat diandalkan. Penggunaan alat FPP (four pin probe) untuk mengukur resistivitas, ada segi kelemahannya terutama untuk alat yang tidak mempunyai monitor terhadap gaya tekan yang diberikan sehingga timbul kontak antara pin dengan permukaan wafer. Empat buah pengukuran yang pertama memberikan pengalaman ini dan cukup menyita bulan-bulan pertama penelitian. Tetapi pada bulan Januari baru diketahui bahwa RSG Serpong ternyata memiliki FPP yang sangat baik yaitu FPP-5000-Veeeco yang memungkinkan dilakukan pengukuran wafer dan lempeng ingot yang cukup tebal (sekitar 2 cm). Alat ini dapat mengukur  $V/I$ , *sheet resistivity*, *slice resistivity*, tebal, dan tipe wafer dan dilengkapi petunjuk serta penampil kesalahan yang mungkin ada, selama pengukuran berlangsung, misalnya jika gaya tekan pada pin kurang, maka alat menunjuk tampilan "salah". Tabel 6 menunjukkan hasil pengukuran resistivitas dari wafer II dan III yang telah diradiasi dan dilakukan *anneal* untuk menghilangkan akibat penyinaran spektrum cepat.

Tabel 6 menunjukkan bahwa iradiasi wafer dengan teknik yang sederhana (diletakkan di atas dataran LS tanpa diputar, cukup memberikan homogenitas yang baik. Fasilitas iradiasi Si di RSG-GAS Serpong, khusus dibuat dengan putaran 2 rpm.

Pada Tabel 6 juga ditunjukkan hal yang berlawanan dengan iradiasi Si-ingot pada Tabel 5. Tujuan Si-doping umumnya adalah menurunkan

Tabel 6 : Resistivitas ( $V/I$  ohm) untuk cuplikan II dan III.

Titik	$V/I$ [Ohm]		Tipe
	II	III	
1	47,2	54,7	P
2	47,6	54,8	P
3	48,3	55,8	P
4	47,0	56,0	P
5	47,2	55,2	P
6	47,5	55,8	P
7	47,1	55,8	P
8	47,3	54,6	P
9	47,3	55,3	P
10	48,6	55,4	P
11	47,0	55,6	P
12	47,2	55,3	P
13	47,9	54,5	P
14	48,1	55,7	P

kan nilai resistivitas. Tetapi yang diperoleh dengan iradiasi wafer (yang memang telah didop menjadi tipe P), justru menaikkan resistivitas. Ini berarti dop-an negatif yang terjadi di dalam wafer berkurang karena iradiasi. Tendensinya, makin lama iradiasi (cuplikan II diradiasi lebih lama) akan makin menghilangkan sifat ekstrinsiknya dan kemungkinan akan terjadi Si-intrinsik, untuk selanjutnya jika dilakukan iradiasi terus menerus, maka dopan  $^{31}\text{P}$  akan muncul kembali untuk membawa cuplikan ke arah ekstrinsik lagi.

### KESIMPULAN

Penelitian Si-doping menggunakan Triga Mark II, direncanakan dalam dua tahun anggaran yaitu 1991-1992 dan 1992-1993. Berkas yang dimanfaatkan adalah berkas neutron yang selama ini tidak digunakan, yaitu di atas dataran LS, yang diberi nama lokasi L. Untuk melakukan doping dengan berkas neutron, dalam tahun pertama ini telah dicapai sarannya, yaitu memastikan bahwa ada lokasi yang memenuhi syarat doping dengan neutron, karakteristik berkas neutron cocok untuk iradiasi, dan teknik iradiasinya cukup sederhana.

Telah ditunjukkan bahwa  $\Phi_{th}$  mencapai  $1,95 \times 10^{12} \frac{n}{\text{cm}^2 - \text{detik}}$ ,  $R_{cd} = 6$ ,  $\Phi_{cepat} = 4,57 \times$

$10^8$  sehingga  $\frac{\Phi_{th}}{\Phi_{cepat}} \gg$  (syarat yang direkomen-

dasikan IAEA). Homogenitas berkas yang tiba pada cuplikan juga cukup baik seperti yang tersirat pada Tabel 6.

Dari segi teknik pengukuran resistivitas, FPP 5000-Veeeco milik PRSG menjanjikan teknik yang dapat diandalkan.

Selanjutnya pada tahun mendatang penelitian akan dititik beratkan pada penentuan konstanta iradiasi reaktor TRIGA Mark II, yaitu suatu besaran yang menghubungkan *fluence* [ $n/\text{cm}^2$ ] dengan resistivitas. Selain itu perlu diperoleh peta waktu iradiasi ( $t$ ) yang cocok untuk setiap kebutuhan pencapaian nilai resistivitas yang dikehendaki.

Selanjutnya perlu pula lebih dirinci penelitian yang menyangkut kuantitas dari dopan ( $^{31}\text{P}$ ) yang terjadi pada saat doping dilakukan di samping perubahan secara kualitatif yang telah terlihat.

### SARAN

Penelitian ini perlu sekali mendapat dukungan dari segi pengadaan Si intrinsik, dan

desain wadah yang lebih efisien, jika tujuan untuk memasarkan berkas neutron yang saat ini praktis tak tercapai ingin dicapai. Dari segi ilmu bahan dukungan grup Sain Materi P<sub>3</sub>FT perlu lebih ditingkatkan.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih untuk bantuan yang diberikan oleh teknisi Lab Mikroelektronika (LEN-BPIS), PAU-ITB, LSDE dan Bidang Teknologi Reaktor PRSG sehingga pengukuran resistivitas dapat dilakukan, dengan demikian mendukung penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Ramakrishnan, P., Advanced materials and development, How Asia carment the challage Advance in Materials Technology Monitor 16, (January 1990), 16 - 80.
2. Chunghee Rhee, Status and Prospects of New Materials Technology in Korea, Application and Development Strategies, Ibid, 19-43.
3. Dimic, V., Neutron transmutation doping of silicon in 250 kW TRIGA Reactor in Ljubljana, IAEA-TECDOC 456, Vienna (1988) 6683.
4. Bukowski, A., et. al. Examination of properties and development of silicon doped by the neutron transmutation method, Ibid, 84 - 95.
5. Heydorn, K., Andresen, K., Neutron transmutation doping of silicon at RISO National Laboratory, Ibid, Vienna (1988), 456, 17 - 27.
6. H. Wikler, Silicon irradiation at SAPHIR, Ibid, Vienna (1988), 29 - 52.
7. Roos, H., Automatically controlled facilities for irradiation of silicon crystals at the Rossendorf Research Reactor, Ibid 53 - 64, Vienna (1988).
8. Crick, N.W., Silicon irradiation at the Harwell Laboratory of the U, Ibid, Vienna (1988) 65 - 82.
9. General Recommendation and Summary, IAEA TEC DOC 456 7 - 16 Vilowa, 1988. Silicon Transmutation Doping Techniques and Practices. Proceedings of a Consultant Meeting- Organized by the IAEA, Poland (20 - 22 Nov. 1985).
10. Ted Katauskas, Superconductivity : A Status Report R & D Magazine (February 1990), 118 122.
11. Smith, W. F., Principles of Material Science and Engineering, Mc. Grow Hill (1986).
12. Anonim, FPP - 100 Operation and Maintenance Manual Veeco Instrument Inc.
13. Arlinah K, Kamajaya, The work done on neutron radiography in Bandung - Indonesia. Neutron Radiography (3) Kluwer Academic, Publishers (1990).