

## STUDI TENTANG PENGARUH "FLUENS" TERHADAP KONSENTRASI PHOSPHOR DAN EFEKNYA PADA "DARK BAND" DI DALAM Si

Usman Sudjadi

### ABSTRAK

**STUDI TENTANG PENGARUH "FLUENS" TERHADAP KONSENTRASI PHOSPHOR DAN EFEKNYA PADA "DARK BAND" DI DALAM Si.** Telah dilakukan penelitian pengaruh "fluence" terhadap konsentrasi fosfor dan efeknya pada "dark band" di dalam silikon pada CIP di RSG-Serpong dengan bantuan alat SEM dan perhitungan. P-Si di iradiasi dengan fluence yang berbeda-beda yaitu  $4,41 \times 10^{18}$  n cm<sup>-2</sup>;  $3,67 \times 10^{18}$  n cm<sup>-2</sup>;  $2,94 \times 10^{18}$  n cm<sup>-2</sup> dan  $2,2 \times 10^{18}$  n cm<sup>-2</sup>. Secara kualitatif diperoleh hasil bahwa konsentrasi fosfor adalah  $9,0846 \times 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup>;  $7,5602 \times 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup>;  $6,0564 \times 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup> dan  $4,532 \times 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup>. Hasil ini menunjukkan bahwa hubungan konsentrasi fosfor dan "fluens" di CIP tidak linier. Interaksi elektron-elektron dari phosphor terhadap "conduction band" dan "valence band" di diskusikan. Pengamatan dengan SEM menunjukkan adanya "defect" pada permukaan silikon, sehingga mengganggu pengamatan "band" pada permukaan silikon.

### ABSTRACT

**STUDY ABOUT THE INFLUENCE OF FLUENCE TO PHOSPHOR CONCENTRATION AND THE EFFECT ON DARK BAND IN SILICON.** The influence of fluence to phosphor concentration and the effect on dark band in silicon in the CIP in RSG - Serpong with SEM technique and calculation is studied. Several p-type silicon samples are irradiated with differences fluens  $4.4 \times 10^{18}$  n cm<sup>-2</sup>;  $3.67 \times 10^{18}$  n cm<sup>-2</sup>;  $2.94 \times 10^{18}$  n cm<sup>-2</sup> dan  $2.2 \times 10^{18}$  n cm<sup>-2</sup>, respectively. Qualitatively, the results of phosphor concentrations are  $9.0846 \times 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup>;  $7.5602 \times 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup>;  $6.0564 \times 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup> and  $4.532 \times 10^{14}$  atom/cm<sup>2</sup>. This result shows that the correlation between fluens and phosphor concentration is not linear. The interaction between electrons from phosphor to conduction band and valence band is discussed. Observation with SEM shows that there are defects on the silicon surface, and these defects disturb the observation on the dark band and bright band on the silicon surface.

### PENDAHULUAN

Salah satu problem yang dihadapi di dalam fasilitas "Neutron Transmutation Doping" (NTD) di RSG-GAS adalah tidak homogenya konsentrasi fosfor di dalam silikon. Hal ini akan mempengaruhi mutu dari produk mikroelektronik. Untuk menyelesaikan masalah ini perlu studi terlebih dahulu pengaruh "fluence" terhadap besarnya konsentrasi fosfor di

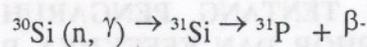
dalam silikon. Studi ini meneliti tentang pengaruh "fluence" terhadap besarnya konsentrasi fosfor di dalam silikon setelah di iradiasi dengan neutron di posisi E-7 (CIP). Studi ini tidak dapat dilakukan di fasilitas silikon doping yang sebenarnya, karena fasilitas tersebut tidak di "install", sedang menunggu alat monitoring yang sedang dibuat. Di dalam studi ini akan diterangkan pengaruh "fluence" di CIP terhadap besarnya konsentrasi phosphor di dalam silikon dan akan di diskusikan

pula interaksi elektron-elektron dari atom-atom phosphor tersebut terhadap "conduction band" dan "valence band". Selain itu akan dibahas juga hasil SEM yang membahas "dark band" dan "bright band" beserta problematiknya. Adapun batasan masalah dari studi ini ialah interaksi dari elektron-elektron dari phosphor ke "conduction band" dan "valence band" di diskusikan secara teoritis saja [8]. Selain DLTFs, untuk mengetahui besarnya konsentrasi fosfor di dalam silikon secara kualitatif dapat juga mempergunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) [10] dan perhitungan. Oleh karena itu metode yang dipergunakan dalam penelitian ini ialah dengan menganalisis cuplikan secara kualitatif dengan SEM dan perhitungan [10]. Problematika yang di hadapi dalam mendoping silikon di dalam CIP ialah adanya neutron diluar neutron thermal (misalnya neutron cepat), padahal yang diperlukan dalam mendoping silikon dalam teknologi neutron transmutation doping adalah neutron thermal saja [9, 10]. Adapun hipotesis pengaruh fluens terhadap perubahan konsentrasi phosphor dan perubahan "dark band" di dalam silikon ialah neutron cepat dari CIP akan membuat hubungan konsentrasi phosphor dan "fluens" tidak linear selain itu adanya neutron cepat akan terdapat banyak "defect" pada "silicon surface" hal ini akan mempengaruhi "dark band" pada silikon. Adapun interaksi elektron dari energi level donor ( $N_D^+$ ) ke "conduction band" akan lebih banyak jika konsentrasi phosphor semakin besar sebaliknya jika konsentrasi phosphor semakin kecil maka interaksinya juga akan semakin kecil [8]. Dalam penelitian ini akan membahas masalah tersebut di atas.

### KONSENTRASI PHOSPHOR DI DALAM SILIKON

Jika semikonduktor silikon di iradiasi dengan neutron termal maka

sifat dari pada semikonduktor tersebut yang tadinya tidak mempunyai sifat kelistrikan aktif maka akan menjadi semikonduktor yang bersifat listrik aktif yaitu menjadi semikonduktor tipe n. Reaksi inti antara neutron termal dengan isotop Si-30 dapat dilihat pada reaksi dibawah ini [8] :



Dengan waktu peluruhan 2,6 jam. Hubungan antara besarnya konsentrasi fosfor dan flux neutron termal serta lamanya waktu iradiasi dapat ditulis sesuai dengan rumus dibawah ini [8].

$$C_p = 2,06 \cdot 10^{-4} \Phi_{th} \cdot t \quad (1)$$

$C_p$  = Konsentrasi Phosphor di dalam silikon (atom  $\text{cm}^{-3}$ )

$\Phi_{th}$  = fluks neutron termal (neutron/ $\text{cm}^2 \cdot \text{det}$ )

$t$  = lamanya waktu iradiasi (det)

Dari rumus diatas terlihat bahwa konsentrasi phosphor berbanding lurus dengan fluks neutron termal dan waktu iradiasi, dengan demikian jika silikon di iradiasi dengan fluks neutron termal yang lebih tinggi (daya yang lebih tinggi) maka konsentrasi phosphor akan semakin besar. Selain itu jika silikon di iradiasi dengan waktu yang semakin lama, maka konsentrasi phosphor juga akan semakin besar.

Sedangkan jika dihubungkan dengan resistivitasnya maka rumusnya dapat ditulis sbb.:

$$t = (A/\Phi) (1/\rho_E - 1/\rho_A) \quad (2)$$

$A$  = Konstanta iradiasi ( $\Omega \cdot \text{cm}^{-1} \cdot n$ )

$\Phi$  = fluks neutron termal ( $n \times \text{cm}^{-2} \times \text{det}^{-1}$ )

$\rho_E$  = resistivitas setelah di iradiasi ( $n \times \text{cm}^{-2} \times \text{det}^{-2}$ )

$\rho_A$  = resistivitas sebelum di iradiasi ( $n \times \text{cm}^{-2} \times \text{det}^{-2}$ )

$t$  = lamanya iradiasi (det atau jam)

Dari rumus 2 dan 3 diatas terlihat bahwa jika konsentrasi phosphor semakin besar maka resistivitasnya akan semakin kecil. Hal ini disebabkan bahwa konsentrasi phosphor yang terdoping berbanding lurus dengan fluks neutron, sedangkan fluks neutron berbanding terbalik dengan resistivitas. Berikut ini adalah dasar-dasar pengetahuan yang perlu diperhatikan dalam mengiradiasi material khususnya semikonduktor silikon ; dalam mengiradiasi material khususnya semikonduktor silikon maka harus diketahui besarnya termal neutron, dilokasi dimana silikon akan di iradiasi, kemudian juga harus diperhatikan penampang lintang serapan ("absorption cross-section) dari pada silikon dan harus diperhatikan pula karakteristik "inherent" daripada silikon (untuk silikon kerapatannya 2,33 g/cm<sup>3</sup> pada 25<sup>o</sup> C, "isotopic abundance" dari Si-30 didalam silikon alam ialah 3,1%.

Reaksinya dapat di tulis sbb.:

$$dN_{Si-30} / dt = \int_0^t N_{Si-30} \sigma_{Si-30} \phi dt - \int_0^t \lambda N_{Si-30} dt. \quad (3)$$

dimana

$$\bar{\sigma} = \frac{\int_0^{\infty} \sigma(E) \phi(E) dE}{\int_0^{\infty} \phi(E) dE}$$

<sup>o</sup> Si-30 di peroleh dengan eksperimen, yang mana spektrum neutronnya tergantung dari posisi iradiasi.

Adapun interaksi aktif elektron-elektron dari atom-atom fosfor dapat dijelaskan sebagai berikut:

Kasing et al. menjelaskan [1-7, 10] bahwa konsentrasi elektron di "conduction band" dapat dilihat di persamaan seperti dibawah ini:

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad (4)$$

Sedangkan konsentrasi "hole" yang terdapat di "valence band" besarnya ialah

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (5)$$

Dimana:

N<sub>C</sub> = level kerapatan efektif untuk elektron

N<sub>V</sub> = level kerapatan efektif untuk "hole"

E<sub>F</sub> = energi Fermi

K = konstanta Boltzman

T = temperatur

Jika silikon didoping dengan NTD maka didalam "forbidden band" terdapat energi level dari phosphor, hubungan konsentrasi phosphor dengan konsentrasi elektron di dalam "conduction band" dapat dilihat dari rumus sebagai berikut:

$$n = N_D^+ = C_p \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_D - E_F}{kT}\right)} \quad (6)$$

$C_p$ , konsentrasi phosphor dari doping di level energi doping, dalam hal konsentrasi elektron-elektron dari phosphor di level energi doping ( $E_D$ ) didalam "forbidden band"[2]. Dari persamaan (6) terlihat bahwa jika temperatur berubah maka energi Fermi ( $E_F$ ) juga berubah. Untuk membentuk  $n(T)$  maka  $E_F$  dari persamaan (6) harus dieliminasi dengan bantuan persamaan (4) akan di peroleh:

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) = C_p \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_D - E_F}{kT}\right)} \quad (7)$$

Dengan merubah  $-(E_D - E_F)$  menjadi  $(E_C - E_D) - (E_C - E_F)$ , maka persamaan (7) akan menjadi

$$n = C \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_C - E_D}{kT}\right) \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)} \quad (8)$$

$n$  = konsentrasi elektron di "valence band"

$C_p$  = Konsentrasi phosphor

$E_C - E_D$  = "conduction energy" - "donor conduction"

$E_C + E_F$  = "conduction energy" - "Fermi conduction"

$K$  = konstanta "Boltzmann"

$T$  = Temperatur

## TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Cuplikan yang digunakan ialah p-Si (FZ - "Floating Zone") yang mempunyai orientasi atom (100), dengan konsentrasi dasar Boron  $3,5 \times 10^{15}$  atom/cm<sup>3</sup>, tahanan jenis =  $8 \Omega\text{cm}$  dan mobilitas lubang ("hole") =  $5,3 \times 10$

cm<sup>2</sup>/Volt detik. Dimensi cuplikan adalah 2 cm, panjang 2 cm dan tebal 400  $\mu\text{m}$ . Cuplikan kemudian di iradiasi dengan daya yang berbeda-beda pada posisi E-7. Cara mengiradiasi cuplikan silikon yaitu pertama-tama cuplikan di bungkus dengan aluminium foil, kemudian ke dalam "capsule", baru kemudian dimasukkan ke dalam posisi E-7.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Foto-foto dibawah ini [1-6] adalah hasil dari beberapa cuplikan silikon yang di iradiasi neutron di posisi E-7 (CIP). Hasil ini di peroleh dari pengamatan secara mikro dengan "Scanning Electron Mycroscope" (SEM). Alat ini hanya dapat menganalisis struktur mikro pada permukaan cuplikan saja ("surface"). Photo 8 memperlihatkan cuplikan silikon yang tidak di iradiasi. Pembesaran foto ini ialah 20.000 X. Terlihat bahwa permukaan cuplikan terdapat "band" gelap dan terang, "band" ini diperoleh dari sifat kelistrikan silikon awal yaitu bersifat p. Doping awal ini ("shallow doping"), teknologi yang dipakai ialah "conventional technology". M. Pawlowska et al.[10] telah meneliti dengan membandingkan homogenitas fosfor pada NTD dengan termal neutron di reaktor di Warsaw, Poland di bandingkan dengan teknologi doping yang konvensional. Dengan metode yang digunakan ialah "charge collection microscopy" (CCM) di dalam daerah "barrier" metal-semiconductor (Schottky). Hasilnya ialah bahwa "band" yang dihasilkan dari doping metode konvensional jauh lebih jelas dari pada doping metode NTD. "Band" yang terang merupakan penumpukan elektron-elektron di "conduction band", sedangkan "band" yang gelap merupakan penumpukan "hole" di "valence band" [2, 10]. Interaksinya dapat dilihat di persamaan 2-8. Foto 1 memperlihatkan hasil pengamatan

permukaan struktur mikro dari cuplikan silikon yang di iradiasi dengan "fluence"  $3,67 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ . Perbesaran dari foto ini ialah 20.000X. Terlihat dipermukaan cuplikan pada foto 1 terdapat bercak-bercak hitam, bercak-bercak hitam ini diduga akibat adanya neutron cepat pada CIP [8, 10]. Foto 2 adalah hasil pengamatan struktur mikro dengan SEM dari Cuplikan silikon yang di iradiasi dengan neutron di posisi E-7 dengan "fluence"  $2,94 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ . Foto ini diambil dengan perbesaran 20.000 X. Hasilnya memperlihatkan bahwa terdapat struktur-struktur hitam disini terlihat adanya "defect" pada silikon. "Defect" ini kemungkinan besar disebabkan interaksi antara neutron dengan kristal silikon [8, 10]. Foto 3 adalah hasil pengamatan struktur mikro dengan SEM dari cuplikan silikon yang di iradiasi dengan "fluence"  $4,41 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ . Foto ini juga diambil pada perbesaran 20.000 X. Terlihat dalam permukaan cuplikan silikon ini terdapat bercak hitam juga. Foto 4 adalah hasil pengamatan struktur mikro dengan SEM dari cuplikan silikon yang di iradiasi di posisi E-7 pada "fluence"  $2,2 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ . Foto ini di ambil dengan perbesaran 20.000 X. Analisis foto ini tidak jauh berbeda dengan foto 3.

Foto 5 dan foto 6 hasil pengamatan struktur mikro dari cuplikan yang di iradiasi dengan "fluence"  $4,41 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$  dengan perbesaran yang berbeda, foto 5 diambil pada perbesaran 2000 X dan foto 6 diambil dengan perbesaran 20.000 X. Dari kedua foto ini dapat dilihat bahwa selain adanya gambar bercak-bercak pada permukaan stuktur silikon juga terdapat guratan-guratan pada permukaan cuplikan tersebut. Palowska et al [10] mendapatkan guratan-guratan yang sangat jelas mirip dengan foto 5 dan 6. Hanya saja cuplikan-cuplikan yang diteliti oleh Palowska et al dilakukan "selective chemical etching" dan orientasi atom dari cuplikan yang

dipakai yang dipakai oleh Polowska et al ialah (110) (lihat gambar 8). Dari persamaan 8 dapat dilihat bahwa jika konsentrasi phosphor besar maka konsentrasi elektron di "valence band" juga besar. Atau dengan kata lain jika "fluence" nya besar maka konsentrasi elektron di "valence band" juga besar, sehingga mengakibatkan "bright band" semakin jelas dan "dark band" nya semakin tidak jelas. Di dalam studi ini perubahan tersebut tidak terlihat disebabkan adanya "defect structure on the surface" yang di duga adanya "fast neutron" di CIP [10]. Untuk "fluence"  $4,41 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$  maka besarnya elektron di dalam "valence band" akan lebih besar jika di dibandingkan dengan "fluence"  $3,67 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ ,  $2,94 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$  atau  $2,2 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ . Sehingga "bright band" yang terbesar dalam studi ini seharusnya ialah silikon yang di iradiasi dengan "fluence"  $4,41 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ . Sebaliknya sesuai teori jika "fluence" nya besar maka "dark band" nya semakin kecil (lihat persamaan 6-8).

Konsentrasi fosfor dari penelitian ini ialah pada cuplikan yang di iradiasi dengan "fluence"  $4,41 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$  maka konsentrasi fosfornya  $9,0846 \times 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ . Sedangkan yang di iradiasi neutron dengan "fluence"  $3,67 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ , maka besar konsentrasi fosfornya ialah  $7,5602 \times 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ . Cuplikan yang di iradiasi neutron dengan "fluence"  $2,94 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$  mengasilkan konsentrasi fosfor di dalam silikon  $6,0564 \times 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ . Pada cuplikan yang di iradiasi neutron dengan "fluence"  $2,2 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ , diperoleh konsentrasi fosfor sebesar  $4,532 \times 10^{14} \text{ atom/cm}^2$ . Hasil-hasil ini adalah hasil perhitungan secara kualitatif. Hasil ini di peroleh dengan memasukkan harga-harga "fluence" ke dalam persamaan (1). Untuk mendapatkan hasil yang kuantitatif maka penelitian harus dilanjutkan dengan mempergunakan alat DLTFs (Deep Level Transient Spectroscopy) yang

mana BATAN tidak punya alat ini. Dari hasil di atas terlihat bahwa hubungan antara konsentrasi fosfor dan "fluens" tidak linier hal ini disebabkan di CIP tidak hanya terdapat neutron thermal saja, tapi juga terdapat "fast neutron" atau neutron yang berenergi lain. Perbandingan neutron thermal dan neutron cepat di CIP yaitu 4,4 [11].

## KESIMPULAN

Dari studi ini dapat disimpulkan bahwa silikon yang di iradiasi di CIP akan mendapatkan hasil konsentrasi fosfor yang tidak linier dengan "fluence". Hal ini disebabkan di dalam CIP tidak hanya terdapat neutron

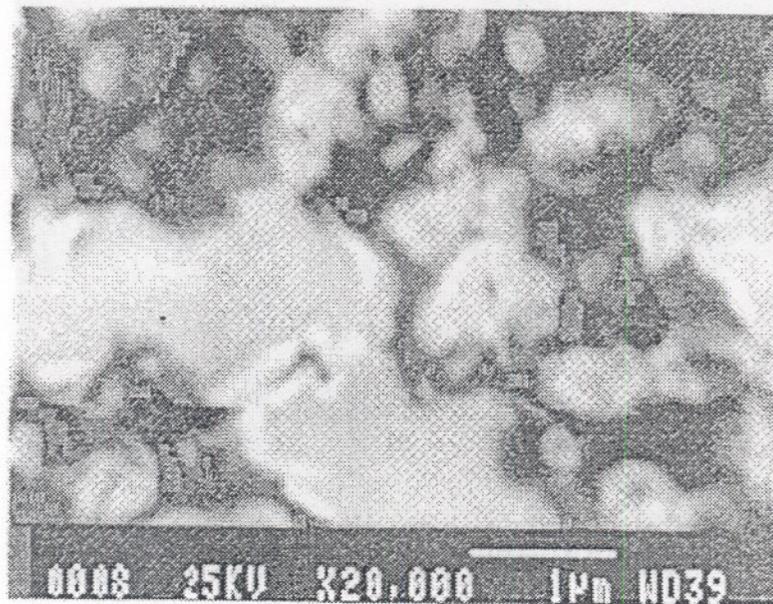
thermal saja tapi juga terdapat neutron cepat dan neutron berenergi lain selain neutron thermal. Pengamatan dengan SEM menunjukkan adanya "defect structure" pada permukaan silikon sehingga mengganggu pengamatan "band" pada permukaan cuplikan silikon. "Defect" ini di duga oleh "fast neutron".

## UCAPAN TERIMA KASIH

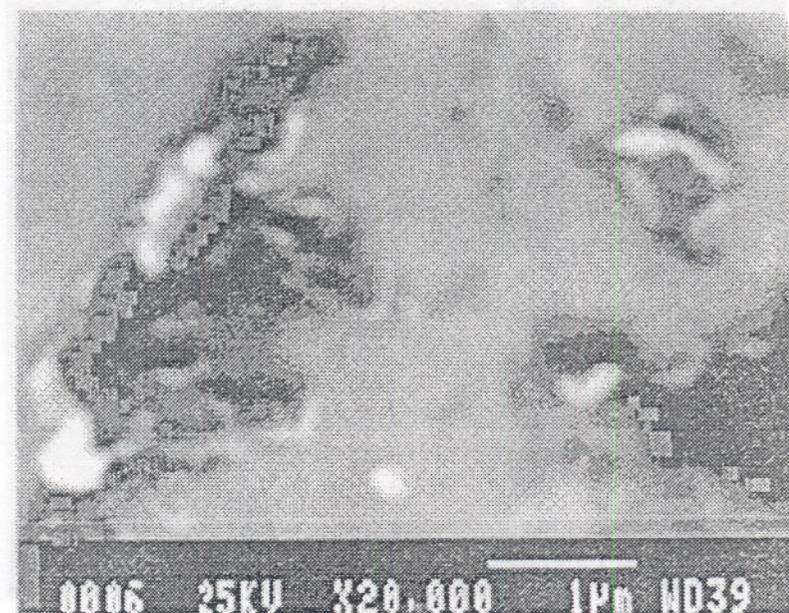
Terima kasih disampaikan kepada Bapak Marsono atas kerjasamanya dalam mempersiapkan cuplikan.

## DAFTAR ACUAN

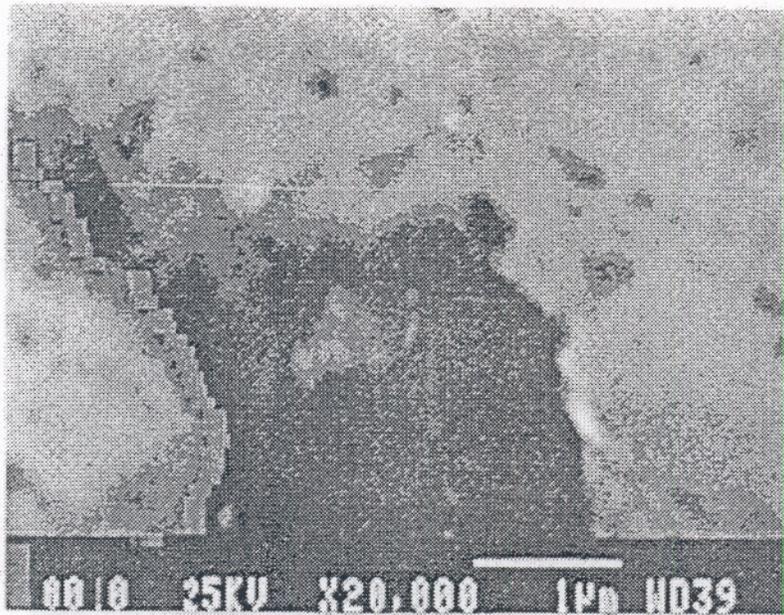
1. U. SUDJADI, S. WEISS, A. BOCK and R. KASSING: "Investigation of a Pd-Au complex in-type silicon with the DLTFs - Techniques"; in *Physica Status Solidi (a)*, Vol: 149, No. 2 (1995).
2. R. KASSING, Prof. Dr.: Vorlesungsskript, Universitat Munster, 1975
3. Z. SPIKA et al. (Universitat Marburg), S. WEISS, U. SUDJADI, A. BOCK und KASSING: "Untersuchung tiefer Storstellen in GaAs - Volumenkristschichten hergestellt mit der neuartigen, alternativen Gruppe-V-Quelle Diethylerti-arbutylarsen (DetBAs) in der metallorganischen Gasphasenepitaxie (MOVPE)"; in *Verhandlungen DPG (VI)*, 29 HL-7.7, Seite 1036, Munster, Germany, 1994.
4. U. SUDJADI, S. WEISS, A. BOCK und R. KASSING: "Untersuchungen an Pd-korrelierten Storstellen in Silizium mit Hilfe des DLTFs-Verfahrens"; in *Verhandlungen DPG (VI)*, 29 HL-10.74, Seite 1070, Munster, Germany, 1994.
5. U. SUDJADI: "Study on the Diffusion of Au in n-Si for Preparing p<sup>+</sup>in<sup>+</sup> Diodes"; A paper presented at the STMDP Meeting, Delf-Netherland, 1991.
6. U. SUDJADI, S.WEISS, A.BOCK und R. KASSING: "Characterization of the electrical properties of Copper in Silicon with the DLTFs method"; In *Verhandlungen DPG (VI)*, 30 HL-28.14, Seite 1267, Berlin, Germany, 1995.
7. U. SUDJADI: "Study on the Diffusion of Au in n-Si for Preparing p<sup>+</sup>in<sup>+</sup> Diodes"; A paper presented at the STMDP Meeting, Delf-Netherland, 1991.
8. I. RUGE, Halbleiter - Technologie, Springer - Verlag, Berlin (1984).
9. U. SUDJADI: "Penelitian Unsur-Unsur Kontaminasi di Dalam Silikon pada NTD di RSG-GAS", Prosiding, Seminar Hasil Penelitian PRSG, 1997/1998.
10. M. PAWLOWSKA, A. BUKOWSKI, S. STRZELECKA and P. KAMINSKI: "Investigation of Heterogeneities in Neutron Transmuted Silicon Single Crystals" IAEA-TECDOC-456, 1988.
11. AS NATIO, L dan A. HAMZAH: "Pengukuran dan perhitungan fluks neutron di RSG-GAS", annual report, 1996.



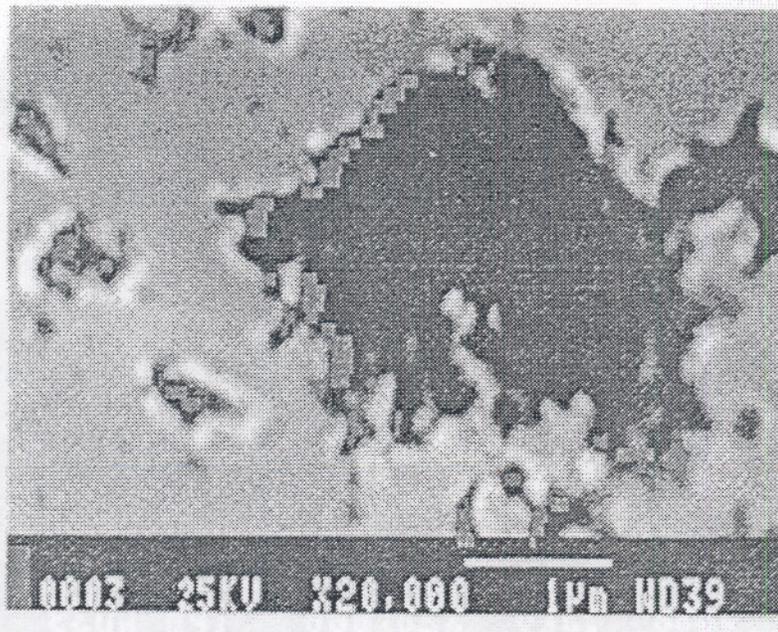
Gambar 1. Foto Silikon diiradiasi dengan "fluence"  $3,67 \times 10^{18} \text{ n cm}^{-2}$ , perbesaran 20.000 X



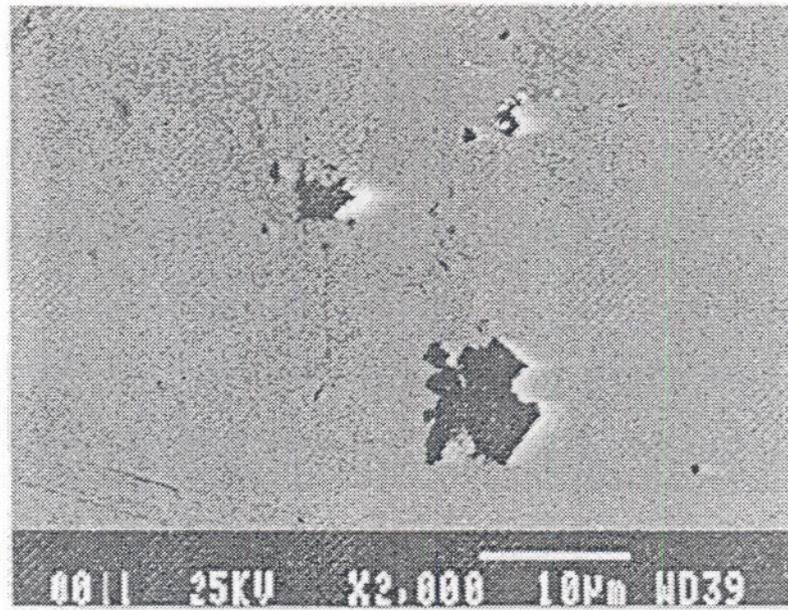
Gambar 2. Foto Silikon diiradiasi dengan "fluence"  $2,94 \times 10^{18} \text{ n cm}^{-2}$ , perbesaran 20.000 X



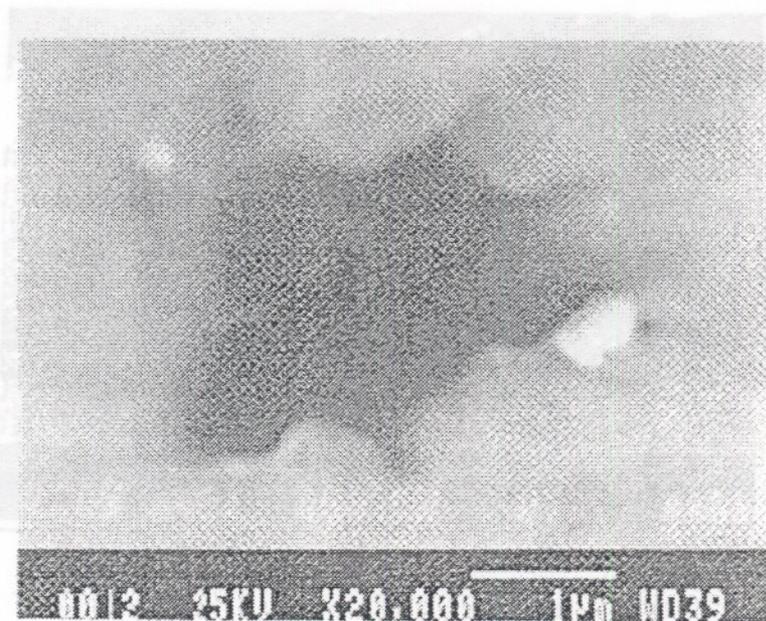
Gambar 3. Foto Silikon diiradiasi dengan "fluence"  $4,41 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ ,  
perbesaran 20.000 X



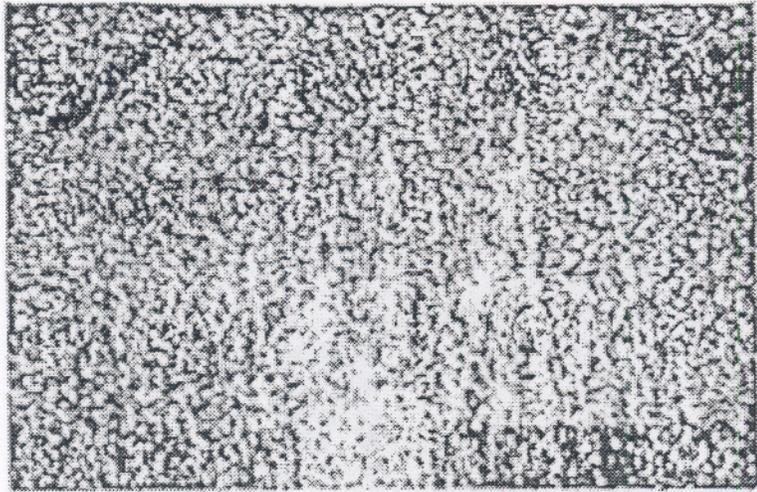
Gambar 4. Foto Silikon diiradiasi dengan "fluence"  $2,22 \times 10^{18} \text{ n cm}^2$ ,  
perbesaran 20.000 X



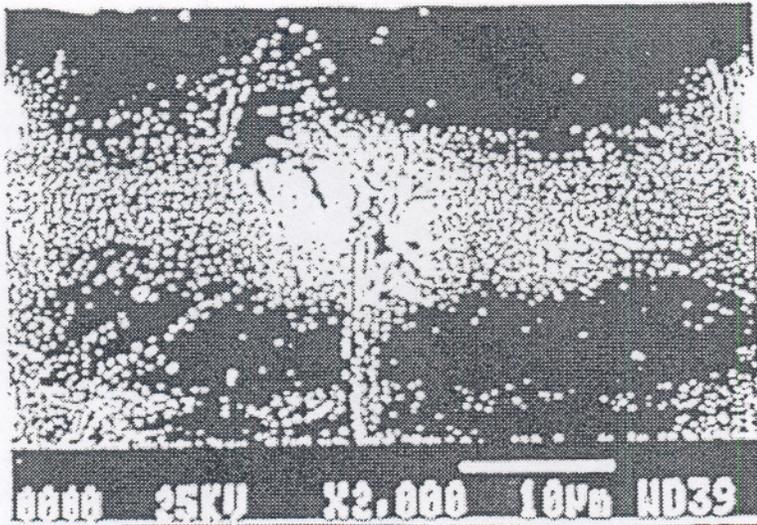
Gambar 5. Foto Silikon diiradiasi dengan "fluence"  $4,41 \times 10^{18} \text{ n cm}^{-2}$ , perbesaran 2000 X



Gambar 6. Foto Silikon diiradiasi dengan "fluence"  $4,41 \times 10^{18} \text{ n cm}^{-2}$ , perbesaran 20.000 X posisi "surface" berbeda



Gambar 7. Pengamatan SEM struktur pada bidang (110) dari Kristal silikon yang diiradiasi [10]



Gambar 8. Foto Silikon yang tidak diiradiasi