

Penelitian Unsur-Unsur Kontaminasi dan Analisis Efek Kelistrikkannya di Dalam Silikon pada NTD di RSG-GAS

Usman Sudjadi

Abstrak

Penelitian Unsur-Unsur Kontaminasi dan Analisis Efek Kelistrikkannya di Dalam Silikon pada NTD di RSG-GAS. Telah diteliti unsur-unsur kontaminasi di dalam silikon pada proses NTD (Neutron Transmutation Doping) dengan Multi Channel Analyser (MCA). Penelitian ini penting untuk mengetahui kualitas daripada silikon doping di NTD. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa Mn-45, Ga-72 dan Au-198 adalah unsur-unsur kontaminasi yang terdapat di dalam silikon setelah proses NTD di RSG-GAS. Analisis efek kelistrikan dari unsur-unsur kontaminasi ini, pada semikonduktor silikon juga diterangkan dalam makalah ini.

Abstract

Investigation of Elements Contamination and Analysis of Electrical Effect of this Contamination in Silicon on the Neutron Transmutation Doping in the RSG-GAS. The elements of contamination on the Neutron Transmutation Doping process (NTD) have investigated by Multi Channel Analyser (MCA). This investigation is important to know the quality of silicon doping in NTD. We have found that Mn-45, Ga-72 and Au-198 are elements of contamination in silicon after NTD process. Analysis of electrical effect of this elements contamination on semiconductor silicon is described also in this paper.

PENDAHULUAN

Unsur-unsur kontaminasi (unsur-unsur diluar phophor) pada waktu proses neutron transmutation doping pada silikon, sangat tidak diinginkan oleh perusahaan mikroelektronik. Terutama unsur-unsur kontaminasi yang bersifat elektris aktif seperti misalnya unsur-unsur Fe, Au, Cu, Cr, Ni dan sebagainya. Unsur-unsur kontaminasi aktif jika ikut terdoping di dalam silikon, maka unsur-unsur ini akan membuat tingkat energi (energy level) di dalam "forbidden band" (pita larangan). Interaksi elektron-elektron atau "hole" (lubang) terhadap "conduction band" (pita konduksi) dan "valence band" (pita valensi) akan mempengaruhi produk dari transistor, diode, IC dan produksi mikroprosesor (μp) pada mikroelektronik. Tujuan penelitian ini adalah untuk meneliti unsur-unsur kontaminasi yang terdapat pada proses NTD. Hal ini berguna untuk

mengoptimasi fasilitas silikon doping di RSG-GAS, yang dapat menunjang salah satu program SARLITA. Banyak alat untuk meneliti dan mengukur unsur-unsur kontaminasi di dalam semikonduktor Si, Ge, InP, GaAs, InP/GaAs (di dalam penelitian ini yang dipakai adalah Si). Alat-alat tersebut seperti misalnya "Hall Effect", "CC-Technique (Constant Capacitance Technique)", "EPR (Electron Paramagnetic Resonance)", DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) dan DLTFs (Deep Level Transient Fourier Spectroscopy) [2-6] dll. BATAN tidak mempunyai alat-alat tersebut di atas. BATAN hanya mempunyai MCA (Multi Channel Analyser), alat ini hanya dapat menentukan jenis unsur yang terkontaminasi di dalam silikon saja, tapi tidak dapat menentukan berapa besarnya energi level, "microscopic cross section" tiap unsur kontaminan di dalam silikon. Dengan keterbatasan alat-alat penelitian di BATAN maka penelitian ini hanya mempergunakan alat MCA.

STAMPAAN

Hasil penelitian ini tidak memberikan hasil secara kuantitatif yaitu tidak memberikan berapa besarnya energi level, "microscopic cross section", konsentrasi dsb. Tetapi hanya memberikan hasil secara kualitatif yaitu unsur-unsur apa saja yang mengkontaminasi di dalam silikon. Penelitian ini nanti akan dilanjutkan dengan mempergunakan alat DLTFs di Jerman, jika penulis berkesempatan ke Jerman lagi.

SIFAT-SIFAT KELISTRIKAN UNSUR-UNSUR DOPING DI DALAM Si

Masing-masing atom didalam kristal silikon mempunyai empat elektron pada kulit terluar, empat elektron pada kulit terluar ini masing-masing dua elektron dari 3s (valensi) dan dua elektron dari 3p (valensi).

Dengan elektron-elektron ini atom-atom silikon dapat berikatan satu sama lain, dan dengan elektron-elektron inilah atom-atom silikon akan pula berikatan dengan atom-atom yang di dopingkan ke silikon. Misalkan dengan memberikan energi maka sebuah elektron dari ikatannya akan dapat terpisah. Elektron-elektron yang lain dapat mengisi kembali celah-celah yang kekurangan elektron ini. Dengan memberikan medan listrik maka dalam hal ini akan terdapat arus listrik. Jika pemberian energi tersebut adalah energi thermal, maka konsentrasi elektron-elektron bebas akan bergantung pada temperatur yang diperlihatkan oleh $\exp(\Delta E/kT)$ (Faktor-Boltzman). Yang mana ΔE adalah energi aktivasi. Elektron-elektron yang seolah-olah bebas bergerak satu sama lain di dalam "conduction band" (E_c) pada semikonduktor dan "holes" (lubang-lubang) di dalam "valence band" (E_v). Diantara E_c dan E_v terdapat "forbidden band" yang mana di dalamnya tidak terdapat

elektron-elektron. Berapa jumlah elektron-elektron di dalam "conduction band" dan berapa "holes" yang dibawa ke "valence band". Dengan kerapatan level $D(E)$ dan distribusi Fermi-Dirac $f(E)$ maka untuk jumlah seluruh elektron-elektron N di dalam "conduction band" akan di dapatkan:

$$N = 2 \cdot \int D(E) f(E) dE \quad (1)$$

(faktor 2 menunjukkan arah-arrah spin), untuk seluruh energi elektron-elektron dapat ditulis:

$$E = E_{pot} + \frac{h^2 k^2}{2 m_{eff}} \quad (2)$$

$$k = \frac{\sqrt{2m_{eff}}}{h} \cdot (E - E_{pot})^{1/2} \quad (3)$$

Karena di dalam pemikiran ini tidak ada kelebihan arah-arrah dari vektor k yang seharusnya diberikan, maka pembatasan perluasan $E = \text{konstan}$. Bola yang mempunyai titik pusat 0 dan kulit-kulit bola antara E dan $E + dE$ terdapat sebuah volume $4\pi k^2 dk$, jadi pada sebuah volume di dalam ruang k per level quantum dari $(2\pi)^3/V$ ($V = \text{volume}$) untuk $D(E) dE$ akan didapat:

$$D(E)dE = \frac{4\pi \cdot k^2}{(2\pi)^3 / V} \cdot dk \quad (4)$$

Dengan dk/dE dari (3)

$$dk = \frac{\sqrt{2m_{eff}}}{h} (E - E_{pot})^{-1/2} \cdot dE \quad (5)$$

akan didapat:

$$D(E)dE = V \cdot 4\pi \cdot 2 \cdot m_{eff} \cdot \sqrt{2m_{eff}} \cdot h \cdot (E - E_{pot})(E - E_{pot})^{-1/2} dE$$

$$= V \cdot \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2 \cdot m_{eff}}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (E - E_{pot})^{3/2} \cdot dE. \quad (6)$$

kalikan dengan kT, gantilah h dengan $h/2\pi$ maka akan di dapatkan

$$2 D(E) dE = v \cdot 4 \pi \left(\frac{2 \cdot m_{eff}}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (E - E_{pot})^{1/2} \cdot dE$$

$$= v \cdot 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_{eff} \cdot kT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{E - E_{pot}}{kT} \right)^{1/2} \cdot d\left(\frac{E}{kT} \right) \quad (7)$$

besaran $2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_{eff} \cdot kT}{h^2} \right)^{3/2}$ biasa disingkat N_C

dan besarnya ialah :

$$2,51 \cdot 10^{19} \cdot \left(\frac{m_{eff}}{m_0} \cdot \frac{T}{300} \right)^{3/2} \text{ cm}^{-3}$$

dipergunakan masa elektron $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ g}$.

$$n = N_C \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{E_{pot}}^{\infty} \left(\frac{E - E_{pot}}{kT} \right)^{1/2} \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT} \right)} d\left(\frac{E}{kT} \right) \quad (8)$$

Dengan mengganti $\eta = \frac{E - E_{pot}}{kT}$, maka akan didapatkan

$$\frac{n}{N_C} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + \exp\left\{ \frac{(E - E_{pot}) - (E_F - E_{pot})}{kT} \right\}} \cdot \sqrt{\eta} \cdot d\eta$$

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + \exp(\eta \cdot \exp\left(\frac{E_{pot} - E_F}{kT} \right))} \cdot \sqrt{\eta} \cdot d\eta \quad (9)$$

Konsentrasi elektron-elektron di dalam "conduction band" harus dihitung, yang mana

$E_{pot} = E_C$, dengan $E_C =$ Energi pada "conduction band". Kita dapat mengetahui dari persamaan

(9), $\frac{n}{N_c}$ adalah sebuah fungsi parameter (E_c

E_f). Selain itu untuk menentukan $\frac{n}{N_c}$ tergantung juga dengan ($E_c - E_f$). Kita dapat membedakan dua keadaan:

$$1. \frac{E_c - E_f}{kT} \rightarrow \infty$$

Dalam hal ini persamaan (9) lebih besar dari 1, jadi akan berlaku:

$$\begin{aligned} \frac{n}{N_c} &\approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-\eta) \cdot \exp\left(\frac{-E_c + E_f}{kT}\right) \sqrt{\eta} \cdot d\eta \\ &\approx \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-\eta) \sqrt{\eta} \cdot d\eta \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{Hasil integral } \int_0^{\infty} \exp(-\eta) \sqrt{\eta} \cdot d\eta = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

jadi akan didapatkan: (11)

$$\frac{n}{N_c} \approx \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right), \text{ kita dapat}$$

mengetahui mengapa faktor $\frac{2}{\sqrt{\pi}}$ di dalam

persamaan (7) akan terpisahkan. Dari persamaan (11) dapat diartikan sebagai berikut, jika $E_c - E_f \gg kT$ ini artinya $n \ll N_c$.

Selain itu diketahui bahwa harga N_c (pada temperatur ruang) dengan $m_{eff} \approx m_0$ (= massa elektron bebas) harganya adalah:

$$N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_{eff}}{m_0} \frac{T}{300K}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Harga ini biasanya untuk semikonduktor yang didoping sampai 10^{17} cm^{-3} . Dengan demikian didapatkan persamaan pertama yang mendasar:

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right) \dots\dots\dots(12)$$

$$2. \frac{E_c - E_f}{kT} \rightarrow -\infty$$

Untuk $\eta < |E_c - E_f|$ adalah $\exp \eta \cdot \exp\left(\frac{E_c - E_f}{kT}\right) \ll$

dan untuk $\eta \gg |E_c - E_f|$ maka hasil integrasinya akan kecil, jadi suatu pendekatan yang baik jika persamaan (9) diberikan untuk keadaan:

$$\frac{n}{N_C} \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta = -\frac{(E_C - E_F)}{kT}} \sqrt{\eta} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{2}{3} \left(\frac{E_C - E_F}{kT} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Untuk keadaan $n \gg N_C$ akan di dapatkan juga:

$$-(E_C - E_F) = \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \pi^{\frac{1}{3}} kT \left(\frac{n}{N_C}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{13}$$

Sebuah perhitungan evaluasi dari integral di dapatkan hasil pada gambar 2. Kita dapat mengenal bahwa bahwa pemberian approxikasi:

$$\frac{n}{N_C} = \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \tag{12}$$

untuk $\left(\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \gg 1$ sampai $n \approx 0,1 N_C$ adalah

sangat bagus untuk memenuhi. Persamaan (12) adalah menerangkan juga sebuah keterangan secara garis besar tentang kerapatan level efektif. Pada pemberian pencairan (dapat di analogikan) dengan teori gas ($n \ll N_C$) akan didapatkan gas elektron-elektron sebagai mana pada gas ideal, yang mana dipergunakan juga untuk statistik Boltzmann. Sebuah level yang terisi secara kontinu di dalam "conduction band" didapatkan N_C keadaan/level/cm³ dengan satu satuan level energi E_C . Kita dapat menganalogikan keterangan diatas dengan "hole" di dalam "valence band". Rumusnya dapat dilihat seperti dibawah ini:

$$p = N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \tag{14}$$

Seperti diketahui bahwa di dalam kristal silikon terdapat ribuan sampai jutaan atom. Tergantung besar kecilnya kristal silikon tsb. Atom-atom silikon ini berinteraksi satu dengan yang lain sesuai dengan interaksi "coulomb". Diagram interaksi potensial coulomb fungsi jarak

beberapa atom silikon pada satu dimensi dapat diperlihatkan seperti gambar 1 [1]. Dari gambar dapat diperlihatkan bahwa kerapatan elektron semakin dalam semakin rapat dan semakin keluar semakin renggang kerapatannya ("density") [2]. Energi level elektron yang terluar disebut "conduction band" sedangkan energi level lapisan dari luar disebut "valence band" (lihat gambar 1). Jarak antara "conduction band" dan "valence band" disebut "forbidden band" pada silikon biasanya besarnya 1 eV. Unsur-unsur kontaminasi yang masuk kedalam Si akan membentuk energi-energi level di dalam "forbidden band", elektron-elektron di dalam energi level (E_F) ini akan berinteraksi dengan E_C sedangkan "hole" akan berinteraksi dengan E_V [1].

TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Cuplikan yang digunakan adalah p-Si (FZ-"Floating Zone") yang mempunyai orientasi atom (100), dengan konsentrasi dasar Boron $3,5 \times 10^{15}$ atom/cm³, tahanan jenis = 8 Ω cm dan mobilitas lubang ("hole") = $5,3 \times 10$ cm²/Volt.detik. Dimensi cuplikan adalah 1 cm, panjang 1 cm dan tebal 400 μm. Cuplikan pertama kali dibersihkan dengan C₂HCl₃ pada 80° C. Kemudian permukaan cuplikan dibersihkan dengan methanol. Oksida alam yang

menempel pada permukaan silikon telah di "etching" dengan HF (40%) dan cuplikan dikeringkan dengan gas N₂. Cuplikan kemudian di iradiasi di CIP (Central Irradiation Position) di RSG-GAS, dengan perbedaan waktu dan perbedaan flux neutron (daya). Cara me iradiasi cuplikan silikon yaitu pertama-tama cuplikan di bungkus dengan kertas aluminium, kemudian dimasukkan ke dalam aluminium "capsul", baru kemudian dimasukkan ke dalam CIP. Tata kerja untuk preparasi cuplikan sebelum dan sesudah radiasi adalah sama, bedanya hanya pada iradiasi dibungkus dengan kertas aluminium. Selain itu sebelum iradiasi cuplikan diukur dengan DLTFs dan sesudah iradiasi diukur dengan MCA.

HASIL DAN DISKUSI

Untuk mengetahui apakah di dalam cuplikan silikon terdapat unsur-unsur kontaminasi sebelumnya. Maka cuplikan silikon sebelum di iradiasi atau sebelum dimasukkan ke dalam CIP di selidiki dulu apakah di dalam cuplikan silikon tersebut terdapat unsur-unsur kantaminasi atau tidak ada sebelumnya. Pengukuran dengan mempergunakan alat DLTFs (Deep Level Transient Spectroscopy) [2, 3 dan 4]. Gambar 3. memperlihatkan hasil pengukuran dengan DLTFs, cuplikan silikon sebelum di iradiasi, hasilnya menunjukkan bahwa di dalam cuplikan sebelum di iradiasi tidak terdapat unsur-unsur kontaminasi dari luar maupun dari dalam silikon sendiri. Hal ini terlihat dengan tidak adanya "peak" di dalam gambar tersebut. Sampel ini sama dengan sampel yang di iradiasi di CIP sebelumnya dibersihkan dengan acetone dan methanol (lihat prosedur kerja).

Gambar 4. menunjukkan hasil pengukuran dengan MCA, cuplikan setelah di iradiasi di Central Irradiation Position (CIP),

hasilnya menunjukkan bahwa di dalam cuplikan silikon setelah di iradiasi di dalam CIP terdapat unsur-unsur Au-198, Mn-54 dan Ga-72 yang ikut masuk. Konsentrasi dari ketiga unsur ini kecil. Selain itu di dapatkan hasil pula bahwa "average activity" dari Mn-45 adalah $1.32e + 06$, Ga-72 adalah $3.99e+09$ dan Au-198 adalah $3.15e+08$. sedangkan "decay factor" nya untuk Mn-54 adalah $9.85e-01$, sedangkan untuk Ga-72 adalah $3.40e - 04$, dan hasil "decay factor" dari Au-198 adalah $1.75e-01$. "Peak" Mn dan "peak" Ga terjadi interferensi.

Walaupun Au-198 konsentrasinya tidak begitu besar, unsur ini sangat mempengaruhi produksi mikroelektronik. Karena unsur Au sangat elektris aktif. Atom-atom Au masuk kedalam silikon, ada kerugian atau keuntungannya, hal itu tergantung dari pada tujuan produksi "microelectronic device" yang akan dibuat. Jika tujuannya untuk membuat daerah intrinsik (p⁺n⁺ diode), maka hal ini akan berguna seperti yang diterangkan dibawah ini [1].

Unsur Au di dalam silikon sering dipergunakan dalam industri mikroelektronik salah satu fungsinya yaitu untuk membuat dioda p⁺n⁺, n⁺n⁺ dan p⁺ip⁺. Yang mana fungsi Au di dalam silikon adalah sebagai kompensasi untuk menghasilkan daerah intrinsik (i) di dalam dioda-dioda diatas.

Atom Au di dalam p-Si mempunyai beberapa tingkat energi pada "forbidden band" yaitu $E_v + 0,35$ eV dengan penampang lintang mikroskopik $\sigma_{Au1} = 0,131 \times 10^{-13}$ cm²; dan $E_v + 0,55$ eV dengan penampang lintang mikroskopiknya $\sigma_{Au2} = 0,80 \times 10^{-15}$ cm². Hasil ini di dapat dengan mendoping atom-atom Au ke silikon dengan teknologi difusi (tidak dengan Neutron Transmutation Doping). Kemudian

cuplikannya diukur dengan DLTFs [7]. Elektron-elektron pada energi level pada Au ini, akan berinteraksi dengan “conduction band” [lihat rumus 1-12]. Sedangkan “hole” akan berinteraksi dengan “valence band” [lihat rumus 1-14]. Pada teknologi pembuatan daerah intrinsic, kita dapat mendoping phosphor kedalam silikon, biasanya konsentrasi phosphor 10^{14} atom/cm³, hasil doping akan menghasilkan n-Si. Kemudian n-Si ini kita doping kembali dengan Au dengan konsentrasi 10^{14} atom/cm³. Maka akan didapatkan daerah intrinsic dengan teknologi kompensasi yang ideal [1, 7].

Mendoping Mn ke dalam silikon dengan teknologi difusi didapatkan juga beberapa energi level di dalam silikon. Proses difusi dan proses “neutron transmutation doping” adalah dua proses yang berbeda dalam proses difusi atom-atom dopan masuk menyebar kedalam silikon mengikuti hukum Fick [1], yang menyatakan bahwa kerapatan arus listrik sebanding dengan gradien konsentrasi dan juga perubahan konsentrasi pada waktu tertentu sama dengan perubahan arus listrik. Sedangkan pada proses “neutron transmutation doping” prosesnya adalah $^{30}\text{Si}(n, \gamma) \rightarrow ^{31}\text{Si} \xrightarrow{2,6h} ^{31}\text{P} + \beta^-$. Pada teknologi NTD ini didapatkan pula unsur Mn masuk kedalam silikon. Hal ini terdapat juga interaksi elektron-elektron pada energi level Mn ke “conduction band” [lihat rumus 1-12] dan “hole” dari “valence band” [lihat rumus 1-14] ke energi level Mn (E_T dari Mn) [1, 6].

Ga juga di dapatkan salah satu unsur yang masuk ke dalam silikon ketika silikon di irradiasi dengan flux neutron pada fasilitas “neutron transmutation doping”. Ga termasuk satu golongan dengan B, Al, In, Ti dan Ho. Jika atom-atom Ga masuk ke dalam silikon maka

silikon tersebut akan bersifat p-Si [1, 6]. Dengan demikian, jika atom - atom Ga ikut masuk ke dalam silikon, maka harus dipikirkan pula interaksi elektron-elektron di dalam energi level Mn dengan “conduction band” dan “hole” dari “valence band” dengan energi level Mn (E_T dari Mn) [1, 6]. Unsur-unsur yang segolongan dengan Ga jika bahannya dicampur dengan unsur yang segolongan dengan As yaitu N, P, Sb, Bi dan Tm dan membentuk benda padat, maka akan mempunyai sifat semikonduktor. Sebagai contoh di “microelectronic device company” sekarang terus di kembangkan bahan-bahan seperti GaAs, InP dan sebagainya jenis semikonduktor ini biasa di buat untuk CMOS (Complementary Metal Oxid Semiconductor), PMOS, NMOS maupun transistor bipolar. Sedangkan unsur-unsur yang segolongan dengan Zn yaitu Cd, Hg dan Dy jika digabung dengan unsur-unsur yang segolongan dengan Se yaitu O, S, Te, Po, Yb akan mempunyai sifat juga semikonduktor. Seperti diketahui bahwa sifat semikonduktor itu bisa di dapatkan dari proses kimia maupun fisika (biasanya benda padat). ZnSe merupakan jenis semikonduktor yang dapat dibuat “blue diode” dan ini sedang dikembangkan di negara-negara industri.

Jadi unsur-unsur Au, Ga dan Mn mempunyai interaksi elektris aktif dengan atom-atom silikon. Tidak tertutup kemungkinan atom-atom Au, Ga dan Mn juga membentuk molekul kompleks (“cluster”) dengan atom-atom Phosphor. Misalnya AuP-kompleks, GaP-kompleks dan MnP-kompleks [2, 6], maka hal ini harus diteliti lebih lanjut.

KESIMPULAN

Pengukuran dengan MCA (Multi Channel Analyser) di dapatkan hasil bahwa Mn-

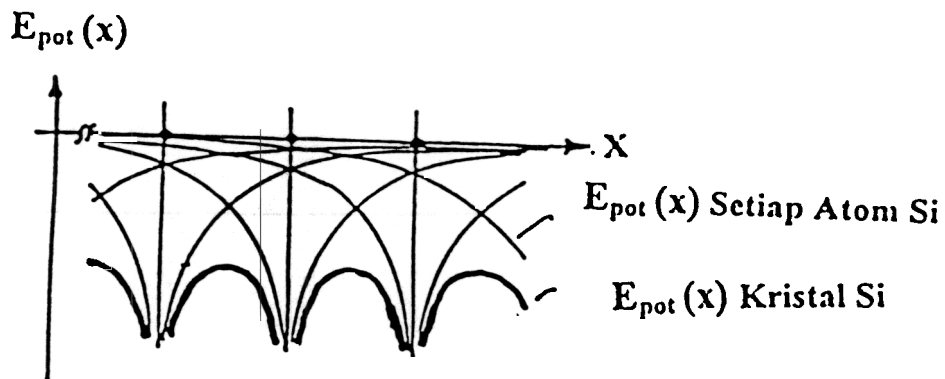
45, Ga-72 dan Au-198 adalah unsur-unsur yang terdapat di dalam silikon setelah cuplikan di iradiasi. Pengukuran dengan DLTFs (Deep Level Transient Fourier Spectroscopy) di dapatkan hasil bahwa tidak unsur-unsur yang terdapat di dalam silikon sebelum di iradiasi. jadi jika kedua hasil pengukuran di bandingkan maka akan dapat disimpulkan bahwa Mn, Au, dan Ga adalah unsur-unsur kontaminasi yang masuk setelah di iradiasi. Besarnya konsentrasi unsur-unsur kontaminasi ini belum diukur, karena harus diukur dengan DLTFs. Unsur-unsur yang konsentrasinya lebih kecil dari 10^{10} atom/cm³ tidak akan mempengaruhi sifat-sifat kelistrikan semikonduktor silikon, karena kecil hampir sama dengan unsur-unsur "impurity" di dalam silikon sendiri.

UCAPAN TERIMA KASIH

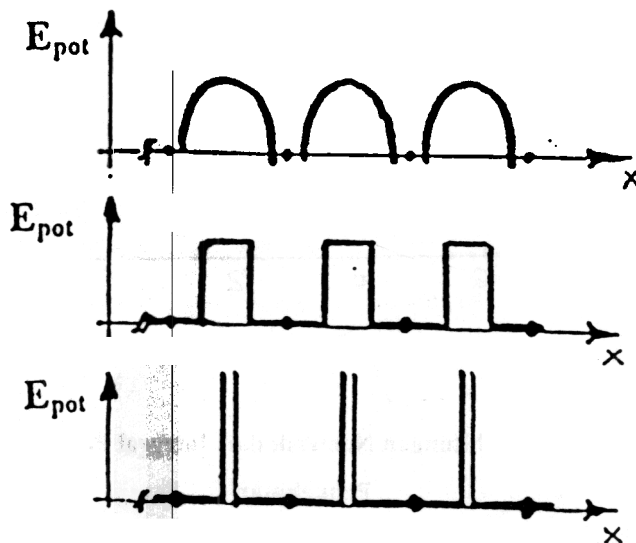
Terima kasih disampaikan kepada Bapak Drs. Amir Hamzah atas bantuannya dalam penulisan makalah.

DAFTAR ACUAN

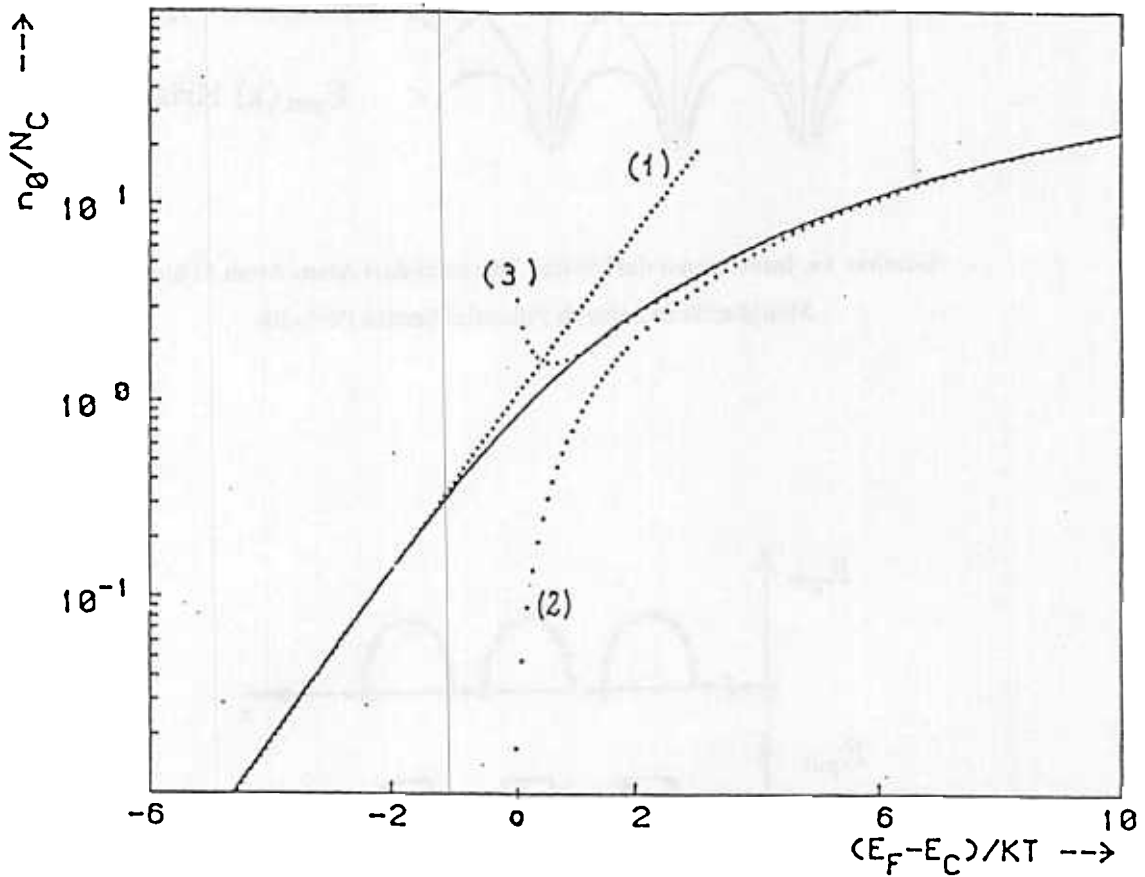
1. R. KASSING, Prof. Dr. : Vorlesungsskript, Universitat Munster, 1975.
2. U. SUDJADI, S. WEISS, A. BOCK and R. KASSING : "Investigation of a Pd-Au complex in n-type silicon with the DLTFs - Techniques"; in *Physica Status Solidi (a)*, Vol: 149, No. 2 (1995).
3. Z. SPIKA et al. (Universitat Marburg), S. WEISS, U. SUDJADI, A. BOCK und R. KASSING: "Untersuchung tiefer Storstellen in GaAs - Volumenkristallschichten hergestellt mit der neuartigen, alternativen Gruppe-V-Quelle Diethylterti-arbutyl-arsen (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, 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.
6. U. SUDJADI: "Untersuchungen an Pd-, Cu-, Ag-korrelierten Storstellen sowie Pd-Fe und Pd-Au-Komplexen in Si mit Hilfe des DLTFs-Verfahrens", Ph.D thesis, "Universitat Gesamthochschule Kassel", Kassel, Germany, 1995.
7. U. SUDJADI: "Study on the Diffusion of Au in n-Si for Preparing p⁺in⁺ Diodes"; A paper presented at the STMDP Meeting, Delf-Netherland, 1991.



Gambar 1a. Interferensi dari Setiap Potensial dari Atom-Atom Si akan Menghasilkan Seluruh Potensial Secara Periodik



Gambar 1b. Mempermudah Potensial Periodik



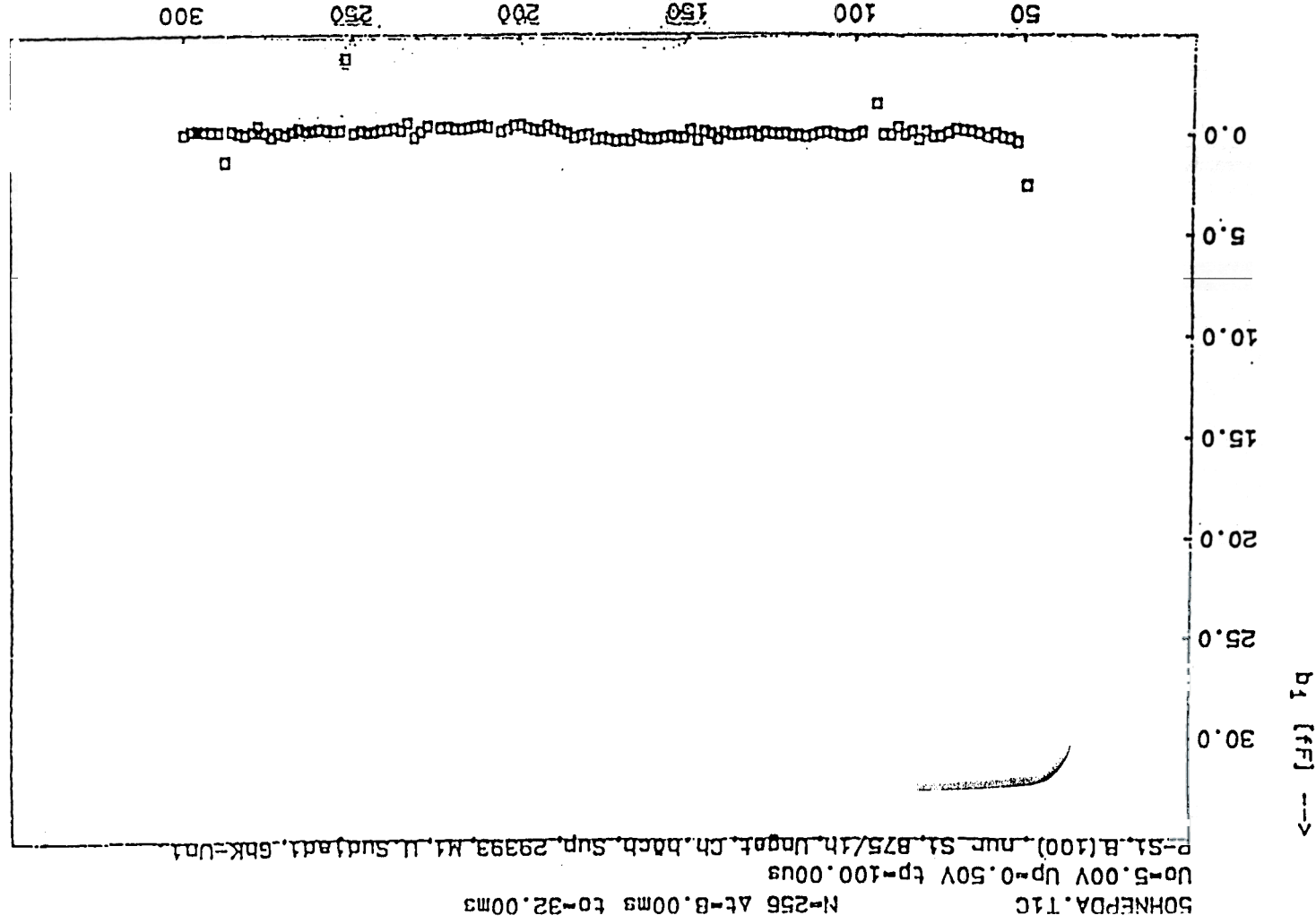
Gambar 2. Perhitungan Numerik dari Integral Persamaan (9).

Pendekatan :

1. $n/N = \exp\{-(E_c - E_f)/kT\}$

2. $n/N \sim (E_c - E_f)^{3/2}$

3. $n/N_c \sim (E_c - E_f)^{3/2}$ [1]



DLTS Cuplikan Silikon Unsur-Kontaminasi dengan

Gambar 3. Hasil pengukuran Unsur-Unsur Kontaminasi dengan

