

EFEK IMPLANTASI ION BORON TERHADAP SIFAT LISTRIK SEMIKONDUKTOR Si TIPE N

Lely Susita R.M., B.A. Tjipto Sujitno
P3TM-BATAN Yogyakarta

ABSTRAK

EFEK IMPLANTASI ION BORON TERHADAP SIFAT LISTRIK SEMIKONDUKTOR Si TIPE N. Telah dilakukan penelitian tentang efek implantasi ion boron terhadap sifat kelistrikan semikonduktor silikon tipe N. Tujuan penelitian ini adalah untuk memperbaiki sifat kelistrikan semikonduktor silikon yang meliputi resistivitas keping, kapasitansi dan tegangan dadal, dengan cara menyisipkan ion-ion boron menggunakan teknik implantasi ion pada energi 40 keV, 80 keV dan 100 keV, dan variasi dosis dari $1,49 \times 10^{15}$ ion/cm² – $17,89 \times 10^{15}$ ion/cm². Untuk mengurangi kerusakan radiasi dan menempatkan ion-ion boron pada letak kisi aktif secara listrik maka semikonduktor silikon yang diimplantasi dengan ion boron dianil pada suhu 900 °C selama 30 menit.. Berdasarkan analisa data hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat kelistrikan dari silikon setelah diimplantasi dengan ion boron ditentukan oleh besarnya dosis dan energi ion. Nilai resistivitas terkecil pada energi 40 keV adalah 104,53 ohm/cm² untuk dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², pada energi 80 keV adalah 107,93 ohm/cm² untuk dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², dan nilai resistivitas terkecil pada energi 100 keV adalah 91,18 ohm/cm² pada dosis $17,89 \times 10^{15}$ ion/cm². Nilai kapasitansi per satuan luas terbesar pada energi 40 keV adalah 570,33 pF/cm² untuk dosis $8,95 \times 10^{15}$ ion/cm², pada energi 80 keV adalah 439,39 pF/cm² untuk dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², serta pada energi 100 keV adalah 590,02 pF/cm² untuk dosis $17,89 \times 10^{15}$ ion/cm². Tegangan dadal terbesar pada energi 40 keV dan 80 keV masing-masing adalah 15,13 volt dan 14,82 volt untuk dosis $8,95 \times 10^{15}$ ion/cm², sedangkan tegangan dadal terbesar pada energi 100 keV adalah 22,9 volt untuk dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm².

ABSTRACT

EFFECT OF BORON ION IMPLANTATION ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF N TYPE SILICON SEMICONDUCTOR. It has been carried out research on the effect of boron ion implantation on electrical properties of N type silicon semiconductor. The objective of the research is to study the electrical properties of N type silicon semiconductor implanted with boron ion for ion dose from 1.49×10^{15} ion/cm² up to 17.89×10^{15} ion/cm² and energy 40 keV, 80 keV and 100 keV. After ion implantation process, the samples were annealed for 30 minutes at 900 °C. The purpose of the annealing process is to reduce the radiation damage and make the implanted samples active electrically. The electrical properties studied cover the sheet resistivities, capacitance and breakdown voltage of the junction. Based on the results, it can be concluded that electrical properties depend on the value of ion dose and energy. The lowest resistivity in order of 104.53 ohm/cm² was achieved at ion dose 4.47×10^{15} ion/cm² and energy 40 keV, in order of 107.93 ohm/cm² was achieved at ion dose 4.47×10^{15} ion/cm² and energy 80 keV, and in order of 91.18 ohm/cm² was achieved at ion dose 17.89×10^{15} ion/cm² and energy 100 keV. The biggest capacitance per unit area in order of 570.33 pF/cm² was achieved at ion dose 8.95×10^{15} ion/cm² and energy 40 keV, in order of 439.39 pF/cm² was achieved at ion dose 8.95×10^{15} ion/cm² and energy 80 keV, and in order of 590.02 pF/cm² was achieved at ion dose 17.89×10^{15} ion/cm² and energy 100 keV. The biggest breakdown voltage for energy 40 keV and 80 keV and ion dose 8.95×10^{15} ion/cm² are 15.13 volt and 14.82 volt respectively. While the biggest breakdown voltage in order of 22.9 volt was achieved at ion dose 4.47×10^{15} ion/cm² and energy 100 keV.

PENDAHULUAN

Semikonduktor merupakan bahan penting dalam teknologi elektronika dan mikroelektronika. Ada dua jenis semikonduktor, yaitu semikonduktor intrinsik (contoh silikon dan germanium) dimana sifat-sifat kelistrikannya ditentukan oleh sifat-sifat asli yang terdapat pada unsur itu sendiri dan semikonduktor ekstrinsik yang diperoleh dengan memberikan ketidakmurnian pada semikonduktor intrinsik dengan unsur yang valensinya lebih besar atau lebih kecil dari semikonduktor intrinsik^[1].

Bahan baku yang dipergunakan dalam industri semikonduktor pada saat ini ialah silikon (Si). Germanium (Ge) terkenal sebagai bahan yang dipergunakan sepuluh tahun yang lalu, karena Ge jarang ditemukan dan sebagai komponen elektronik Ge tidak dapat dioperasikan pada suhu kamar dan biasanya perlu didinginkan dengan nitrogen cair. Setelah silikon sering digunakan semikonduktor paduan (*compound*) seperti Ga As dan GaP untuk komponen dengan sifat khusus misalnya laser dan LED (*Light Emitting Diode*)^[2].

Semikonduktor intrinsik perlu disisipi dengan unsur ketidakmurnian agar supaya sifat-sifat kelistrikannya sesuai dengan yang

dikehendaki untuk fabrikasi piranti semikonduktor. Untuk membuat semikonduktor tipe P (dimana pembawa muatannya didominasi oleh hole) atau tipe N (pembawa muatannya didominasi oleh elektron), maka semikonduktor intrinsik tersebut harus disisipi dengan unsur-unsur dari Grup III atau Grup V pada Tabel Periodik. Proses penyisipan unsur ketidakmurnian pada semikonduktor dinamakan doping dan unsur ketidakmurnian disebut dopan. Sifat-sifat dopan dan tipe konduksi semikonduktor Si dan Ge disajikan pada Tabel 1.

Proses doping dapat dilakukan dengan cara difusi, epitaksi, paduan atau implantasi. Dalam tahun-tahun terakhir ini, implantasi ion telah dikembangkan sebagai proses baru untuk doping kristal semikonduktor. Dengan teknik implantasi ion dapat difabrikasi piranti elektronik maupun mikroelektronik dari yang paling sederhana seperti diode hingga yang paling kompleks seperti rangkaian terpadu (IC) berbasis MOS (Metal Oxide Semiconductor) atau CMOS (Complementary MOS) yang berupa MSI (Medium Scale Integrated), LSI (Large Scale Integrated), VLSI (Very Large Scale Integrated) dan ULSI (Ultra Large Scale Integrated). Komponen-komponen ini banyak digunakan dalam bidang telekomunikasi dan informatika^[3].

Tabel 1. Sifat dopan dan tipe konduksi semikonduktor Si dan Ge.

Unsur Dopan	No. Valensi	No. Atom	Energi ionisasi (eV) untuk menimbulkan pembawa bebas		Fungsi	Tipe Konduksi
			Ge	Si		
Grup III						
B	3	5	0,0104	0,045	Aseptor	P
Al	3	13	0,0102	0,057	Aseptor	P
Ga	3	31	0,0108	0,065	Aseptor	P
In	3	49	0,0112	0,160	Aseptor	p
Grup V						
P	5	15	0,0120	0,044	Donor	N
As	5	33	0,0127	0,049	Donor	N
Sb	5	51	0,0096	0,039	Donor	N

Implantasi ion memberikan suatu metode alternatif untuk menyisipkan hampir setiap atom-atom dopan pada permukaan semikonduktor. Kontaminasi pada permukaan semikonduktor jauh lebih rendah dibandingkan dengan teknik konvensional. Energi dan dosis ion dopan dapat dikontrol dengan presisi tinggi. Namun pada teknik ini sebagai akibat implantasi ion, akan menyebabkan kerusakan radiasi (*radiation damage*) pada kisi-kisi kristal semikonduktor dan bahkan kadang-kadang terjadi pembentukan daerah amorf^[4,5]. Oleh karena itu perlu dilakukan proses anil untuk memulihkan kisi-kisi kristal dan untuk menempatkan ion-ion dopan pada letak kisi aktif secara listrik.

Parameter-parameter yang mempengaruhi hasil implantasi ion antara lain energi dan dosis ion dopan, massa atau jenis ion dopan, dan massa atau jenis atom bahan yang akan diimplantasi. Dalam penelitian ini akan dipelajari pengaruh parameter energi dan dosis ion dopan (boron) terhadap sifat kelistrikan bahan semikonduktor silikon tipe N.

TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Dalam proses implantasi ion pada permukaan semikonduktor, sifat-sifat semikonduktor dipengaruhi oleh beberapa parameter antara lain dosis dan energi ion dopan, distribusi jangkauan dari ion-ion yang terimplantasi dan distribusi kerusakan radiasi dari kisi kristal yang diakibatkan proses tumbukan ion-ion dopan dengan atom-atom semikonduktor. Dopan bervalensi lima dapat memberikan satu ke-lebihan hole sebagai pembawa muatan positif untuk membentuk semikonduktor tipe P^[4].

Selama proses implantasi, ion-ion boron masuk ke dalam bahan semikonduktor silikon kemudian berhenti pada posisi acak dalam kisi-kisi kristal, dan terjadi kerusakan radiasi akibat tumbukan antara ion-ion boron yang berenergi tinggi dengan bahan semikonduktor. Oleh karena itu sesudah proses implantasi dilakukan pemanasan (*annealing*) untuk memulihkan kisi-kisi kristal dan untuk menempatkan ion-ion yang terimplantasi pada letak kisi yang aktif secara listrik (*electrical active lattice sites*). Suhu yang biasa digunakan untuk proses anil

bervariasi antara 450 °C – 1000 °C selama 15 – 30 menit^[5]. Sedangkan menurut Rysel dan Ruge untuk implantasi ion boron ke dalam silikon pada energi rendah (di bawah 100 keV), digunakan suhu anil sekitar 650 °C selama 30 menit. Pemanasan pada suhu sekitar 900 °C menurut Sansbury terjadi pemulihan pembawa muatan secara penuh untuk implantasi ion boron ke dalam silikon. Kelakuan anil pada lapisan hasil implantasi sangat bergantung pada dosis implantasi. Bertambahnya dosis akan diikuti dengan bertambahnya tingkat kerusakan radiasi, sehingga diperlukan suhu anil yang tinggi untuk mencapai tingkat aktif secara listrik dari kisi-kisi kristal. Selama proses anil, dialirkan gas nitrogen dengan kecepatan 1 liter/menit untuk menghindari oksidasi pada cuplikan.

Karakterisasi dari cuplikan semikonduktor silikon yang diimplantasi dengan ion boron berupa pengukuran sifat kelistrikan yang meliputi pengukuran resistivitas keping, kapasitansi dan tegangan dadal.

Pengukuran Resistivitas Keping

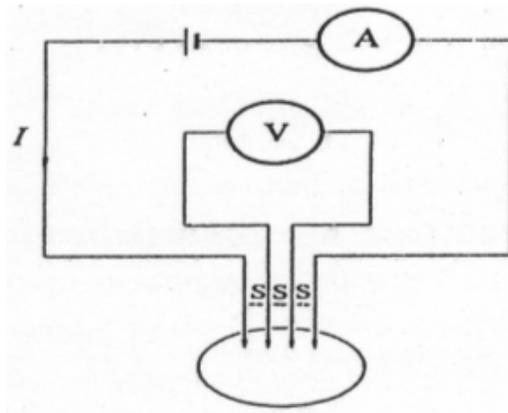
Untuk mengukur resistivitas keping digunakan metode probe empat titik yang dikembangkan oleh Valdes, Smits dan Severin. Pada metode ini terdapat lima hal yang menyebabkan kesalahan pengukuran yaitu kebocoran arus, efek permukaan, pemanasan cuplikan, tekanan yang diakibatkan pada pengukuran dengan probe dan efek geometri.

Dari kelima penyebab kesalahan tersebut, menurut Smits hanya efek geometri yang telah diperhitungkan secara kuantitatif. Skema dari probe empat titik (*Four Point Probe*) ditunjukkan pada Gambar 1.

Resistivitas keping dari suatu lapisan tipis dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut

$$\rho_s = C (V/I)$$

dengan ρ_s adalah resistivitas keping (ohm/luas), C adalah faktor koreksi geometri cuplikan yang bergantung pada ketebalan lapisan, dimensi cuplikan dan jarak antar probe, V adalah tegangan yang terukur dan I adalah arus yang dialirkan pada cuplikan.



Keterangan

A : Ampere meter

V : Volt meter

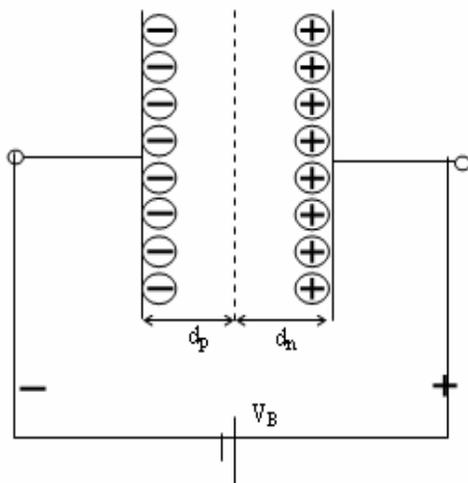
I : Arus

S : Jarak antara jarum probe

Gambar 1. Skema probe empat titik.

Pengukuran Kapasitansi Lapisan Depleksi

Cuplikan yang telah diimplantasi akan menjadi sambungan P-N. Pada masing-masing tepi sambungan dalam lapisan depleksi terdapat penumpukan muatan negatif dan positif, sehingga dapat dianggap sebagai kapasitor. Setiap cuplikan yang telah membentuk sambungan P-N diukur kapasitansinya dengan LCR meter. Skema sambungan P-N dengan tegangan V_B diberikan pada ujung-ujungnya ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema lapisan depleksi pada sambungan P-N.

Dengan menganggap sebagai kapasitor plat sejajar maka kapasitansi pada lapisan depleksi dapat ditentukan dari persamaan^[2]

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0}{d_n + d_p} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{d} \tag{1}$$

dimana

$$d_p = \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 V_B}{q \left(\frac{1}{N_A + N_D} \right)}} \tag{2}$$

$$d_n = \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 V_B}{q \left(\frac{1}{N_A + N_D} \right)}} \tag{3}$$

dengan N_D : konsentrasi donor, N_A : konsentrasi aseptor

Lebar lapisan depleksi

$$\begin{aligned} d = d_n + d_p &= \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right) \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 V_B}{q \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 V_B}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \end{aligned} \tag{4}$$

Dalam keadaan sebenarnya

$$d \approx \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 V_B}{q N_D}} \approx d_n \text{ bila } N_A \gg N_D \quad (5)$$

$$d \approx \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 V_B}{q N_A}} \approx d_p \text{ bila } N_A \ll N_D \quad (6)$$

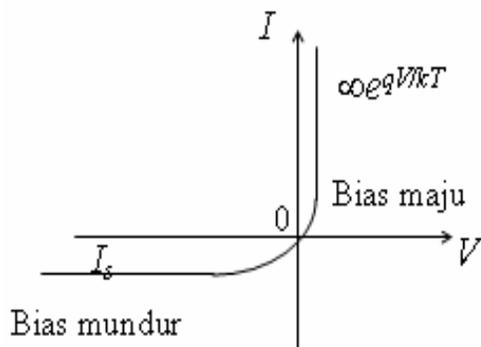
Dengan kata lain, lapisan deplesi lebih lebar pada daerah dengan konsentrasi ion dopan lebih rendah

Pengukuran Tegangan Dadal

Tegangan dadal diperoleh dari karakteristik arus-tegangan. Karakteristik arus-tegangan dari sambungan P-N dapat dinyatakan dengan persamaan

$$I = I_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (7)$$

dengan I_s adalah arus jenuh, k adalah konstanta Boltzmann dan T adalah temperatur absolut. Persamaan karakteristik arus-tegangan tersebut dapat dilukiskan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Karakteristik arus-tegangan dari sambungan P-N.

Pada sambungan P-N dapat terjadi peningkatan arus yang besar pada tegangan bias mundur sebesar V_B (disebut tegangan dadal). Menurut persamaan (4), semakin besar tegangan bias mundur yang diberikan pada sambungan P-

N, semakin lebar lapisan deplesinya. Jika sebuah elektron yang merupakan pembawa pertama, memasuki lapisan deplesi dari daerah tipe P, dipercepat dan mendapatkan energi kinetis, akan menghasilkan sebuah pasangan elektron dan *hole*, yang kemudian dipercepat dan menghasilkan pasangan elektron dan hole yang lain, dan seterusnya memperbanyak pembawa bebas, menyebabkan peningkatan arus yang besar.

Besarnya tegangan dadal dari sambungan P-N hasil implantasi ion boron pada semikonduktor silikon dapat diukur dengan menghubungkan tegangan bias mundur pada sambungan P-N sampai terjadi peningkatan arus maksimum. Jika diberikan tegangan melebihi besar tegangan dadal, maka sambungan P-N tersebut menjadi rusak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Bahan atau cuplikan semikonduktor yang digunakan adalah silikon tipe N dengan luas permukaan tertentu yang diimplantasi dengan ion boron pada berbagai variasi dosis dan energi ion dopan sebagai berikut :

1. Variasi dosis ion : $1,49 \times 10^{15}$ ion/cm², $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², $8,95 \times 10^{15}$ ion/cm², $13,42 \times 10^{15}$ ion/cm², dan $17,89 \times 10^{15}$ ion/cm².
2. Variasi energi ion : 40 keV, 80 keV, dan 100 keV

Untuk mendapatkan parameter proses implantasi ion dopan dilakukan perhitungan teoritis dan simulasi dengan program TRIM 96. Hasil perhitungan ini ditampilkan pada Tabel 2, dan dari data-data tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk memprediksi distribusi jangkau dari ion-ion yang terimplantasi dan distribusi kerusakan radiasi dari kisi kristal yang diakibatkan proses tumbukan ion-ion dopan dengan atom-atom semikonduktor.

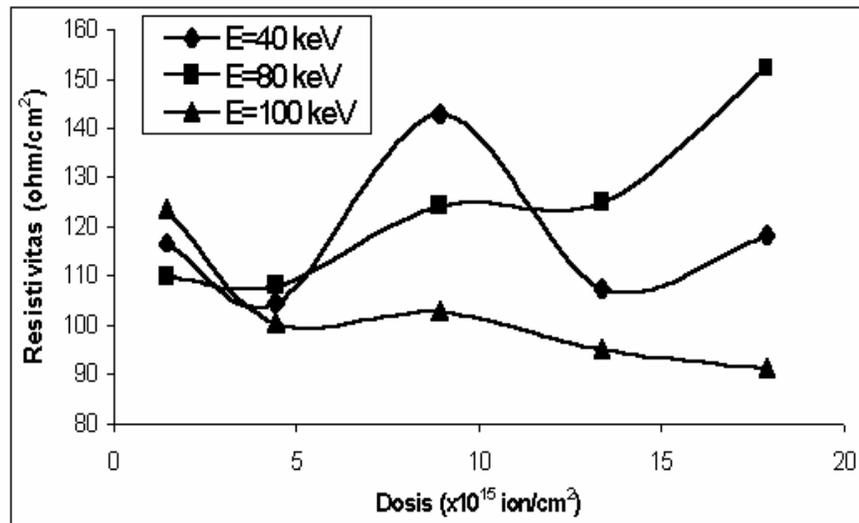
Cuplikan semikonduktor silikon yang telah diimplantasi dengan ion boron dianil pada suhu 900 °C selama 30 menit untuk memulihkan kisi-kisi kristal dan untuk menempatkan ion-ion boron pada letak kisi yang aktif secara listrik.

Tabel 2. Parameter hasil proses implantasi ion boron.

No. Cuplikan	Energi	Dosis	Konsentrasi boron
1	40 keV	$1,49 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$1,26 \times 10^{19}$ ion/cm ³
2		$4,47 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$3,77 \times 10^{19}$ ion/cm ³
3		$8,95 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$7,55 \times 10^{19}$ ion/cm ³
4		$13,42 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$11,31 \times 10^9$ ion/cm ³
5		$17,89 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$15,51 \times 10^{19}$ ion/cm ³
6	80 keV	$1,49 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$0,84 \times 10^{19}$ ion/cm ³
7		$4,47 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$2,52 \times 10^{19}$ ion/cm ³
8		$8,95 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$5,05 \times 10^{19}$ ion/cm ³
9		$13,42 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$7,57 \times 10^9$ ion/cm ³
10		$17,89 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$10,10 \times 10^{19}$ ion/cm ³
11	100 keV	$1,49 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$0,77 \times 10^{19}$ ion/cm ³
12		$4,47 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$2,31 \times 10^{19}$ ion/cm ³
13		$8,95 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$4,63 \times 10^{19}$ ion/cm ³
14		$13,42 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$6,95 \times 10^9$ ion/cm ³
15		$17,89 \times 10^{15}$ ion/cm ²	$9,26 \times 10^{19}$ ion/cm ³

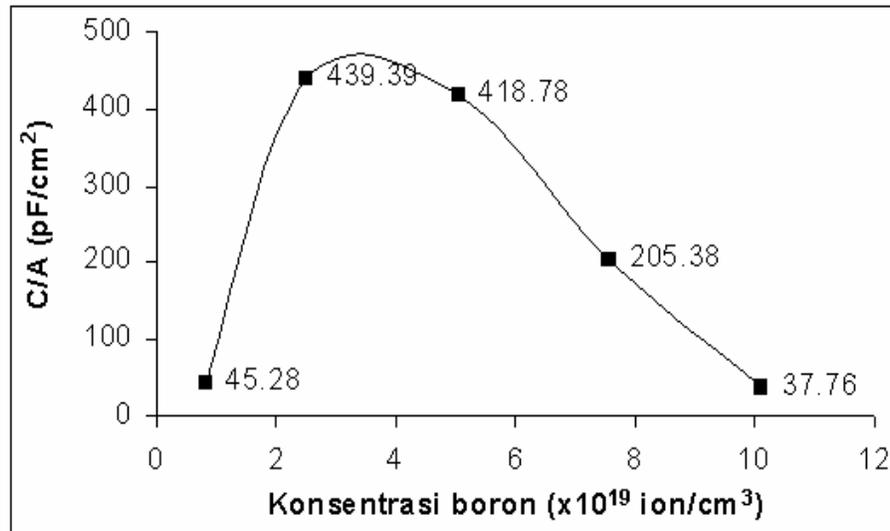
Karakterisasi dari cuplikan semikonduktor silikon setelah dianil berupa pengukuran sifat kelistrikan yang meliputi nilai resistivitas keping, kapasitansi dan tegangan dadal. Nilai resistivitas keping dari silikon diukur dengan menggunakan probe empat titik (*four point*

probe) tipe FPP-5000, VEECO. Grafik hubungan antara dosis ion boron dan nilai resistivitas keping dari silikon untuk energi 40 keV, 80 keV, dan 100 keV ditunjukkan pada Gambar 4.

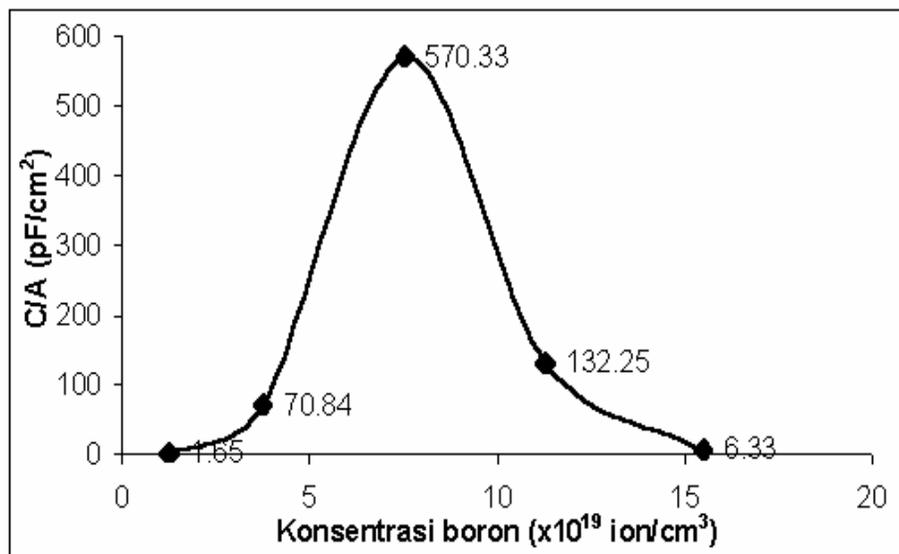
**Gambar 4. Pengaruh dosis ion boron terhadap resistivitas keping dari silikon.**

Setiap cuplikan yang telah membentuk sambungan P-N diukur kapasitansinya dengan LCR meter digital tipe 4271B yang beroperasi pada tegangan 220 volt. Grafik hubungan

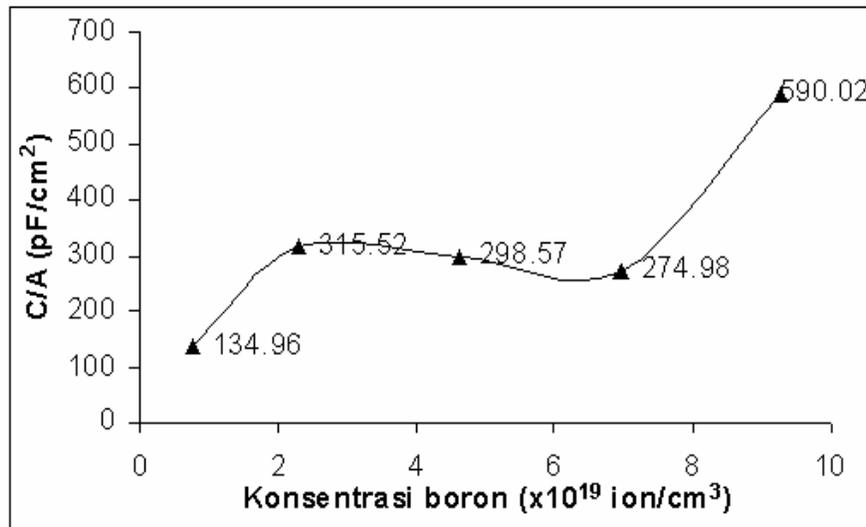
antara konsentrasi boron dan nilai C/A (kapasitansi per satuan luas) ditampilkan pada Gambar 5 - 7.



Gambar 5. Pengaruh konsentrasi boron terhadap nilai C/A pada energi 40 keV.



Gambar 6. Pengaruh konsentrasi boron terhadap nilai C/A pada energi 80 keV.



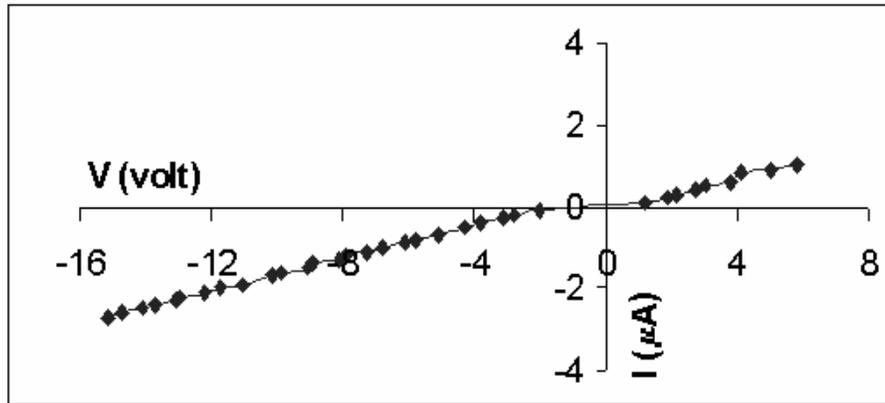
Gambar 7. Pengaruh konsentrasi boron terhadap nilai C/A pada energi 100 keV.

Tegangan dadal untuk masing-masing cuplikan diperoleh dari karakteristik arus-tegangan. Nilai tegangan dadal untuk masing-masing cuplikan yang telah membentuk sambungan P-N disajikan pada Tabel 3,

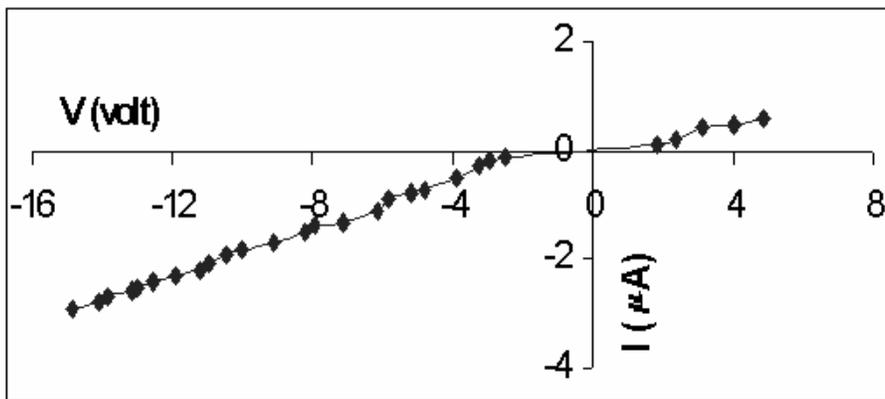
sedangkan grafik hubungan V-I dengan hambatan dadal terbesar untuk energi 40 keV, 80 keV, dan 100 keV ditunjukkan pada Gambar 8 - 10.

Tabel 3. Nilai tegangan dadal.

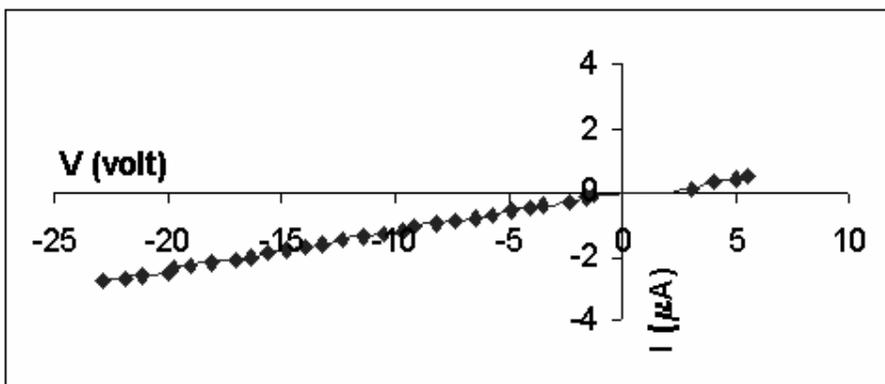
No. Cuplikan	Energi	Dosis	Tegangan Dadal
1	40 keV	$1,49 \times 10^{15}$ ion/cm ²	8,69 volt
2		$4,47 \times 10^{15}$ ion/cm ²	6,87 volt
3		$8,95 \times 10^{15}$ ion/cm ²	15,13 volt
4		$13,42 \times 10^{15}$ ion/cm ²	11,14 volt
5		$17,89 \times 10^{15}$ ion/cm ²	12,74 volt
6	80 keV	$1,49 \times 10^{15}$ ion/cm ²	11,97 volt
7		$4,47 \times 10^{15}$ ion/cm ²	12,06 volt
8		$8,95 \times 10^{15}$ ion/cm ²	14,82 volt
9		$13,42 \times 10^{15}$ ion/cm ²	11,15 volt
10		$17,89 \times 10^{15}$ ion/cm ²	10,40 volt
11	100 keV	$1,49 \times 10^{15}$ ion/cm ²	13,40 volt
12		$4,47 \times 10^{15}$ ion/cm ²	22,90 volt
13		$8,95 \times 10^{15}$ ion/cm ²	10,28 volt
14		$13,42 \times 10^{15}$ ion/cm ²	15,28 volt
15		$17,89 \times 10^{15}$ ion/cm ²	18,77 volt



Gambar 8. Grafik hubungan V-I untuk dosis $8,95 \times 10^{15}$ ion/cm² dan energi 40 keV.



Gambar 9. Grafik hubungan V-I untuk dosis $8,95 \times 10^{15}$ ion/cm² dan energi 80 keV.



Gambar 10. Grafik hubungan V-I untuk dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm² dan energi 100 keV.

Pembahasan

Dalam penelitian ini telah dilakukan implantasi ion boron pada permukaan bahan semikonduktor silikon tipe N untuk berbagai nilai dosis dan energi ion. Boron dalam teknologi semikonduktor merupakan unsur dopan untuk pembentukan lapisan tipe P. Oleh karena itu dalam proses implantasi ion boron pada semikonduktor tipe N terbentuk sambungan P-N. Dari hasil eksperimen menunjukkan bahwa sifat aktif listrik secara penuh dari silikon setelah diimplantasi dengan ion boron ditentukan oleh besarnya dosis dan energi ion.

Pada grafik hubungan antara dosis ion boron dan nilai resistivitas keping yang disajikan pada Gambar 4 terlihat bahwa pada energi 40 keV dan 80 keV, nilai resistivitas keping masih meningkat dengan bertambahnya dosis, sedangkan pada energi 100 keV diperoleh nilai resistivitas keping yang hampir konstan pada keadaan aktif listrik secara penuh. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

Pada energi 40 keV dan 80 keV untuk dosis yang sama, konsentrasi ion boron yang terdistribusi pada permukaan silikon lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi ion boron pada energi 100 keV (seperti terlihat pada Tabel 1), dan konsentrasi ion boron yang besar dapat mengakibatkan terjadinya cacat-cacat yang lebih kompleks, yang secara bertahap saling tumpang tindih dan kadang-kadang membentuk daerah amorf. Sedangkan pada energi 100 keV akan dihasilkan cacat-cacat sederhana. Pada energi 100 keV terlihat bahwa nilai resistivitas keping menurun dengan bertambahnya ketidakmurnian. Hal tersebut sesuai dengan teori bahwa dengan bertambahnya dosis maka konsentrasi ion boron yang terimplantasi pada silikon semakin besar sehingga pembawa muatan yang berdifusi semakin banyak. Hal ini menyebabkan perubahan pada pita konduksi dan pita valensi, yaitu naiknya pita konduksi dan turunnya pita valensi, sehingga mobilitas elektron semakin besar dan resistivitas bahan semakin kecil. Dari Gambar 4 terlihat bahwa pada energi 100 keV terjadi penurunan nilai resistivitas keping yang hampir konstan pada keadaan aktif listrik secara penuh dengan nilai resistivitas keping yang paling kecil adalah 91,18 ohm/cm² untuk dosis $17,89 \times 10^{15}$ ion/cm².

Pada sambungan P-N terjadi daerah deplesi. Hal ini dapat dijelaskan sebagai

berikut. Pada sambungan P-N terdapat gradien konsentrasi, maka *hole* dan elektron yang merupakan pembawa muatan bebas akan berdifusi ke daerah yang mempunyai konsentrasi lebih rendah dan saling berekombinasi. Setelah terdapat keseimbangan maka terciptalah medan listrik internal yang menghambat gerakan pembawa muatan untuk berdifusi lebih lanjut dan akhirnya terbentuklah pengkutuban muatan, sehingga sistim tersebut seolah-olah membentuk sistim kapasitor sejajar yang dipisahkan oleh lapisan yang tidak ada muatan bebasnya, lapisan dimana pembawa muatan tadi saling berekombinasi dinamakan lapisan kosong muatan bebas dan sering disebut lapisan deplesi (*depletion layer*).

Hubungan antara konsentrasi boron dengan nilai kapasitansi per satuan luas, C/A , (seperti terlihat pada Gambar 5 - 7) menunjukkan bahwa pada energi 40 keV dan 80 keV terjadi penyimpangan yang sangat besar, hal ini mungkin disebabkan karena adanya efek pengkanalan selama proses implantasi. Pengkanalan pada umumnya tidak bermanfaat pada pembentukan sifat kelistrikan dari bahan silikon yang diimplantasi dengan ion boron, karena profil hasil pengkanalan sangat sensitif pada penyejajaran lintasan ion boron yang datang relatif terhadap sumbu kristal^[1]. Grafik hubungan antara konsentrasi boron dan C/A pada energi 100 keV sudah mendekati teori, karena pada energi yang lebih besar, konsentrasi boron lebih rendah sehingga lapisan deplesinya semakin lebar dan dengan demikian nilai kapasitansinya semakin besar.

Pengukuran tegangan dadal diperlukan untuk menentukan tegangan maksimum yang dapat digunakan pada sambungan P-N. Dari 15 cuplikan yang telah membentuk sambungan P-N diperoleh tegangan dadal terbesar pada energi 100 keV sebesar 22,9 volt untuk dosis ion $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², sedangkan tegangan dadal terbesar pada energi 40 keV dan 80 keV masing-masing sebesar 15,13 volt dan 14,82 volt untuk dosis $8,95 \times 10^{15}$ ion/cm².

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen dan pembahasan seperti yang telah diuraikan di atas

dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- Implantasi ion boron pada silikon tipe N akan membentuk sambungan P-N. Perubahan sifat kelistrikan dari semikonduktor silikon yang diimplantasi dengan ion boron sangat ditentukan oleh energi dan dosis ion.
- Pada energi 100 keV terjadi penurunan nilai resistivitas keping yang hampir konstan pada keadaan aktif listrik secara penuh dengan nilai resistivitas keping terkecil adalah $91,18 \text{ ohm/cm}^2$ untuk dosis $17,89 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$.
- Nilai kapasitansi per satuan luas terbesar terjadi pada energi 100 keV dan dosis $17,89 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ yaitu sebesar $590,02 \text{ pF/cm}^2$.
- Tegangan dadal terbesar dari sambungan P-N terjadi pada energi 100 keV dan dosis $4,47 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ yaitu sebesar 22,9 volt.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya penelitian ini, Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Al. Sunarto yang telah membantu dalam proses implantasi dan karakterisasinya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SUDJATMOKO, *Aplikasi Teknik Implantasi Ion dalam Doping Bahan Semikonduktor dan Non Semikonduktor untuk Menghasilkan Bahan dengan Sifat Unggul*, Laporan RUT III Bidang Ilmu Bahan, 1998.
- [2] REKA RIO, S., MASAMORI IIDA, *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*, Jakarta, 1980.
- [3] B.A. TJIPTO SUJITNO, *Aplikasi Implantasi Ion untuk Non Semikonduktor dan Semikonduktor*, ATA-03, 2003.
- [4] JILES, D., *Introduction to Electronic Properties of Materials*, Chapman & Hall, London, 1994.

- [5] SANSBURY, J., *Ion Implantation and Its Contribution to Device and Integrated Circuits Technology*, Varian SpA, Italy, 1978.

TANYA JAWA

Sri Rinanti Susilowati

- Apakah tujuan dari penelitian tersebut dan manfaat apakah yang dapat diperoleh (aplikasi)?

Lely Susita R.M

- Tujuan dari penelitian ini adalah membuat sambungan P-N beserta karakteristiknya seperti arus dadal maupun tegangan dadalnya (*break down voltage*). Sambungan P-N merupakan komponen elektronik yang paling sederhana misalnya dioda maupun sel surya. Komponen-komponen elektronik yang lebih kompleks seperti rangkaian terpadu IC (*Integrated Circuit*) dalam bentuk *chip-chip* maupun *microchip*, merupakan kumpulan dari berjuta-juta sambungan P-N.

Suprpto

- Pada umumnya potensial barrier silika 0,3 V dan untuk arus reverse akan terjadi jika melampaui *breakdown voltage*, bagaimana hubungan hasil karakterisasi hasil implantasi dibanding hal tersebut diatas.

Lely Susita R.M

- Potensial barrier silikon merupakan tegangan barrier (penghalang) yang merupakan sifat intrinsik material sehingga agar komponen tersebut mampu menghantarkan arus listrik, maka tegangan luar minimal yang diperlukan haruslah $\geq 0,3 \text{ V}$ (untuk silikon). Sedangkan *breakdown voltage* (tegangan dadal) merupakan tegangan dalam mana dadal (*breakdown*) terjadi dan arus meningkat secara tajam dan tidak dapat dikontrol.