

IMPLANTASI ION Ag PADA SAMBUNGAN PN UNTUK PEMBUATAN KONTAK OHMIK

Sri Sulamdari

Puslitbang Teknologi Maju - BATAN

ABSTRAK

IMPLANTASI ION Ag PADA SAMBUNGAN PN UNTUK PEMBUATAN KONTAK OHMIK. Implantasi ion Ag pada sambungan PN untuk pembuatan kontak ohmik telah dilakukan dengan menggunakan implantor ion 150 keV. Untuk keperluan ini kawat perak (Ag) murni diionisasi di dalam sumber ion katode panas. Sebelum diimplantasi, potongan wafer Si (1 x 1) cm² dicuci dengan aseton dan alkohol kemudian di etsa dengan larutan CP-4A. Implantasi dari wafer Si dilakukan pada dosis ion dan tenaga maupun suhu anil secara bervariasi. Langkah pertama, dosis ion dilakukan dengan variasi dari 10¹³ ion/cm² naik sampai 10¹⁶ ion/cm², tenaga 50 keV, dan suhu anil 500^o C selama 30 menit. Pada kondisi ini, didapat kondisi optimum dari variasi dosis dan kondisi optimum, sampel-sampel diimplantasi untuk variasi tenaga, contohnya 10 keV naik sampai 60 keV dan di anil pada 500^o C selama 30 menit (langkah kedua). Pada kondisi-kondisi optimum dari dosis ion dan tenaga, sampel-sampel dianil pada variasi suhu, contohnya 300^o C naik sampai 850^o C selama 30 menit. Kondisi-kondisi optimum dari dosis ion, tenaga dan suhu anil ditentukan dari pengukuran resistivitas-resistivitasnya menggunakan probe 4 titik (FPP 5000). Pengaruh dari kontak ohmik Ag pada karakteristik PN junction dilihat pada pengukuran karakteristik I-V dari junction (bias maju dan bias mundur) dan juga tegangan dadalnya. Diperoleh hasil bahwa tahanan lapis wafer silikon tipe P turun dengan naiknya dosis ion Ag sampai 5 x 10¹⁴ ion/cm² dan meningkat tajam di atas 5 x 10¹⁴ ion/cm². Resistansi lapis juga turun tajam dengan naiknya tenaga dan suhu anil. Tahanan lapis minimum dari wafer silikon tipe P dicapai pada dosis ion 5 x 10¹⁴ ion/cm², tenaga 50 keV dan suhu anil 750^o C. Dari karakteristik I-V, didapat pada bias maju, tegangan dadal dan arus dadal berturut-turut 26 V dan 21,5 mA; sedangkan untuk bias mundur adalah 10 V dan 6 mA.

Kata kunci: implantasi ion Ag, kontak ohmik, sambungan PN.

ABSTRACT

IMPLANTATION OF Ag ION INTO P-N JUNCTION FOR CONTACT OHMIC. Implantation of Ag ion into P-N junction for contact ohmic has been done using 150 keV Ion Implantor. For this purpose Ag pure wire has been ionized in hot cathodes ion source. Before implanted, the (1 x 1) cm² Si wafer slices were cleaned using acetone and alcohol and then etched by CP4A solution. Implantation of the wafer were carried out by variation of ion dose and energy as well as annealed temperature. For first step, the ion dose variation was carried from 10¹³ up to 10¹⁶ ion/cm², energy 50 keV, and annealed temperature was 500^o C for 30 minutes. From this conditions, it will be found the optimum conditions of the ion dose variation and from the optimum condition, the samples were implanted for various energi, i.e from 10 up to 60 keV and annealed at 500^o C for 30 minutes (second step). For the optimum conditions of ion dose and energy, the samples were annealed at temperature variation, i.e. 350^o C up to 850^o C for 30 minutes. The optimum conditions of the ion dose and energy, anneal temperature was determined by measurement of the resistivities using four point probe (FPP 500). The effect of Ag contact ohmic on the characteristics of P-N junction was studied through the measurement of the I-V characteristics of the junction (forward and backward bias) and also its breakdown voltage. It was found that the sheet resistivities of the P wafer type decrease with the increasing of the Ag ion dose up to 5 x 10¹⁴ cm² and trend to increase above 5 x 10¹⁴ ion/cm². The sheet resistance also trend to decrease with the increasing of the energy and annealing temperature. The minimum sheet resistivity of the P type wafer silicon was achieved at ion dose 5 x 10¹⁴ ion/cm², energy 50 keV and annealing temperature 750^o C. From I-V characteristic, it was found that at forward bias, the breakdown voltage and breakdown current was 26 V and 21.5 mA, respectively while for backward bias were 10 V and 6 mA.

Key words : Ion Implantation Ag, contact ohmic, junction PN.

PENDAHULUAN

Kontak ohmik merupakan kontak logam dengan semikonduktor yang berfungsi sebagai elek-

troda penghubung (penghantar) arus dan tegangan yang masuk dan keluar alat elektronik semikonduktor. Penempatan atau penempelan logam pada semikonduktor untuk pembuatan kontak ohmik

bukanlah hal yang mudah. Penempatan logam pada semikonduktor dapat menimbulkan efek yang tidak dikehendaki seperti menaikkan resistansi seri komponen, menginjeksikan pembawa minoritas atau memberikan efek penyearahan.⁽¹⁾ Selain itu, jatuh tegangan kontak ohmik harus relatif lebih kecil dibandingkan dengan jatuh tegangan di daerah aktif alat serta harus dapat memasok arus yang dibutuhkan.⁽²⁾ Logam yang digunakan juga harus memiliki konduktivitas yang tinggi, dapat melekat dipermukaan semikonduktor, dapat dibuat menjadi kontak ohmik, dan tidak terkorosi ketika dioperasikan secara normal.⁽³⁾ Namun belum diketahui suatu logam yang dapat memenuhi seluruh persyaratan tersebut.

Untuk pembuatan kontak ohmik, implantasi ion merupakan metode alternatif penempatan atom logam (pendadah atau dopan) ke daerah semikonduktor yang diinginkan.

Berdasarkan uraian diatas akan diteliti lebih lanjut tentang penggunaan logam Ag (perak) murni untuk pembuatan kontak ohmik dengan metode implantasi ion pada dosis, tenaga dan suhu anil yang menyebabkan resistansi lapis wafer silikon minimum tipe P dan pengaruhnya terhadap karakter arus tegangan sambungan PN yang terbuat dari wafer silikon tipe P yang diimplantasi dengan ion fospor.

TEORI

Kontak Ohmik

Kontak logam semikonduktor selalu diperlukan untuk mengoperasikan suatu alat (piranti) elektronik semikonduktor. Kontak logam diperlukan sebab silikon tidak dapat langsung dihubungkan dengan kabel maupun kawat sebagai penghantar arus maupun tegangan. Intervensi lapisan logam yang disebut dengan kontak ohmik selalu diperlukan oleh semikonduktor dalam pembuatan alat-alat elektronik sebagai penghantar listrik yang masuk dan keluar alat. Kontak ohmik didefinisikan sebagai kontak logam semikonduktor yang memiliki resistansi kontak yang relatif dapat diabaikan terhadap resistansi semikonduktor secara keseluruhan.⁽³⁾ Penempatan kontak harus tidak mengganggu kemampuan alat, dapat memasok arus yang dibutuhkan dan harus memiliki jatuh tegangan yang relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan jatuh tegangan yang terjadi di daerah aktif alat.⁽²⁾

Kontak Logam Semikonduktor

Ketika dua substrat dihubungkan (digabung) hingga terbentuk kontak, akan terjadi redistribusi

muatan hingga tingkat Fermi kedua substrat sama dan tercapai keseimbangan termal yang baru. Redistribusi muatan akan mengakibatkan pembentukan lapisan kutub (muatan) di dalam kontak. Lapisan kutub ini disebabkan oleh muatan di permukaan kedua substrat di dalam kontak. Lapisan kutub dapat menghasilkan potensial penghalang yang menyebabkan sifat penyearahan pada pemberian bias (tegangan). Jika lapisan kutub tidak menghasilkan potensial penghalang maka kontak yang terbentuk adalah kontak bukan penyearah. Pada kontak bukan penyearah, besarnya arus yang mengalir bergantung sepenuhnya pada besar tegangan yang diberikan sesuai pernyataan hukum Ohm.⁽⁴⁾ Kontak seperti ini disebut sebagai kontak Ohmik.

Gambaran tentang kontak logam dengan semikonduktor dapat dilihat melalui diagram tingkat energinya. Di sini tingkat vakum digunakan sebagai referensi tingkat energi sebuah elektron dalam keadaan 'diam' ($E = 0$) diluar zat padat.⁽³⁾ Tingkat Fermi E_f merupakan energi peluang penghunian keadaan energi di dalam pita energi sedangkan energi minimum yang dibutuhkan untuk memindahkan elektron dari tingkat Fermi ke tingkat vakum disebut fungsi kerja.⁽³⁾ Fungsi kerja logam $q\phi_m$ (ϕ_m dalam volt) adalah energi minimum yang dibutuhkan elektron untuk bergerak dari tingkat Fermi logam menuju tingkat vakum yang nilainya bervariasi dari 2 eV hingga 6eV.⁽²⁾ Fungsi kerja semikonduktor $q\phi_{sc}$ adalah energi minimum yang dibutuhkan elektron untuk bergerak dari tingkat fermi semikonduktor menuju tingkat vakum. Fungsi kerja semikonduktor merupakan hasil penjumlahan antara afinitas elektron $q\chi$ dan selisih antara energi di dasar (tingkat dasar) pita konduksi E_c dengan tingkat vakum yaitu

$$q\phi_{sc} = q\chi + (E_c - E_f) \quad (1)$$

Afinitas elektron merupakan selisih energi antara E_c dan tingkat vakum.⁽²⁾ Perlu dicatat bahwa q merupakan konstanta muatan elektron (dinyatakan dengan satuan e), sedangkan ϕ_m , ϕ_{sc} dan χ adalah beda potensial antara tingkat vakum dengan tingkat energi yang bersangkutan dalam satuan volt.

Pembuatan Kontak Ohmik

Dari acuan⁽³⁾ dikemukakan bahwa kontak ohmik diperoleh dari kontak logam dengan semikonduktor tipe N yang memiliki $\phi_m < \phi_{sc}$ dan kontak logam dengan semikonduktor tipe P yang memiliki $\phi_m > \phi_{sc}$. Dalam prakteknya, pembuatan kontak ohmik bukanlah hal yang mudah. Prediksi tentang karakter kontak berdasarkan fungsi kerja bahan (substrat) tidak selalu tepat karena karakter

kontak tidak selalu bergantung pada fungsi kerja bahan.⁽⁵⁾ Namun, pada dasarnya terdapat tiga pendekatan yang dapat digunakan untuk memperoleh kontak beresistansi rendah sebagai kontak ohmik yaitu :⁽³⁾

1. Memilih kombinasi logam dan semikonduktor yang menghasilkan tinggi penghalang yang lebih kecil dari pada kT .
2. Membuat cukup banyak pusat rekombinasi pada permukaan logam dan semikonduktor.
3. Memperkecil daerah pengosongan (lapisan penghalang).

Kontak logam semikonduktor beresistansi sangat rendah dapat diperoleh ketika tinggi penghalang $q\phi_B$ jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan kT . Pernyataan ini dapat dipahami dari persamaan resistansi kontak spesifik R_c (konsentrasi dopan $N_D \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) untuk kontak logam semikonduktor^[2], yaitu

$$R_c = \frac{k}{q A^* T} \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2)$$

dengan k konstanta Boltzmann, q muatan elektron, A^* konstanta Richardson efektif, T temperatur mutlak dan ϕ_B potensial penghalang. Jika tinggi penghalang jauh lebih kecil daripada kT , maka nilai eksponensial menjadi sangat kecil sehingga R_c juga kecil. Jika tinggi penghalang sangat kecil, maka pembawa muatan dapat mengalir dari logam maupun dari semikonduktor tanpa melewati halangan yang berarti. Namun, tinggi penghalang tidak dapat diprediksi dengan tepat dari perbedaan fungsi kerja logam dan semikonduktor sehingga kontak ohmik tidak dapat dibuat dengan hanya memilih fungsi kerja logam.⁽³⁾

Prinsip pembuatan kontak ohmik yang kedua adalah memberi cukup banyak pusat rekombinasi pada permukaan logam dan semikonduktor yang akan dibuat kontak. Prinsip ini dilakukan dengan menyemprot atau membombardir permukaan semikonduktor dengan ion logam. Atom-atom ketakmurnian selain donor dan akseptor dan beberapa cacat kristal, memberi tingkat-tingkat energi yang terlokalisasi di dalam celah energi dan berperilaku sebagai pusat-pusat rekombinasi^[3]. Atom-atom logam dan penyisipan maupun kekosongan pada ikatan kristal semikonduktor akibat keberadaan atom-atom logam merupakan pusat-pusat rekombinasi yang efektif bagi transfer pembawa muatan. Transport arus di persambungan (kontak) akan didominasi oleh rekombinasi pasangan lowong dan elektron dengan adanya pusat pusat rekombinasi tersebut sehingga resistansi

kontak menjadi rendah. Namun penyisipan maupun kekosongan dapat terakumulasi dan menyebabkan cacat atau kerusakan radiasi yang lebih kompleks sehingga malah memperburuk resistansi kontak.

Kontak logam semikonduktor mempunyai resistansi rendah dapat diperoleh dengan memperkecil daerah pengosongan (lapisan penghalang). Jika lapisan penghalang tipis maka lapisan ini akan menjadi transparan terhadap pembawa muatan.⁽³⁾ Pada kondisi seperti ini, arus dapat mengalir dengan mudah sehingga resistansi kontak menjadi sangat rendah. Prinsip ini dilakukan dengan menambahkan suatu lapisan tipis yang dibuat dengan mempertinggi konsentrasi dopan pada permukaan semikonduktor yang akan dihubungkan dengan logam. Dopan yang digunakan memiliki tipe konduksi yang sama dengan tipe konduksi semikonduktor.

Logam Untuk Pembuatan Kontak Ohmik

Logam yang digunakan untuk pembuatan kontak ohmik juga harus memenuhi beberapa persyaratan. Logam harus memiliki konduktivitas yang tinggi, dapat dibuat kontak ohmik yang baik dengan semikonduktor, dapat melekat dengan baik di permukaan semikonduktor dan tidak terkorosi ketika dioperasikan secara normal^[3]. Namun tidak ada logam tunggal yang sempurna sehingga dapat memenuhi seluruh persyaratan yang diajukan. Walaupun demikian, beberapa logam berkonduktivitas tinggi biasa digunakan untuk pembuatan kontak ohmik.

Logam yang biasa digunakan untuk pembuatan kontak ohmik antara lain :⁽⁶⁾

Aluminium (Al) merupakan logam putih perak yang memiliki konduktivitas kalor dan listrik yang tinggi. Al memiliki titik leleh 660 °C dan teroksidasi di udara bebas dengan membentuk lapisan oksida yang melindungi lapisan di bawahnya dari proses oksidasi berikutnya. Al termasuk logam yang murah, namun untuk pembuatan kontak ohmik harus dilakukan dengan tepat karena merupakan akseptor bagi silikon dan germanium. Al tertutup oleh suatu lapisan oksida yang stabil sehingga pelapisan maupun penyolderan (pematiran) harus dilakukan dengan menghilangkan lapisan oksida terlebih dahulu.

Tembaga (Cu) termasuk logam berkonduktivitas tinggi yang memiliki ketahanan terhadap korosi yang tinggi dengan titik leleh 1083 °C. Cu mudah melekat sehingga dapat terpatri dengan sesama logam maupun dengan logam yang lainnya. Pelapisan Cu pada semikonduktor harus dilakukan dengan hati-hati karena dapat masuk ke dalam dan bekerja sebagai akseptor.

Nikel (Ni) merupakan logam yang memiliki ketahanan mekanis dan korosi yang tinggi. Nikel dapat terkorosi pada temperatur 400 °C di dalam udara kering. Walaupun titik lelehnya cukup tinggi (1453 °C), namun Ni dapat diendapkan dengan elektrolisis maupun secara kimia pada permukaan semikonduktor.

Emas (Au) termasuk logam inert (tidak reaktif) terhadap oksigen, hidrogen, nitrogen maupun karbon walaupun pada temperatur tinggi. Au termasuk logam berkonduktivitas tinggi yang memiliki titik leleh 1063 °C. Au sulit melekat sehingga sering memerlukan perantara (seperti Antimon) agar dapat digunakan untuk pembuatan kontak ohmik pada silikon.

Perak (Ag) merupakan logam putih yang memiliki kerapatan 10,5 gr/cm³ pada suhu 20 °C dengan titik leleh 960 °C. Jika dibandingkan dengan logam yang lain, maka Ag adalah logam yang memiliki konduktivitas listrik dan kalor yang tertinggi. Resistivitasnya adalah $1,59 \times 10^{-6}$ Ω-cm pada suhu 20 °C dengan konduktivitas kalor 0,97 cal/cm-s- °C. Ag termasuk logam yang tidak reaktif terhadap nitrogen, karbon, alkali dan tidak teroksidasi pada kondisi normal. Ag dapat bercampur dengan logam yang lain sehingga merupakan pematris yang baik. Logam ini biasanya digunakan sebagai perekat logam-logam yang sulit melekat pada silikon dan germanium. Perak biasanya digunakan sebagai bahan cat konduktif untuk melapisi semikonduktor sebagai kontak ohmik.

TATA KERJA

Alat-alat Penelitian

Implantor ion 150 keV/ 2 mA buatan P3TM BATAN; Probe Empat Titik FPP-5000 buatan Veeco; Penganil buatan LINBERG, tipe 55346; Pencuci ultrasonik; Alat pelapis yang beroperasi pada 0-220 V(DC) / 50-60 Hz; Pengukur karakter arus tegangan; Alat bantu : pemotong intan, peralatan pencuci dan pengetsas, jangka sorong (buatan KERN Jerman dengan kemampuan ukur 15 cm, ketelitian 0.05 mm) dan pinset.

Bahan-bahan Penelitian

Wafer silikon tipe P; Logam perak (Ag) dengan kemurnian 100%; Sambungan PN dari wafer silikon tipe P yang diimplantasi dengan fosfor (P³¹) pada dosis 5×10^{15} ion/cm², tenaga 20 keV dan dianil pada suhu 800 °C selama 30 menit; Cairan pencuci : aseton teknis dan alkohol 95%; Larutan pengetsas : CP-4A (campuran HNO₃, HF dan

CH₃COOH dengan perbandingan 5:3:3); Logam Aluminium (Al) untuk pelapis (*coating*); Gas Nitrogen (N₂) untuk penganil; Pembungkus : kertas tissue dan plastik klip.

Langkah Kerja

Penyiapan Bahan (Subtrat)

Wafer silikon dipotong dengan luas sekitar (1 × 1) cm² dengan pemotong intan; Wafer silikon dicuci berturut-turut dengan aseton dan alkohol menggunakan pencuci ultrasonik selama 10 menit; Wafer silikon direndam dalam larutan pengetsas selama 3 menit; Diukur resistansi lapis masing-masing wafer dengan Probe Empat Titik.

Implantasi Ion

Wafer silikon yang telah dibersihkan siap untuk diimplantasi. Implantasi dilakukan pada sebuah wafer silikon tipe P untuk setiap variasi dengan sudut miring (*tilt angle*) 7° untuk mencegah pengkanalan bidang dan sudut putar (*twist angle*) 30° untuk mencegah pengkanalan sudut. Nilai dosis, tenaga dan suhu anil optimum untuk pembuatan kontak ohmik ditentukan melalui tiga tahap, yaitu:

- Dicari dosis implantasi ion Ag yang menghasilkan resistansi lapis minimum dengan variasi dosis dari 10¹³ ion/cm²-10¹⁶ ion/cm² pada tenaga 50 keV dan suhu anil 500 °C.
- Dicari tenaga implantasi ion Ag yang menghasilkan resistansi lapis minimum dengan variasi tenaga dari 10 keV - 60 keV pada dosis optimum (hasil tahap pertama) dan suhu anil 500 °C.
- Dicari suhu anil implantasi ion Ag yang menghasilkan resistansi lapis minimum dengan variasi suhu anil 350 °C - 850 °C pada dosis optimum (hasil tahap pertama) dan tenaga optimum (hasil tahap kedua).

Perubahan resistansi lapis ditentukan dari pengukuran resistansi lapis pada tahap penyiapan subtrat dan setelah penganilan pada masing-masing tahap implantasi.

Proses penganilan untuk masing-masing tahap implantasi dilakukan pada tabung pemanas yang dialiri gas nitrogen (N₂) dengan kelajuan 1 liter/menit. Gas N₂ digunakan untuk menghindari proses oksidasi antara silikon dengan oksigen.

Pembuatan Kontak Ohmik

Pembuatan kontak ohmik dilakukan pada dua cuplikan (sambungan PN) yang akan diukur karakter arus tegangannya. Langkah-langkah pembuatan kontak ohmik adalah :

- Diukur resistansi lapis sambungan PN sebelum pembuatan kontak.
- Sisi terimplantasi ion fosfor pada sambungan PN diimplantasi ion Ag pada dosis dan tenaga optimum serta dianil pada suhu optimum yang diperoleh dari tahap implantasi ion.
- Sisi yang tidak diimplantasi ion Ag dilapisi logam Al dengan alat pelapis (coating).
- Diukur resistansi lapis sambungan PN setelah pembuatan kontak.

Karakterisasi Arus Tegangan I-V Sambungan PN

Karakterisasi I-V untuk bias maju dilakukan dengan pemberian tegangan positif pada sisi tipe P dan tegangan negatif pada sisi tipe N untuk cuplikan pertama sedang untuk bias mundur dilakukan pada cuplikan kedua dengan pemberian tegangan positif pada sisi tipe N dan negatif pada sisi tipe P. Langkah-langkah karakterisasi arus tegangan sambungan PN adalah :

- Sambungan PN dipasang sesuai bias yang diinginkan.
- Sumber tegangan dihidupkan dan diatur pada posisi nol.
- Tegangan dinaikkan dan dicatat besar arus yang mengalir.
- Langkah c. diulangi hingga diperoleh besar arus dan tegangan dadalnya.

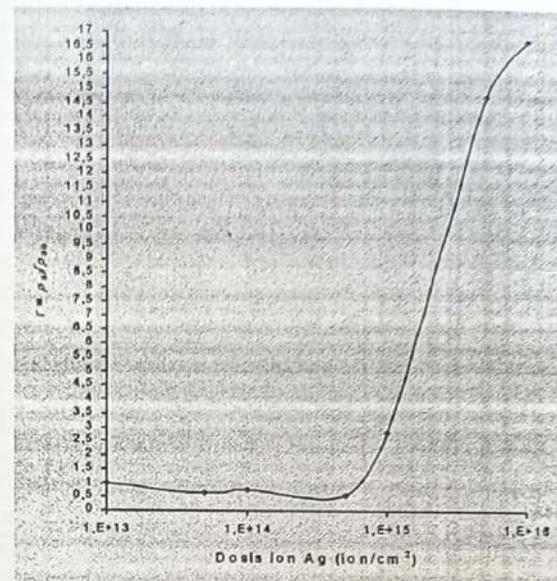
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Dosis Terhadap Resistansi Lapis Wafer Silikon Tipe P

Pada grafik terlihat bahwa dosis antara 10^{13} ion/cm² dan $5 \cdot 10^{14}$ ion/cm² menyebabkan $r < 1$ sedang dosis 10^{15} ion/cm² sampai dengan 10^{16} ion/cm² menyebabkan $r > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan dosis 10^{13} ion/cm² sampai dengan $5 \cdot 10^{14}$ ion/cm² menyebabkan penurunan resistansi lapis sedang peningkatan dosis lebih besar dari $5 \cdot 10^{14}$ ion/cm² sampai dengan 10^{16} ion/cm² cenderung menyebabkan peningkatan resistansi lapis yang sangat tajam.

Penurunan resistansi lapis dapat diartikan sebagai peningkatan arus yang akibat semakin banyak pembawa muatan yang dapat mengalir. Peningkatan aliran pembawa muatan disebabkan semakin banyak pusat-pusat rekombinasi yang dapat

digunakan pembawa muatan sebagai batu loncatan untuk bertransisi dari logam menuju semikonduktor maupun sebaliknya.⁽³⁾ Elektron dari logam dapat bertransisi dari logam menuju pusat rekombinasi dan segera berekombinasi dengan lowong yang berada di pita valensi semikonduktor. Di pihak lain, terjadi transfer lowong dari pita valensi semikonduktor menuju pusat rekombinasi yang kemudian berekombinasi dengan elektron logam.



Gambar 1. Grafik hubungan antara dosis ion Ag terhadap r pada tenaga 50 keV dengan suhu anil 500 °C dari

$$\text{wafer Si tipe P } r = \frac{\rho_{st-1}}{\rho_{sb-1}}$$

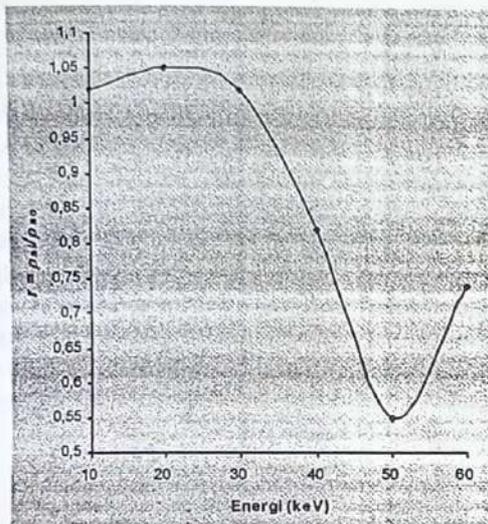
Pusat rekombinasi sebenarnya merupakan tingkat-tingkat energi yang berperilaku sebagai batu loncatan bagi pembawa muatan untuk berekombinasi. Penambahan jumlah (dosis) ion logam (Ag) menyebabkan peningkatan tingkat-tingkat energi di dalam celah energi sebagai pusat-pusat rekombinasi yang efisien. Selain itu peningkatan dosis ion logam juga menyebabkan peningkatan jumlah penyisipan dan kekosongan yang dapat berperilaku sebagai pusat-pusat rekombinasi. Arus meningkat sebab semakin banyak transfer pembawa muatan melalui pusat-pusat tersebut sehingga resistansi lapis wafer menurun.

Peningkatan resistansi lapis yang sangat tajam pada peningkatan dosis diatas $5 \cdot 10^{14}$ ion/cm² sampai dengan 10^{16} ion/cm² akibat peningkatan jumlah serta distribusi kerusakan radiasi. Kerusakan radiasi menjadi tumpang tindih seiring dengan peningkatan dosis ion Ag sehingga membentuk

lapisan amorf. Selain itu, penyisipan dan kekosongan ikatan kristal terakumulasi dan membentuk cacat yang lebih kompleks. Pembawa muatan sebagian besar terjebak di dalam cacat kompleks maupun lapisan amorf. Tranfer pembawa muatan menurun sehingga resistansi lapis meningkat.

Harga r terkecil ($0,55 \pm 0,02$) dicapai pada dosis 5.10^{14} ion/cm². Dapat dinyatakan bahwa dosis optimum implantasi ion Ag pada tenaga 50 keV dan suhu anil 500°C adalah dosis 5.10^{14} ion/cm².

Pengaruh Tenaga Terhadap Resistansi Lapis Wafer Silikon Tipe P



Gambar 2. Grafik hubungan antara tenaga terhadap r pada dosis ion Ag optimum 5.10^{14} ion/cm² dengan suhu anil 500 °C. dari wafer Si

$$\text{tipe P } r = \frac{\rho_{M-i}}{\rho_{sh-i}}$$

Pada grafik terlihat bahwa pada tenaga 10 keV sampai dengan 30 keV menyebabkan r sedikit lebih besar dari 1, sedangkan tenaga 40 keV sampai dengan 60 keV menghasilkan $r < 1$. Hal ini menunjukkan bahwa implantasi ion Ag pada wafer silikon tipe P dengan tenaga 10 keV sampai dengan 30 keV menghasilkan peningkatan resistansi lapis sedangkan tenaga 40 keV sampai dengan 60 keV menghasilkan penurunan resistansi lapis.

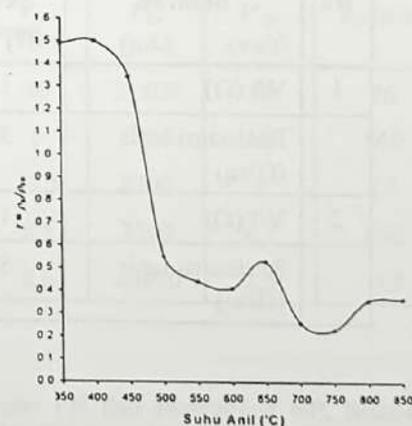
Peningkatan resistansi lapis yang kecil terjadi pada tenaga 10 keV sampai dengan 30 keV. Pada rentang tenaga ini, ion Ag belum dapat masuk lebih jauh kedalam permukaan wafer. Ion-ion Ag belum dapat berinteraksi dengan atom-atom wafer dan

hanya menyebabkan peningkatan resistansi lapis yang relatif kecil. Tenaga 40 keV sampai dengan 60 keV telah menyebabkan penurunan resistansi lapis. Pada rentang tenaga yang lebih tinggi ini, ion-ion Ag telah masuk lebih jauh kedalam permukaan wafer. Pada kondisi ini, ion-ion Ag telah berinteraksi dengan atom-atom wafer silikon dengan menyumbangkan pusat-pusat rekombinasi yang membantu proses transfer pembawa muatan. Tranfer pembawa muatan meningkat sehingga menyebabkan penurunan resistansi lapis wafer.

Pada variasi tenaga, r terkecil ($0,55 \pm 0,02$) dicapai pada tenaga 50 keV. Dapat dinyatakan bahwa tenaga optimum implantasi ion Ag pada permukaan wafer silikon tipe P dengan dosis optimum 5.10^{14} ion/cm² dan suhu anil 500 °C adalah tenaga 50 keV.

Pengaruh Suhu Anil Terhadap Resistansi Lapis Wafer Silikon Tipe P

Seperti terlihat pada Gambar 3., suhu anil 350 °C sampai dengan 450 °C masih menyebabkan r lebih besar dari pada satu. Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu anil 350 °C sampai dengan 450 °C masih terjadi peningkatan resistansi lapis. Peningkatan resistansi lapis terjadi akibat pemulihan struktur kerusakan radiasi pada kristal silikon belum berjalan dengan baik. Penganilan pada rentang suhu tersebut belum memberikan energi yang cukup bagi proses rekristalisasi struktur kristal silikon untuk memperkecil jumlah kerusakan radiasi yang memberikan efek negatif pada resistansi lapis wafer silikon tipe P.



Gambar 3. Grafik hubungan antara suhu anil terhadap r pada dosis ion Ag optimum 5.10^{14} ion/cm² dan tenaga optimum 50 keV. dari

$$\text{wafer Si tipe P } r = \frac{\rho_{M-i}}{\rho_{sh-i}}$$

Penurunan resistansi lapis yang ditunjukkan oleh $r < 1$ mulai terjadi pada suhu anil 500 °C. Pada temperatur yang relatif rendah ini, proses rekristalisasi telah berjalan dengan baik. Jumlah dan distribusi kerusakan radiasi telah mengecil sedangkan ion-ion Ag telah menyatu dengan kisi kristal dan membantu proses transfer pembawa muatan sehingga resistansi lapis wafer silikon tipe P menurun.

Pada suhu anil 500 °C sampai dengan 850 °C, resistansi lapis cenderung semakin menurun. Penurunan resistansi lapis menunjukkan bahwa pemanasan dari suhu 500 °C sampai dengan 850 °C telah berhasil mengurangi efek negatif yang ditimbulkan kerusakan radiasi. Pemanasan pada rentang suhu tersebut dapat memberikan energi yang cukup untuk memperkecil kerusakan radiasi maupun distribusi ketakteraturan yang ditimbulkannya. Selain itu, ion-ion telah menyatu dengan kisi kristal dan mencapai kondisi aktif listrik sehingga resistansinya menurun^[7]. Penurunan tertinggi terjadi pada suhu anil 750°C. Pada suhu yang lebih tinggi ini, hampir semua ion Ag telah mencapai kondisi aktif listrik sehingga menyebabkan penurunan resistansi lapis yang tertinggi.

Pada variasi suhu anil, r terkecil ($0,23 \pm 0,01$) dicapai dengan pemanasan pada suhu 750 °C. Dapat dinyatakan bahwa suhu anil optimum bagi

implantasi ion Ag pada permukaan wafer silikon tipe P dengan dosis optimum 5.10^{14} ion/cm² dan tenaga optimum 50 keV adalah 750 °C.

Pembuatan Kontak Ohmik

Pada tahap implantasi ion telah diperoleh dosis, tenaga dan suhu anil optimum sebagai nilai yang menyebabkan r terkecil atau nilai yang menyebabkan resistansi lapis silikon tipe P minimum. Dengan demikian dosis 5.10^{14} ion/cm², tenaga 50 keV dan suhu anil 750 °C merupakan nilai-nilai bagi implantasi ion Ag pada sambungan PN untuk pembuatan kontak ohmik.

Pembuatan kontak ohmik dilakukan pada sambungan PN beresistansi lapis terendah dari wafer silikon tipe P yang diimplantasi ion fosfor. Sambungan PN dengan pembawa muatan dalam kondisi aktif penuh yang mempunyai hambatan lapis terendah dan konstan diperoleh dari wafer silikon tipe P yang didoping ion fosfor dengan dosis 5.10^{15} ion/cm² pada tenaga 20 keV dan dianil pada suhu 800 °C selama 30 menit.⁽⁸⁾ Sambungan PN tersebut kemudian diimplantasi ion Ag pada sisi terimplantasi fosfor dengan dosis dan tenaga optimum serta dianil pada suhu optimum sebagai kontak ohmik. Pada sisi tidak terimplantasi, kontak ohmik dibuat dengan alat pelapis (*di-coating*) menggunakan logam Al.

Tabel 1. Resistansi lapis wafer silikon tipe P pada proses pembuatan sambungan PN dan kontak ohmik.

No	Besaran	Sebelum implantasi	diimplantasi fosfor (sambungan PN)	diimplantasi Ag (kontak ohmik)
1	V/I (Ω)	13.13	3.16	5,74
	Resistansi lapis (Ω /sq)	51.21	12.32	22,37
2	V/I (Ω)	13.07	3.18	5,78
	Resistansi lapis (Ω /sq)	50.97	12.18	22,54

Pengaruh Pembuatan Kontak Ohmik Dengan Implantasi Ion Ag Terhadap Karakter Arus Tegangan Sambungan PN

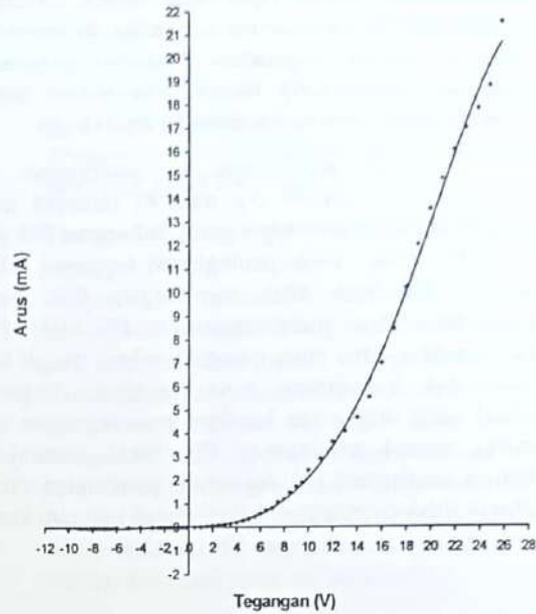
Penerapan tegangan eksternal pada sambungan PN yang dikenal dengan istilah pemberian bias, digunakan untuk mempelajari karakter arus tegangan sambungan PN setelah

pemasangan kontak ohmik. Karakterisasi pada bias maju dilakukan dengan pemberian tegangan positif pada sisi P (kontak ohmik Al) dan tegangan negatif pada sisi tipe N (kontak ohmik Ag). Sedangkan pada bias mundur dilakukan dengan pemberian tegangan negatif pada sisi P (kontak ohmik Al) dan tegangan positif pada sisi tipe N (kontak ohmik Ag). Karakterisasi dilakukan hingga mencapai tegangan

dadal baik pada bias maju maupun pada bias mundur yang di tandai dengan lonjakan arus yang sangat besar dan tidak lagi bergantung pada tegangan.

Pemberian bias melalui pemasangan tegangan pada kedua kontak menyebabkan aliran arus melintasi sambungan PN. Pemberian bias melalui kontak ohmik telah mempengaruhi keseimbangan pembawa muatan pada sambungan PN sehingga arus dapat mengalir. Hal ini menunjukkan bahwa kontak ohmik dapat menghantarkan arus dan tegangan yang masuk dan keluar sambungan PN. Bias maju menyebabkan penurunan tinggi penghalang di persambungan sehingga semakin tinggi konsentrasi pembawa muatan yang memiliki energi untuk melompati penghalang. Arus meningkat terhadap tegangan mirip seperti peningkatan arus pada sambungan PN ideal. Bias mundur telah menyebabkan arus yang sangat kecil dan relatif tidak bergantung pada tegangan.

Ketika bias maju dinaikan sedikit diatas 26 volt dan bias mundur dinaikan sedikit di atas 10 volt, arus mengalir sangat besar dan tidak lagi bergantung pada tegangan. Kondisi ini menunjukkan bahwa tegangan dadal pada bias maju dan bias mundur masing-masing sebesar 26 volt dan 10 volt. Sebagai perbandingan, disajikan tegangan dan arus dadal sambungan PN⁽⁸⁾ dengan variasi kontak ohmik pada Tabel 2.



Gambar 4. Karakter arus tegangan sambungan PN dengan kontak ohmik yang dibuat dengan implantasi ion Ag pada sisi terimplantasi fosfor (tipe N) dan pelapisan Al pada sisi tidak terimplantasi (tipe P).

Tabel 2. Tegangan dan arus dadal sambungan PN dan NP dengan beberapa jenis kontak ohmik.

No	Jenis	Jenis kontak ohmik		Bias maju		Bias mundur	
		sisi terimplantasi	sisi tidak terimplantasi	V_{br} (volt)	I_{br} (μA)	V_{br} (volt)	I_{br} (μA)
1	PN	implantasi ion Ag	pelapisan Al	26	21500	10	46
2	PN	pelapisan Au	pelapisan Al	5	1400	10	540
3	NP	implantasi ion Cu	pelapisan Al	27,5	8200	5	20
4	NP	pelapisan Au	pelapisan Al	8,5	7500	8,2	890
5	NP	pelapisan Cu	pelapisan Al	2,5	40000	2,5	165

Tabel 2 menunjukkan bahwa sambungan PN dengan kontak ohmik Ag dan Al yang masing-masing dibuat dengan metode implantasi ion dan pelapisan, memiliki tegangan dadal yang lebih tinggi daripada tegangan dadal sambungan PN dengan kontak ohmik Au dan Al yang dibuat dengan metode pelapisan. Tegangan dadal sambungan PN dengan kontak ohmik Ag dan Al pada bias mundur merupakan tegangan dadal yang tertinggi diantara

sambungan PN dan sambungan NP. Sifat-sifat ini menunjukkan bahwa sambungan PN dengan kontak ohmik Ag dan Al tersebut memiliki kemampuan yang lebih baik daripada yang lainnya walaupun kemampuannya pada bias mundur masih sedikit dibawah sambungan NP dengan kontak Cu dan Al yang masing-masing dibuat dengan metode implantasi dan pelapisan. Kemampuan sambungan PN tersebut dikatakan lebih baik sebab tegangan dadal

yang cukup besar diperlukan untuk menjaga sambungan PN dari kerusakan ketika dioperasikan terutama ketika digunakan sebagai penyearah. Tegangan dadal yang tinggi menunjukkan bahwa batas tegangan operasi sambungan juga tinggi.

Karakter arus tegangan sambungan PN dengan kontak ohmik Ag dan Al tersebut mirip dengan karakter arus tegangan sambungan PN yang ideal. Pada bias maju, peningkatan tegangan diikuti dengan kenaikan arus sambungan PN seperti peningkatan arus pada sambungan PN ideal. Pada bias mundur, arus yang mengalir relatif sangat kecil dan tidak bergantung pada tegangan. Tegangan dadal yang tinggi dan karakter arus tegangan yang mirip seperti sambungan PN ideal menunjukkan bahwa implantasi ion Ag untuk pembuatan kontak ohmik tidak mengganggu kemampuan maupun karakter arus tegangan sambungan PN tersebut.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Pengaruh dosis ion Ag terhadap resistansi lapis wafer silikon tipe P.
2. Resistansi lapis semakin menurun terhadap kenaikan dosis sampai dengan $5 \cdot 10^{14}$ ion/cm² dan cenderung meningkat sangat tajam terhadap kenaikan dosis diatas $5 \cdot 10^{14}$ ion/cm². ; Dosis $5 \cdot 10^{14}$ ion/cm² adalah dosis optimum yang menghasilkan resistansi lapis minimum.
3. Pengaruh tenaga implantasi ion Ag terhadap resistansi lapis silikon tipe P.
4. Resistansi lapis cenderung menurun terhadap peningkatan tenaga; tenaga 50 keV adalah tenaga optimum yang menyebabkan resistansi lapis minimum.
5. Pengaruh suhu anil terhadap resistansi lapis wafer silikon tipe P.
6. Resistansi lapis cenderung menurun terhadap peningkatan suhu anil; Suhu anil 750 °C adalah suhu anil optimum yang menyebabkan resistansi lapis minimum.
7. Dosis $5 \cdot 10^{14}$ ion/cm², tenaga 50 keV dan suhu anil 750 °C adalah nilai-nilai yang menyebabkan resistansi lapis wafer silikon tipe P minimum bagi implantasi ion Ag pada sambungan PN untuk pembuatan kontak ohmik.

8. Pengaruh pembuatan kontak ohmik dengan implantasi ion Ag terhadap karakter arus tegangan sambungan PN.
 - a. Kontak ohmik Ag pada sambungan PN dapat menghantarkan arus maupun tegangan yang masuk dan keluar sambungan PN tersebut.
 - b. Tegangan dan arus dadal pada bias maju adalah 26 volt dan 21,5 mA, sedang pada bias mundur adalah 10 volt dan 46 μ A.
 - c. Pembuatan kontak ohmik dengan implantasi ion Ag tidak mengganggu kemampuan maupun karakter arus tegangan sambungan PN.

UCAPAN TERIMA KASIH

Disampaikan ucapan terima kasih kepada adik Priyo Wibowo, Mahasiswa jurusan Fisika F MIPA UNY yang telah dengan tulus ikhlas membantu penelitian ini hingga selesai. Demikian juga Bpk. Al. Sunarto dan Bpk. Ngatinu yang telah membantu hingga terselesainya penyajian makalah ini, semoga Allah memberi imbalan yang semestinya Amin.

DAFTAR PUSTAKA

1. REKA RIO, S. dan IIDA, M., *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*, Jakarta: P.T. Prandya Paramita, 1982.
2. SZE, S.M. *Physics of semiconductor Devices*, Second Edition. New York: Mc. Graw Hill, 1981.
3. TYAGI, M.S., *Introduction Semiconductor Material and Devices*, New York: John Wiley & Sons, 1991.
4. HUTCHISON, T.S., and BAIRD, D.C., *The Physics of Engineering Solids*, Second Edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 1968.
5. ZIEL, A., *Solid State Physics Electronics*. Tokyo: Maruzen Co. Ltd., 1959.
6. BRUK, V.A., GARSHENIN, V.V. and KUNOSOV, A.I., *Semiconductor Technology*. Moscow: Mir Publisher, 1969.
7. RYSSEL, H. and RUGE, I., *Ion Implantation*, New York: John Wiley and Sons Ltd., 1986.
8. SRI SULAMDARI dan LELY S., *Karakteristik Sambungan PN Hasil Implantasi Ion Phospor pada Lapisan Semikonduktor Tipe P*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi

Akselerator dan Aplikasinya. vol 2, no 1; hal 123-131. P3TM BATAN, 2000.

TANYA JAWAB

Elin N.

– Mengapa dipilih logam Ag?

Sri Sulamdari

– Pada makalah/penelitian ini dipilih logam Ag. Pada penelitian lain dilakukan logam-logam lain yaitu : Cu, Al, Au, yang semuanya nanti akan dijadikan bahan untuk pembuatan kontak ohmik sel surya.

Wirjoadi

– Bagaimana pengaruh dosis ion, tenaga dan suhu anil apabila resistivitasnya semakin besar.

Sri Sulamdari

– Apabila resistivitasnya semakin besar, maka pengaruh dosis ion, tenaga dan suhu anil :

- Dosis. Peningkatan resistansi lapis yang sangat tajam pada peningkatan dosis diatas 5×10^{14} ion/cm² samapai dengan 10^{16} ion/cm² akibat peningkatan jumlah serta distribusi radiasi (Gambar 1). Kerusakan radiasi menjadi tumpang tindih seiring dengan peningkatan dosis ion Ag sehingga membentuk

lapisan Amorf. Selain itu, penyisipan dan kekosongan ikatan kristal terakumulasi dan membentuk cacat yang lebih kompleks. Pembuatan muatan sebagian besar terjebak di dalam cacat kompleks maupun lapisan amorf. Transfer pembawa muatan menurun sehingga resistansi lapis meningkat (Gambar 1).

- Tenaga. Pada Gambar 2 terlihat bahwa pada tenaga 10 keV sampai dengan 30 keV menyebabkan ρ sedikit lebih besar dari 1, sedangkan tenaga 40 keV sampai dengan 50 keV menghasilkan $\rho < 1$. Peningkatan resistivitas lapis yang kecil terjadi pada tenaga 10 keV sampai dengan 30 keV. Pada rentang tenaga ini, ion Ag belum dapat masuk lebih jauh ke dalam permukaan wafer. Ion-ion Ag belum dapat berinteraksi dengan atom-atom wafer dan hanya menyebabkan peningkatan resistivitas lapis yang relatif kecil.
- Suhu. Pada Gambar 3, suhu anil 350 °C sampai dengan 450 °C masih menyebabkan ρ lebih besar daripada satu. Ini menunjukkan bahwa pada suhu anil 350 °C sampai 450 °C masih terjadi peningkatan resistivitas lapis terjadi akibat pemulihan struktur kerusakan radiasi pada kristal silikon belum berjalan dengan baik. Penganilan pada rentang suhu tersebut belum memberikan energi yang cukup bagi proses rekristalisasi struktur kristal silikon untuk memperkecil jumlah kerusakan radiasi yang memberikan efek negatif pada resistansi lapis wafer Si tipe P.