

I. PENDAHULUAN

Aplikasi akselerator ion didasarkan pada efek interaksi berkas partikel dengan material sasaran, efek tersebut dapat dipandang secara *makro* maupun secara *mikro*.

Secara makro efek interaksi berkas partikel dengan material sasaran adalah penyerapan berkas secara total oleh material sasaran dan penembusan material sasaran oleh berkas partikel. Secara mikro, efek interaksi yang terjadi bisa disebabkan sebagai akibat dari interaksi berkas partikel dengan elektron dan atau inti atom sasaran. Interaksi berkas partikel dengan elektron atom sasaran dapat mengakibatkan peristiwa eksitasi maupun ionisasi atom/molekul sasaran. Sedangkan pada interaksi berkas partikel dengan inti atom sasaran peristiwa yang mungkin terjadi adalah hamburan elastik, hamburan inelastik maupun reaksi nuklir.

Pada peristiwa eksitasi, elektron atau molekul material sasaran akan terlempar dari orbit awal ke orbit yang energinya lebih tinggi. Atom atau molekul yang tereksitasi ini dapat melepaskan sebagian atau seluruh energi yang diserap dengan cara memancarkan foton (*photon emission*). Peristiwa tersebut dikenal dengan nama *PIXE* (*Particle Induced X-rays Emission*). Dari karakteristik sinar-X yang dipancarkan dapat diketahui jenis atom atau unsur yang tereksitasi, sehingga metode *PIXE* banyak digunakan sebagai metode analisa unsur yang sangat efektif dan cepat.

Pada peristiwa ionisasi elektron dari atom atau molekul terlepas dan peristiwa terlepasnya elektron atau molekul tersebut dapat diikuti oleh peristiwa rekombinasi, pemulihan kembali atom atau molekul ke keadaan semula (*molecular rearrangement*) atau dapat pula diikuti peristiwa kimia sehingga terbentuk molekul baru, misalnya untuk proses polimerisasi. Proses tersebut dapat dimanfaatkan misalnya untuk mendapatkan varietas tanaman baru atau untuk proses pengawetan makanan.

Pada interaksi berkas partikel dengan inti atom, peristiwa yang mungkin terjadi adalah hamburan elastik, hamburan inelastik maupun reaksi nuklir. Hamburan elastik terjadi bila berkas partikel oleh inti atom dihamburkan selama proses dan berkas partikel maupun inti atom tidak mengalami eksitasi internal. Fenomena ini banyak digunakan untuk penyelidikan karakteristik dan kontaminasi permukaan material ("*Investigation of Material Surfaces*"), penyelidikan kedalaman, profil ion-ion yang terimplantasi kedalam suatu material maupun untuk mengetahui *stoichiometric* suatu

senyawa. Teknik ini dikenal dengan teknik RBS (*“Rutherford Backscattering”*) yang merupakan kejadian khusus dari peristiwa hamburan elastik dengan sudut hamburan 180^0 . Pada hamburan inelastik inti atom sasaran akan mengalami eksitasi, peristiwa eksitasi inti tersebut diikuti peristiwa langsung deeksitasi sambil memancarkan sinar $-\gamma$ (*“Gamma Emission”*). Peristiwa tersebut dikenal dengan teknik PIGE (*“Particle Induced Gamma Emission”*). Metode ini banyak digunakan sebagai alat analisa unsur yang sangat ampuh dan dapat dikomplementasikan dengan teknik PIXE. Pada reaksi nuklir, tumbukan berkas partikel dengan inti atom target menghasilkan inti atom baru. Peristiwa ini digunakan sebagai salah satu cara untuk memproduksi radioisotop yang banyak digunakan dalam bidang medis. Bila jenis ion yang digunakan adalah deuterium dan targetnya tritium (D,T) maka selama reaksi akan dihasilkan Neutron 14,5 MeV. Neutron tersebut dapat dimanfaatkan untuk analisis unsur dan dinamakan **APNC (Analisa Pengaktipan Neutron Cepat)** atau sering pula dinamakan **FNAA (Fast Neutron Activation Analysis)**. Teknik sangat teliti (batas limit deteksinya hingga dalam orde $10^{-9}\%$ atom, dan dapat dimanfaatkan untuk analisa unsur dari yang ringan hingga berat.

II. IMPLANTOR ION

Implantasi ion adalah suatu proses penambahan unsur asing (dopan) kedalam permukaan material sasaran dengan cara pengionan atom asing tersebut, pemercepatan dalam tabung akselerator/pemercepat oleh medan listrik, pemfokusan dalam medan elektromagnet kemudian menembakkannya ke permukaan material target. Adapun komponen-komponen dari mesin implantor ion meliputi sumber ion, sumber daya listrik tegangan tinggi, sistim hampa, sistim pemisah berkas ion, tabung pemercepat, penyapu berkas dan tempat target. Dan secara skematis mesin implantor ion disajikan pada **Gambar II.1**.

II.1. Sistim Sumber Ion

Sumber ion merupakan komponen yang berfungsi untuk menghasilkan ion. Sumber ion dapat berujud gas/uap ataupun padatan.

II.2. Sumber Daya Listrik Tegangan Tinggi

Sumber daya listrik tegangan tinggi yang diperlukan pada pengoperasian implantor ion meliputi;

1. Tegangan tinggi 0 – 200 kV

Tegangan ini digunakan sebagai tegangan pemercepat ion-ion dopan dalam tabung pemercepat. Untuk memperoleh tegangan sebesar itu biasanya digunakan generator Cocroft-Walton. Generator ini merupakan pelipat tegangan (voltage multiplier) yang terdiri dari generator pulsa, dioda tegangan tinggi (penyearah) dan kapasitor yang disusun secara bertingkat.

2. Tegangan tinggi 0-5 kV

Tegangan ini diperlukan untuk mengionisasi gas-gas dopan dalam sistim sumber ion.

3. Tegangan tinggi 0 – 15 kV

Tegangan ini digunakan untuk mendorong keluar (ekstraktor) ion-ion dari ruang ionisasi ke sistim tabung pemercepat.

II.3. Sistim hampa

- Sistim hampa merupakan peralatan yang berfungsi untuk menghampakan sistim implantor ion. Agar ion-ion dapat mencapai sasaran tanpa mengalami tumbukkan dengan sisa molekul gas dalam sistim implantasi ion, maka sepanjang lintasan yang dilalui berkas ion dopan dari sistim sumber ion sampai ke sasaran harus dalam keadaan hampa.
- Tingkat kehampaan yang diperlukan dalam sistim implantasi ion adalah dalam orde 10^{-5} – 10^{-6} torr. Untuk dapat mencapai tingkat kehampaan tersebut diperlukan 2 jenis pompa yaitu pompa rotary dan pompa difusi
- Pompa rotary yang merupakan pemompaan tahap pertama mempunyai kemampuan penghampaan hingga 10^{-2} torr sedangkan untuk penghampaan lanjut digunakan pompa difusi yang mempunyai kemampuan penghampaan hingga 10^{-6} torr.

II.4. Tabung Akselerator

- Tabung ini berfungsi sebagai pemercepat dan sekaligus pemfokus berkas ion. Ion yang dihasilkan oleh sumber ion akan dipercepat di dalam tabung akselerator sebelum dicangkokkan pada sasaran. Tabung pemercepat ini terbuat dari bahan keramik yang didalamnya berisi banyak elektrode dengan tegangan yang semakin negatif terhadap elektrode sebelumnya.
- Medan listrik yang terbentuk di antara elektrode-elektrode akan membentuk bidang ekuipotensial yang dapat berfungsi memfokuskan selain mempercepat berkas partikel bermuatan. Potensial pada elektrode diberikan melalui sistim pembagi tegangan yang terdiri dari beberapa tahanan. Antara elektrode timbul beda potensial yang besarnya hampir sama sehingga berkas ion mendapat penambahan energi yang hampir sama ketika melalui setiap elektrode.

II.5. Sistim Pemisah Berkas Ion

- Sistim pemisah berkas ion berfungsi sebagai alat untuk memisahkan berkas ion menurut massanya (m/z), sehingga ion-ion yang sampai target betul-betul ion yang diinginkan. Komponen utama dari sistim pemisah berkas ion tersebut adalah kumparan elektromagnet.
- Prinsip kerja dari sistim pemisah berkas ion adalah berdasarkan hukum Lorentz. Lintasan ion di dalam medan magnet merupakan bagian dari lingkaran yang disebabkan oleh gaya Lorentz, sedangkan diluar medan magnet lintasan ion merupakan garis singgung pada lingkaran. Dengan mengatur besarnya kuat medan magnet akan dapat memisahkan ion dengan massa dan muatan tertentu pula.

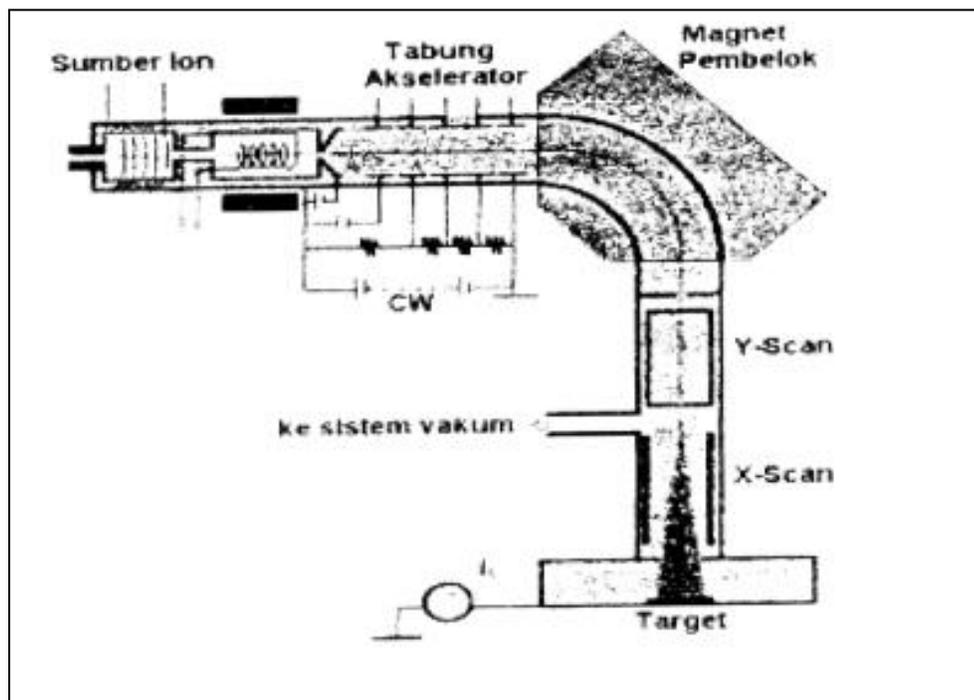
II.6. Sistim Penyapu Berkas Ion

- Sistim penyapu berkas ion digunakan untuk memperoleh penyinaran berkas pada permukaan secara seragam (*uniform*).
- Sistim ini terdiri dari dua pasang lempeng aluminium yang dipasang saling tegak lurus, agar berkas ion tersebar merata pada permukaan target. Sepasang lempeng pertama sebagai penyapu berkas secara vertikal dan sepasang lempeng

kedua sebagai penyapu berkas secara horisontal. Kedua pasang lempeng diberi tegangan yang dapat diubah-ubah dari nol hingga beberapa kilo volt.

II.7. Ruang Sasaran

- Berkas ion dopan yang dihasilkan oleh sumber ion setelah dipercepat dalam tabung akselerator selanjutnya ditembakkan pada bahan target yang diimplantasi. Bahan tersebut ditempatkan pada ruang sasaran. Ruang tersebut terdiri dari tingkap (aperture), mangkok Faraday dan pegangan bahan yang akan diimplantasi. Untuk mengukur arus berkas ion dopan, mangkok faraday dihubungkan dengan alat ukur microamper meter .



Gambar II.1 Skema Implantor Ion

II.8. Dosis Ion Yang Diimplantasikan

Dosis ion didefinisikan sebagai jumlah ion yang sampai pada permukaan target persatuan luas (ion/cm^2). Besaran ini akan menentukan jumlah atau prosentase ion yang terimplantasi. Nilai dosis ion sebagai fungsi arus berkas ion dan lamanya proses

implantasi (detik). Dalam prakteknya nilai dosis ion dapat diatur melalui dua cara yaitu dengan memvariasi besarnya arus ion sedangkan waktunya tetap atau lamanya proses implantasi divariasi sedangkan arus berkas ion dibuat tetap.

$$D = \frac{It}{qeA} \text{ ion / cm}^2$$

dengan,

- I = arus berkas ion (ampere)
- t = lamanya proses implantasi (detik)
- A = luasan berkas (cm²)
- q = charge state (+1, +2, +3,.....dst)
- e = muatan keunsuran elektron (1,602 × 10⁻¹⁹ coulomb)

II.9. Energi ion (keV)

Besarnya energi ion diperoleh dari tegangan pemercepat yang terpasang pada tabung pemercepat. Energi kinetik berkas ion akan menentukan kedalaman penembusan (penetration depth) juga akan menentukan profil distribusi konsentrasi ion-ion dalam material target. Besar kecilnya energi ion ini dapat dikontrol dengan mengatur besarnya tegangan tinggi yang terpasang.

II.10. Jangkau Ion (Range)

Berkas ion dengan energi awal E₀ (keV), dalam perjalanannya memasuki target sasaran karena berinteraksi dengan elektron maupun inti target akan kehilangan energinya dan akhirnya berhenti pada tempat tertentu.

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_e + \left(\frac{dE}{dx} \right)_n = N(S_e + S_n)$$

dengan,

- N = rapat massa pusat hamburan dari bahan target
- S_e = daya henti elektronik
- S_n = daya henti nuklir

Jarak total yang ditempuh oleh ion dalam target dihitung pada saat ion masuk target sampai ion berhenti di suatu lokasi dalam kisi-kisi atom target disebut jangkauan ion. Secara matematis jangkauan ion dalam suatu bahan dapat ditulis dalam bentuk persamaan;

$$R_t = \frac{60 (m_i + m_s) \left(z_i^{2/3} + z_s^{2/3} \right)^{1/2}}{\rho m_i m_s} E$$

dengan,

- m_i = massa atom ion (amu, gram)
- m_s = massa atom target (amu, gram)
- z_i = nomor atom ion
- z_s = nomor atom target
- ρ = rapat massa target (g/cm^3)
- E = energi ion datang (keV)

Untuk keperluan teknis, didefinisikan suatu besaran jangkauan ion yang searah dengan arah ion mula-mula (komponen R_t yang searah dengan arah ion mula-mula), dan besaran ini dinamakan jangkauan terproyeksi (R_p). Perbandingan jangkauan total dengan jangkauan terproyeksi dinyatakan dengan persamaan (Dearnaley, et.al., 1973)

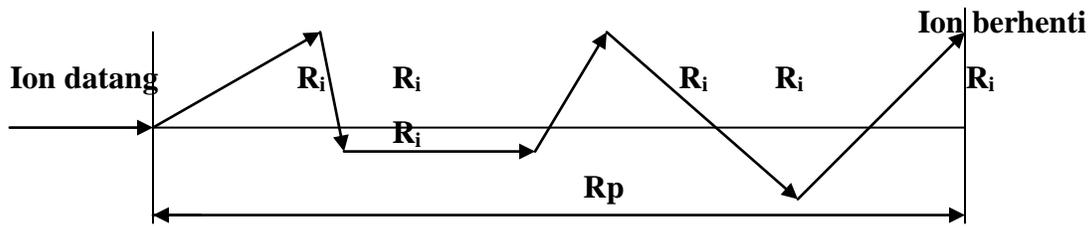
$$\frac{R_t}{R_p} = \frac{1}{4} \left\{ \left(1 + A \right)^{1/2} \frac{1 + A}{2A} \arccos \left(\frac{1 - A}{1 + A} \right) - 1 - 3A \right\}$$

dengan $A = m_s/m_i$

Bila $m_s < m_i$, maka persamaan diatas dapat didekati dengan persamaan berikut

$$\frac{R_t}{R_s} = 1 + \frac{m_s}{3m_i} = 1 + \frac{A}{3}$$

Bentuk lintasan ion dopan dalam suatu material dapat digambarkan seperti pada Gambar II. 2.



Gambar II. Bentuk lintasan ion dopan dalam suatu material

$$R_t = \sum_1^i R_i$$

Jumlah tumbukan dan perpindahan energi untuk setiap kali tumbukan adalah bersifat acak, sehingga suatu ion dopan dengan energi awal sama akan mempunyai jangkauan yang berbeda. Perbedaan jangkauan ini mengakibatkan adanya simpangan baku distribusi ion terproyeksi (σ_{Rp}). Besarnya simpangan baku tersebut adalah,

$$\sigma_{Rp} = \frac{3m_i + m_s}{4(m_i + m_s)} \left[\frac{m_i}{m_s} \right]^{1/2} R_p$$

II.11. Distribusi Konsentrasi Ion Terimplantasi

Proses perlambatan ion-ion yang bergerak dalam padatan merupakan proses statistik, oleh karena itu lokasi ion-ion yang terimplantasi bentuknya juga statistik dan profil distribusi ion pada kedalaman x memenuhi persamaan Gaussian. Distribusi tersebut disamping tergantung pada jangkauan ion terproyeksi juga tergantung pada dosis ion (D) dan simpangan baku (σ_{Rp}), yang secara matematis dapat dituliskan dalam bentuk;

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Rp}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x - R_p)^2}{\sigma_{Rp}^2} \right]$$

Secara perhitungan, jangkauan terproyeksi, simpangan baku maupun bentuk lintasan berkas ion maupun profil distribusi ion –ion terimplantasi dapat dengan mudah dan cepat dihitung menggunakan program TRIM (*Transport Interaction into Materi*)

Untuk kedalaman $x = R_p$ maka persamaan diatas menjadi,

$$N(x)_{maks} = \frac{D}{\sqrt{2\Pi}\sigma_{Rp}}$$

- Jadi pada kedalaman $x = R_p$, merupakan kedalaman dimana konsentrasi ion yang terimplantasi merupakan konsentrasi yang maksimum.
- Pada kedalaman $x = R_p \pm \sigma_{Rp}$, maka konsentrasi ion yang terimplantasi tinggal $0,61 N_{maks}$, atau sekitar 61 %.
- Pada kedalaman $x = R_p \pm 2\sigma_{Rp}$, maka konsentrasi ion yang terimplantasi tinggal $0,14 N_{maks}$, atau sekitar 14 %. Pada kedalaman $x = R_p \pm 3\sigma_{Rp}$, maka konsentrasi ion yang terimplantasi tinggal $0,01 N_{maks}$, atau sekitar 1 %.

III. APLIKASI IMPLANTOR ION UNTUK SURFACE TREATMENT

Aplikasi implantor ion untuk bahan surface treatment disini dimaksudkan untuk permukaan bahan-bahan logam seperti misalnya untuk peningkatan kekerasan, ketahanan aus, ketahanan lelah, ketahanan gesek, ketahanan korosi maupun oksidasi dll. Karena yang ditingkatkan kualitasnya hanya permukaannya saja maka teknik ini biasa dinamakan surface treatment (perlakuan permukaan). Jenis akselerator ion yang banyak digunakan dalam bidang rekayasa permukaan bahan (bahan maju) adalah jenis akselerator energi rendah ($< 1 \text{ MeV}$) dan arus berkas ion dalam orde ratusan μA serta jenis ion yang dapat divariasasi, dari atom ringan hingga berat maupun dari meterial gas hingga padatan (harus dibawa ke fasa uap dulu) Jenis akselerator ini biasa dinamakan Implantor Ion (*Ion Implanter*), yang secara khusus dirancang untuk mengimplantasikan/memasukkan atom asing ke dalam suatu bahan (paduan). Karena kedalaman penetrasi ion dalam orde μm alat ini hanya cocok untuk perlakuan permukaan (*surface treatment*).

Bermula dari permintaan pasar yaitu pada waktu para ahli fisika nuklir yang kesulitan dalam memproduksi target tritium yang berbentuk gas dan berbahaya, maka saat itu (sekitar tahun 1965) yang mampu menyelesaikan masalah tersebut adalah teknologi implantasi ion. Untuk memproduksi target tritium yang berwujud padatan maka tritium tersebut diionkan kemudian ditembakkan dan disimpan dalam tantalum yang berbentuk padatan. Dengan diperolehnya tritium dalam bentuk padat maka para ahli fisika nuklir dengan mudah memproduksi neutron cepat dengan cara menembakkan ion deuterium ke permukaan target tritium melalui reaksi nuklir (D,T). Alat yang digunakan untuk proses tersebut juga implantor ion, sehingga implantor ion yang digunakan untuk memproduksi neutron sering dinamakan Generator Neutron.

Sejak sukses besar tersebut aplikasi implantor ion dikembangkan pada pembuatan komponen elektronik dalam pembuatan sambungan P-N maupun rangkaian terpadu dan ternyata sukses besar pula dan hingga kini aplikasi implantor ion telah dikembangkan dalam bidang pembuatan komponen elektronika sudah mapan (*establish*).

Penelitian aplikasi implantor ion untuk rekayasa bahan untuk perlakuan permukaan material bukan elektronik (logam, keramik maupun kaca) dimulai tahun 1970. Penelitian tersebut difokuskan pada peningkatan sifat-sifat permukaan material. Sifat-sifat tersebut diantaranya adalah sifat mekanik (kekerasan, ketahanan aus, gesek, umur kelelahan), sifat kelistrikan, sifat kemagnetan, sifat kimia maupun sifat optis dan ternyata hasilnya juga sangat menggembirakan. Maka sejak itu akselerator ion banyak digunakan dalam bidang industri pembuatan komponen elektronik maupun untuk rekayasa bahan.

Tujuan utama dari aplikasi akselerator ion untuk rekayasa bahan adalah untuk meningkatkan unjuk kerja dari suatu bahan/komponen yang telah ada dengan cara menambahkan unsur dengan komposisi dan kedalaman/ketebalan tertentu.

III.1. KEUNGGULAN DAN KELEMAHAN PERLAKUAN PERMUKAAN MENGGUNAKAN IMPLANTOR ION

A. KEUNGGULAN

- Proses dapat dikerjakan pada temperatur kamar, dengan demikian kemungkinan timbulnya *thermal stress* dapat dihindari.

- Tidak ada perubahan dimensi yang berarti dari material/komponen ditreatment.
- Prosesnya lebih cepat (dalam orde menit, jika dibandingkan dengan yang konvensional ordennya hari).
- Tidak perlu perlakuan lagi (*reheat treatment*).
- Kedalaman penyisipan maupun distribusi atom dapat dikendalikan secara akurat dengan cara mengendalikan tegangan pemercepat.
- Kemurnian atom sisipan dapat dipilih secara akurat dengan menggunakan spektrometer massa yang tersedia pada mesin implantor ion.

B. KELEMAHAN

- Teknologinya sangat kompleks
- Harganya mahal/diperlukan modal awal yang cukup besar.

III.2. PARAMETER PROSES IMPLANTASI

Untuk mendapatkan hasil yang optimum, maka faktor-faktor yang harus diperhatikan adalah pertama parameter proses dan yang kedua diagram fasa. Parameter proses meliputi energi (E), dosis/intensitas (D) dan jenis ion yang diimplantasikan maupun jenis material sasaran. Energi ion akan menentukan kedalaman penetrasi ion terimplantasi, sedangkan dosis ion akan menentukan jumlah/prosentase/konsentrasi atom yang terimplantasi dalam material sasaran. Besarnya dosis ion ditentukan oleh nilai arus berkas (μA) maupun lamanya proses implantasi (detik). Adapun diagram fasa sangat penting karena diagram fasa merupakan petunjuk jumlah % atom yang harus diimplantasikan untuk menuju fasa tertentu.

III.3 BEBERAPA CONTOH APLIKASI AKSELERATOR ION UNTUK REKAYASA BAHAN DAN JENIS INDUSTRI DI INDONESIA YANG BISA DIJANGKAU DENGAN FASILITAS AKSELERATOR ION

Surface treatment biasa dikenakan pada material/komponen yang selalu mengalami interaksi aktif (gesekan, reaksi kimia) dengan sekitarnya. Beberapa komponen mesin yang sudah berhasil ditreatment dengan teknologi akselerator ion diantaranya adalah :

1. **Komponen mesin penukar panas (HE=Heat Exchanger)**

- Komponen ini banyak digunakan pada industri kimia, (**Petrokimia Gresik, Pabrik Batubara, Pabrik semen, Pabrik kertas, Pabrik makanan, dll**) dan Industri Nuklir (HTR, PLTG).
- Pada mesin penukar kalor (HE), ada komponen yang selalu beroperasi pada suhu tinggi (700°C) dan selalu dilewati fluida. Sebagai akibatnya komponen tersebut akan mengalami oksidasi/korosi.
- Dalam prakteknya komponen untuk HE sudah dipilih dari material yang tahan temperatur tinggi yang mampu menghasilkan lapis lindung (oksida proteksi) yang bebas kerak dan pori.
- Namun demikian oleh karena adanya stress dalam pertumbuhan oksidanya sendiri atau adanya strain yang dihasilkan peristiwa mekanis didalam komponen pada saat diperbaiki ataupun stress yang muncul dari proses *thermal cycling* karena perbedaan koefisien pengembangan panas antara oksida dengan meterial induknya maka lapisan proteksi yang telah terbentuk cenderung mengelupas.
- Untuk mengatasi masalah tersebut biasanya ditambahkan unsur-unsur lain pada jumlah dan ketebalan tertentu. Unsur-unsur yang ditambahkan untuk maksud tersebut dinamakan *element reactive*. Unsur-unsur yang termasuk didalam elemen reaktif adalah Ytrium (Y), Cermonium (Ce), Zirconium (Zr), Hafnium (Hf), dan Titanium (Ti). Elemen reaktif tersebut akan berperan sebagai penstabil dan penambah daya lekat dari lapisan oksida protektif yang telah terbentuk sehingga menjadi kuat walaupun terjadi *thermal cycling*.
- Penambahan elemen reaktif akan lebih efektif bila jumlahnya berkisar antara 0,1 % hingga 0,2 % berat dan dapat terdistribusikan secara merata pada ketebalan <

500 Å sebab bila penambahan elemen reaktif > 1 % atau kurang dari 0,1 % dan ketebalan < 500 Å, maka lapisan proteksi yang telah terbentuk justru bersifat sebaliknya yaitu mudah mengelupas. Dengan demikian proses korosi semakin cepat. Dengan kondisi tersebut, maka untuk memasukkan elemen reaktif dalam orde 0,1 % hingga 0,2 % berat dan dengan ketebalan < 500 Å serta yang dapat terdistribusi secara merata, maka teknologi yang paling tepat adalah teknologi akselerator implantasi ion. Dengan teknologi implantasi ion maka penambahan unsur dalam orde 0,1 % hingga 0,2 % berat dapat diatur secara akurat dengan cara mengatur energi ion. Sedangkan ketebalan kurang dari < 500 Å dapat dikontrol dengan cara mengatur energi ion, yaitu dengan mengatur tegangan pemercepat. Sedangkan homogenitas ion yang terimplantasi dapat diperoleh dengan cara mengatur sistem lensa yang ada pada sistem akselerator.

2. **Turbin/Blade/Sudu**

- Komponen ini banyak digunakan pada Industri Otomotif, PLTN, Industri Kereta Api, maupun Industri Perkapalan
- Komponen tersebut biasanya beroperasi pada suhu 600⁰C dan juga berinteraksi dengan fluida sehingga akan mudah terkorosi maupun teroksidasi, dengan demikian untuk dapat bertahan lama perlu surface treatment

3. **Bearing, Piston, Ring Seker, Poros Engkol, Roda Gigi.**

- Komponen ini banyak digunakan pada industri Otomotif, Industri Kereta Api maupun Industri Pesawat Terbang.
- Dalam operasinya, komponen-komponen tersebut selalu bergesekan dengan material lain dengan demikian akan mudah aus. Komponen tersebut biasanya terbuat dari paduan baja SS 440 C dan untuk meningkatkan sifat ketahanan ausnya, komponen tersebut diimplantasi dengan ion Ti+C atau Cr+N pada dosis dalam orde 10¹⁷ion/cm² dan energi 100 keV.

4. **Roller**

- Komponen ini banyak digunakan Industri Pertekstilan maupun Industri Kertas.

5. **Mata Bor**

Banyak digunakan pada industri permesinan maupun perminyakan

6. Dies/Cetakan

- Banyak digunakan pada industri otomotif, Industri pembuatan komponen Mesin

7. Sendi lutut buatan, sendi siku buatan , tempurung kaki buatan (*artificial knee*) dan tulang iga buatan.

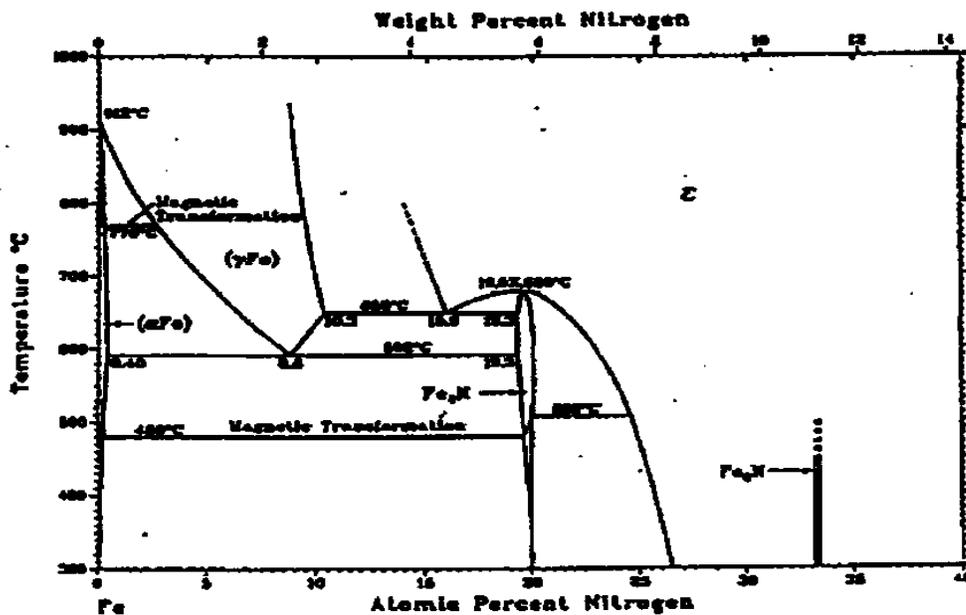
- Komponen ini banyak digunakan pada bidang biomedis, dan biasanya komponen tersebut terbuat dari paduan TiAl yang diimplantasi dengan ion Nitrogen (N).
- Paduan TiAl tersebut setelah diimplantasi dengan ion Nitrogen kekerasannya naik menjadi 3×, koefisien gesek turun dari 0,48 menjadi 0,15 dan 1000 × *reduction in the corrosive wear*. Pada Tabel III.1. disajikan beberapa contoh material dan jenis ion untuk beberapa aplikasinya.

Tabel III.1. Successful Bearing and Gear Application for The Ion Implantation Process.

Component	End use	Material	Ion Species	Benefits
Turbopump bearings	Space shuttle Main engine	SS 440 C	Ti + C Cr + N	Improved wear resistance
Instruments bearing	Navigational Guidance system (Gyroscope)	52100 steel SS 440 C	Ti + C	Improved fretting resistance
Main shaft bearings	Jet engine	M-50 steel M-50 NIL, steel	Cr Ta	Improved corrosion resistance
Main shaft bearings	Jet engine	M-50 steel M-50 NIL, steel	Ta	Improved rolling Contact fatigue life
Instruments bearings	X-rays tubes	M-50 steel	Pb, Ag	Solid lubrication
Instruments bearings	Vacuum environment	52100 steel SS--440 C	Pb, Ag Sn	Solid lubrication Reduced friction
Gears	Helicopter transmission	9310 steel	Ta	Reduced scuffing wear
Gears	Jet engine			
Miniatur precision gears	Space environment	SS 303	Ag, Pb Sn	Solid lubrication Reduced friction
Reciprocating piston	Compressors for refrigeration systems	M-2 tool steel	Ti +C	Much reduced wear

III.4. Pengerasan Suatu Logam

- Untuk mengeraskan komponen yang terbuat dari besi/baja karbon/baja paduan rendah, biasanya material tersebut dinitridasi (ditambah dengan atom nitrogen, N) atau dikarburasi (ditambah dengan atom karbon, C) . Dalam contoh ini sebagai bahan yang akan dinitridasi adalah besi (Fe).
- Sebelum melakukan proses nitridasi dengan teknik implantasi, beberapa hal yang harus dipertimbangkan yaitu **parameter proses, diagram fasa dan pengetahuan tentang sifat-sifat material**
- Diagram fasa merupakan diagram keseimbangan antara fasa-fasa yang ada dalam suatu paduan pada kondisi prosentase dan temperatur tertentu dari suatu paduan. Pengetahuan tentang diagram fasa disini mutlak diperlukan, karena diagram fasa merupakan petunjuk tentang prosentase/jumlah atom dopan yang harus diimplantasikan/dipadukan. Contoh diagram fasa Fe-N disajikan pada Gambar III.1
- Pengetahuan tentang sifat-sifat dari jenis ion maupun material target sangat penting, hal ini agar supaya perpaduan antara dopan dan target dapat memberikan hasil sesuai dengan yang diinginkan.



Gambar III.1. Diagram Fasa Fe-N

III.5. Contoh Perhitungan dengan Program TRIM

Tabel III.2. Hasil Perhitungan Dengan Program TRIM Untuk Ion Nitrogen (N₂) Yang Diimplantasikan Pada Besi (Fe)

(C) 1989 by J.P. Biersack and J.F. Ziegler

==> Version - 90.05 <==

Ion = N (Mass = 14)
 Target = C(0 %) + Si(1 %) + Fe(98 %)
 Density = 7.7903E+00 g/cm3
 Disk File Name = BCR
 Stopping Units = keV / micron

Ion Energy	dE/dx Elec.	dE/dx Nuclear	Projected Range	Longitudinal Stragglng	Lateral Stragglng
10.00 keV	1.820E+02	2.497E+02	119 A	98 A	103 A
11.00 keV	1.908E+02	2.487E+02	130 A	105 A	111 A
12.00 keV	1.993E+02	2.476E+02	141 A	112 A	118 A
13.00 keV	2.074E+02	2.462E+02	151 A	119 A	126 A
14.00 keV	2.152E+02	2.446E+02	162 A	126 A	133 A
15.00 keV	2.227E+02	2.430E+02	172 A	132 A	140 A
16.00 keV	2.300E+02	2.413E+02	183 A	139 A	147 A
17.00 keV	2.370E+02	2.395E+02	194 A	145 A	154 A
18.00 keV	2.439E+02	2.376E+02	204 A	152 A	161 A
20.00 keV	2.570E+02	2.339E+02	226 A	164 A	175 A
22.00 keV	2.695E+02	2.302E+02	247 A	176 A	188 A
24.00 keV	2.814E+02	2.264E+02	268 A	188 A	202 A
26.00 keV	2.929E+02	2.227E+02	290 A	200 A	215 A
28.00 keV	3.039E+02	2.191E+02	311 A	211 A	227 A
30.00 keV	3.145E+02	2.156E+02	333 A	222 A	240 A
33.00 keV	3.298E+02	2.105E+02	365 A	238 A	258 A
36.00 keV	3.444E+02	2.056E+02	397 A	254 A	277 A
40.00 keV	3.630E+02	1.994E+02	440 A	274 A	300 A
45.00 keV	3.849E+02	1.922E+02	493 A	298 A	329 A
50.00 keV	4.056E+02	1.856E+02	547 A	321 A	357 A
55.00 keV	4.254E+02	1.794E+02	600 A	343 A	384 A
60.00 keV	4.442E+02	1.737E+02	653 A	364 A	411 A
65.00 keV	4.623E+02	1.684E+02	706 A	384 A	436 A
70.00 keV	4.797E+02	1.635E+02	759 A	404 A	461 A
80.00 keV	5.127E+02	1.548E+02	864 A	441 A	510 A
90.00 keV	5.437E+02	1.467E+02	967 A	475 A	556 A
100.00 keV	5.730E+02	1.398E+02	1069 A	507 A	600 A

Multiply Stopping by	for Stopping Units
1.0000E-01	eV / Angstrom
1.0000E+00	keV / micron
1.0000E+00	MeV / mm
1.2837E-03	keV / (ug/cm2)
1.2837E-03	MeV / (mg/cm2)
1.2837E+00	keV / (mg/cm2)
1.1818E-01	eV / (1E15 atoms/cm2)
1.3491E-02	L.S.S. reduced units

III.6. Contoh Perhitungan

Untuk mengeraskan/nitridasi suatu besi (Fe) dengan teknik implantasi ion maka sebelum melakukan proses, tahapan yang harus dilakukan meliputi;

- 1) Misal fasa keras yang ingin dituju adalah fasa Fe₂N
- 2) Dari diagram fasa FeN dapat dilihat bahwa fasa Fe₂N, mengandung sekitar 33,5% at./11,2 %wt. Nitrogen dan sisanya 66,5% at./89,8% wt. Fe.
- 3) Misalkan kedalaman/ketebalan lapisan yang diinginkan/kedalaman penetrasi ion nitrogen adalah $X = R_p + 2\sigma_{Rp}$ dengan $R_p = 1069 \text{ \AA}$, $\sigma_{Rp} = 507 \text{ \AA}$ (dihitung dengan program TRIM), maka $X = 2083 \text{ \AA}$.
- 4) Maka untuk mencapai kedalaman tersebut energi implantor ion yang diperlukan adalah sekitar 100 keV.
- 5) Hitung konsentrasi atom Fe yang akan terimplantasi ion nitrogen melalui persamaan
- 6) Untuk mencapai 33,5 % at. Nitrogen berapa kira-kira dosis ion yang diperlukan?. Langkahnya adalah sebagai berikut,

$$7) \frac{\% \text{ at. N}}{\% \text{ at. Fe}} = \frac{33,5}{66,5}$$

$$8) N_{V, Fe} = \frac{\rho N_A}{B_A}$$

dengan,

$$\rho_{Fe} = 7,886 \text{ g/cm}^3$$

$$N_A = 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$$

$$B_{A, Fe} = 55,847 \text{ (amu)}$$

Maka bila data-data tersebut dimasukkan akan diperoleh

$$N_{V, Fe} = 0,85 \times 10^{23} \text{ atom/cm}^3.$$

- 9) Maka banyak atom Fe (N_{Fe}) pada kedalaman $X = 2083 \text{ \AA}$ adalah $N_{Fe} = N_{V, Fe} \times V$, dengan $V = X \times A$, dengan A adalah luasan benda uji misal 1 cm^2 . Maka volume benda uji yang akan diisi oleh atom nitrogen adalah $V = X \times A = 2083 \text{ \AA} \times 1 \text{ cm}^2 = 2083 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$, sehingga $N_{Fe} = 0,85 \times 10^{23} \text{ atom/cm}^3 \times 2083 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 = 1,77055 \times 10^{18} \text{ atom}$.

10) Banyak atom N yang harus diimplantasikan adalah sebesar

$$\frac{\%at.N}{\%at.Fe} = \frac{33,5}{66,5} \Rightarrow \text{Banyak.atom.N}_N = \frac{33,5}{66,5} \times 1,77055 \times 10^{18} = 8,5916 \times 10^{17} \text{ atom}$$

11) Bila diameter berkas misalnya 4 cm maka luas berkasnya sekitar $\Pi r^2 = 12,56$ cm^2 . Sedangkan dosis ion yang harus diimplantasikan sebesar

$$D = \frac{\text{Banyak.atom.N}}{\text{Luas.berkas}} = \frac{8,5916 \times 10^{17}}{12,56} = 0,68 \times 10^{17} \text{ ion/cm}^2$$

12) Dosis ion dapat diperoleh dengan dua cara yaitu dengan membuat arus berkas ion dipertahankan tetap sedang lamanya proses divariasi/dihitung atau arus divariasi sedang lamanya proses dibuat tetap. Dalam prakteknya akan lebih mudah membuat arus berkas ion tetap, sedangkan lamanya proses divariasi. Misalkan untuk ion Nitrogen (N_2^+) arus berkasnya 200 μA , maka waktu yang diperlukan untuk mencapai dosis tersebut dapat dihitung melalui persamaan

$$D = \frac{it}{eA} \Rightarrow t = \frac{DeA}{i} = \frac{0,68 \times 10^{17} \times 1,602 \times 10^{-19} \times 12,56}{200 \times 10^{-6}} = 11,4 \text{ menit}$$

Perhitungan tersebut merupakan contoh perhitungan untuk logam bukan paduan, tetapi untuk logam-logam paduan maka harus diperhitungkan pula unsur-unsur penyusunnya. Jadi besaran-besaran densitas (ρ), nomor atom ion maupun target (m_i dan m_s) merupakan besaran-besaran gabungan penyusunnya dan dapat dihitung melalui persamaan;

Untuk densitas campuran; ρ_{ef} .

$$\frac{1}{\rho_{ef.}} = \sum_i \omega_i \frac{1}{\rho_i}$$

dengan,

$\rho_{ef.}$ = densitas campuran, ρ_i = densitas elemen ke i

ω_i = fraksi berat/prosentase untuk elemen ke i

Untuk berat/massa atom efektif (A_{ef})

$$\sqrt{A_{ef}} = \left(\sum_i \frac{\omega_i}{\sqrt{A_i}} \right)^{-1}$$

Untuk nomor atom efektif, Z_{ef} .

$$Z_{ef} = \frac{\sum_{i=1} \frac{\omega_i}{A_i} Z_i^2}{\sum_{i=1} \frac{\omega_i}{A_i} Z_i}$$

dengan,

ω_i = fraksi berat/prosentase untuk elemen ke i, (i=1,2,3....)

A_i = berat atom untuk elemen ke i.

Z_i = nomor atom untuk elemen ke i

Contoh perhitungan misalnya untuk material baja tahan karat SS (1% Si, 19% Cr, 15 Mn, 10% Ni dan 69% Fe). Berapa ρ_{ef} , A_{ef} , dan Z_{ef} .

Dari tabel periodik diketahui bahwa;

No	Jenis unsur (i)	Nomor atom (A_i , amu)	Nomor atom (Z_i)	Rapat massa (ρ_i , g/cm ³)
1	Si	28,086	14	2,33
2	Cr	51,996	24	7,19
3	Mn	54,938	25	7,43
4	Ni	58,71	28	8,9
5	Fe	55,847	26	7,86

$$\frac{1}{\rho_{ef}} = \sum_i \omega_i \frac{1}{\rho_i} = 0,01/2,33 + 0,19/7,19 + 0,01/7,43 + 0,10/8,90 + 0,69/7,86 = 0,13108554$$

diperoleh $\rho_{ef} = 7,6286 \text{ g/cm}^3$.

Sedangkan berat atom efektifnya adalah

$$\sqrt{A_{ef}} = \left(\sum_i \frac{\omega_i}{\sqrt{A_i}} \right)^{-1} = \left(\frac{0,01}{\sqrt{28,086}} + \frac{0,19}{\sqrt{7,19}} + \frac{0,01}{\sqrt{7,43}} + \frac{0,1}{\sqrt{8,9}} + \frac{0,69}{\sqrt{7,86}} \right)^{-1} = 7,8882 \text{ amu.}$$

Dan nomor atom efektifnya adalah

$$Z_{ef.} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{A_i} Z_i^2}{\sum_{i=1}^n \frac{\phi_i}{A_i} Z_i} \Rightarrow Z_{ef.} = 25,3813$$

III.7 Proses Implantasi Untuk Surface Treatment

1. Persiapan benda uji

Benda uji/target harus dibentuk sesuai dengan tempat benda uji pada mesin implantor ion. Biasanya ukuran diameter tempat target sekitar 2-3 inchi, tebal benda uji < 1 cm, ukuran ini dapat dimodifikasi sendiri menjadi ukuran yang lebih kecil misalnya ukuran (1×1) cm². Karena benda yang akan diimplantasi/diuji biasanya masih dalam bentuk pejal/lempengan atau batangan, maka sebagai tahap awal penyiapan benda uji adalah pemotongan (kalau bisa dengan gergaji intan atau kawat intan) dengan ukuran sesuai dengan jenis pengujian yang akan dilakukan, penghalusan menggunakan kertas abrasive/amplas dari ukuran 80 mesh hingga 2000 mesh dan dilanjutkan dengan pempolisan menggunakan pasta intan/autosol/pasta gigi. Setelah tahap ini selesai dilanjutkan pencucian dengan air mengalir yang dicampur dengan detergen, dibilas dalam alkohol/acetone dan selanjutnya dikeringkan. Benda uji siap diimplantasi.

2. Pemilihan jenis ion dan jenis target

Pemilihan jenis ion maupun jenis material target ini sangat penting, karena hal ini sesuai dengan tujuan sifat akhir dari permukaan komponen yang ingin dicapai. Misalnya untuk mengeraskan komponen mesin yang terbuat dari logam (besi maupun baja) maka jenis ion yang paling tepat adalah ion-ion dari atom nitrogen atau karbon, untuk contoh lain seperti yang disajikan pada Tabel III.1.

3. Penentuan besarnya energi dan dosis ion

Besarnya energi ion akan menentukan ketebalan lapisan yang ingin dicapai sedangkan dosis ion akan menentukan jumlah ion/atom yang harus

diimplantasikan. Dosis ion ini akan menentukan sifat-sifat permukaan komponen/bahan. Untuk menentukan energi ion yang diperlukan untuk proses implantasi, maka terlebih dahulu harus ditentukan berapa ketebalan lapisan yang diinginkan. Sesudah itu dilakukan perhitungan simulasi dengan program TRIM (kalau tidak punya program TRIM dapat dihitung secara manual). Dari perhitungan program TRIM diantaranya dapat diketahui kedalaman/jangkauan maupun pelebarannya sebagai fungsi energi, jenis ion maupun jenis material target. Contoh perhitungan menggunakan program TRIM untuk jenis ion N dan target besi Fe disajikan pada Tabel. III.2. Dari data program TRIM tersebut dapat diketahui berapa energi yang diperlukan untuk mencapai kedalaman/ketebalan yang ingin dicapai.

4. Penentuan waktu yang diperlukan untuk proses implantasi

Untuk menentukan lamanya proses implantasi langkah-langkahnya seperti yang disajikan pada contoh perhitungan Sub.Bab III.7

5. Proses implantasi

Langkah-langkah kerja sebelum, selama atau sesudah proses implantasi dapat dibaca pada Lampiran I atau dapat dibaca pada buku petunjuk praktikum pada pelatihan ini.

IV. APLIKASI IMPLANTOR ION UNTUK FABRIKASI KOMPONEN ELEKTRONIK DAN SEL SURYA

- Dewasa ini teknologi mikroelektronik telah menjangkau hampir segala aspek kehidupan. Di akhir abad 20 ini pasaran semikonduktor sebagai bahan baku komponen mikroelektronik telah mencapai 130 billion US\$.
- Dana sebesar itu hampir diserap pada 5 bidang produk seperti *automotive electronics, computer, consumer electronics, industrial electronics* dan *telecommunications*.
- Banyaknya kegunaan dan kuatnya persaingan pasar, menuntut suatu metode yang cepat, murah dan efisien dalam mengembangkan dan mengoptimalkan teknologi baru. Satu diantara sekian banyak teknologi

baru yang selalu dikembangkan untuk fabrikasi komponen mikroelektronik saat ini adalah teknologi implantasi ion .

- Dengan menggunakan mesin implantasi ion, dimungkinkan untuk menyisipkan berbagai jenis ion ke dalam bahan semikonduktor pada kedalaman dan jumlah tertentu/yang diinginkan, sehingga akan diperoleh pola rangkaian dari piranti elektronik maupun mikroelektronik sesuai dengan yang dikehendaki.
- Ditinjau dari segi aspek teknis, metode implantasi ion ini jauh lebih unggul dalam pengontrolan pencangkakan impuritas kedalam semikonduktor dibanding metode konvensional seperti metode difusi termal. Sebagai contoh, dengan arus berkas ion dalam orde ratusan mikroamper hingga beberapa miliamper, proses implantasi ion dari orde $10^{11} - 10^{13}$ ion/cm² dapat dilakukan hanya dalam orde menit.
- 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
- Disamping itu , teknik implantasi ion banyak digunakan untuk fabrikasi sel surya, laser diode, fotodiode, detektor nuklir resolusi tinggi seperti detektor surface barrier (untuk radiasi α), SiLi dan Geli (untuk radiasi sinar-X), NaITl (untuk radiasi γ), maupun untuk fabrikasi lapisan tipis (*thin layer*) sensor gas dan sensor magnet dari bahan-bahan ZnO, SnO₂, TiO₂, CeO₂ dengan doping Pt, Au maupun Pd atau Al.
- Dalam era globalisasi memasuki milenium ke 2 ini, bidang telekomunikasi dan informatika akan sangat besar perannya bagi suatu negara dalam pembangunan ekonomi. Ditinjau dari aspek ekonomi, teknik implantasi ion dapat memberikan keuntungan yang sangat besar

terutama karena proses implantasi berlangsung singkat, bersih, tidak memerlukan kemurnian dopan yang tinggi dan parameter proses dapat dikontrol secara akurat dan otomatis serta prosesnya dapat dilakukan pada suhu kamar.

- Sejak pengembangan teknik implantasi ion pada tahun 1960 hingga tahun 2000 sudah ada sekitar 6000 sistem implantor ion diseluruh dunia dengan melibatkan sekitar 15 perusahaan pembuat mesin. Sekarang diproduksi sekitar 200 – 400 implantor ion pertahun dengan harga berkisar antara US\$ 1M – US\$ 6 M.

IV.1. BAHAN BAKU KOMPONEN ELEKTRONIK

- Bahan baku untuk fabrikasi komponen mikroelektronik adalah semikonduktor Silikon (Si) dan Germanium (Ge). Namun semikonduktor germanium sekarang jarang sekali digunakan sebagai bahan baku dalam fabrikasi komponen elektronik, hal ini dikarenakan Germanium sebagai komponen elektronik dapat dioperasikan pada suhu kamar dan biasanya perlu didinginkan dengan nitrogen cair (N_2 cair).
- Untuk jadi komponen aktif, semikonduktor murni (intrinsik) harus diubah dahulu menjadi semikonduktor tipe P (dimana pembawa muatannya didominasi oleh hole) atau tipe N (dimana pembawa muatannya didominasi oleh elektron). Untuk membuat semikonduktor tipe P atau tipe N maka semikonduktor intrinsik tersebut harus didoping dengan unsur-unsur dari Grup III atau Grup V dari unsur-unsur pada Tabel Periodik. Jenis dan sifat-sifat doping maupun tipe konduksi semikonduktor Si dan Ge disajikan pada Tabel IV.1.

Tabel IV.1. Jenis dan sifat doping maupun tipe konduksi semikonduktor Si dan Ge

Jenis Ion	No. valensi	No. atom	Energi ionisasi (eV) untuk menimbulkan pembawa bebas		Fungsi	Tipe konduksi	Sumber
			Ge	Si			
Grup III							
B	3	5	0,0104	0,0450	Aseptor	P	B₂H₆, BCl₃, BF₃
Al	3	13	0,0102	0,0570	Aseptor	P	Padatan
Ga	3	31	0,0108	0,0650	Aseptor	P	Padatan
In	3	49	0,0112	0,1600	Aseptor	P	Padatan
Grup V							
P	5	15	0,0120	0,0440	Donor	N	PH₃, PCl₃, PF₃
As	5	33	0,0127	0,0490	Donor	N	AsH₃, AsCl₃
Sb	5	51	0,0096	0,0390	Donor	N	Padatan

IV.2. DOPING DENGAN TEKNIK IMPLANTASI ION

- Untuk fabrikasi piranti elektronik banyak tahapan yang harus dilakukan, diantaranya adalah *lithography*, *etching*, *deposition*, *chemical mechanical polishing*, *oxidation*, *ion implantation* dan *diffusion*, *metalization* dsb. Jadi untuk membuat suatu piranti elektronik sampai dapat berfungsi, implantasi ion merupakan satu diantara banyak tahapan yang harus dilakukan.
- Dengan teknik implantasi ion ini semua jenis impuritas dopan dapat dicangkokkan. Kontaminasi pada permukaan wafer jauh lebih rendah dibandingkan dengan teknik yang 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. Besarnya kerusakan radiasi tergantung pada dosis, energi dan temperatur yang meningkat sebagai akibat tumbukan ion-ion dopan energi tinggi dengan wafer silikon. Bila kerusakannya serius maka kristal wafer akan berubah menjadi amorphous. Struktur amorphous ini stabil dan dapat diperbaiki menjadi kristal lagi dengan cara anil pada temperatur kritis. Temperatur kritis adalah ialah temperatur yang diperlukan untuk mengkristalkan kembali hingga menjadi aktif elektrik. Temperatur kritis untuk Si, Ge, GaAs masing-masing adalah 650°C , 400°C dan 250°C .

- Dalam fabrikasi komponen elektronik implantasi ion banyak digunakan untuk pendopingan atom-atom dari golongan III (seperti B, Al, Ga dan In) atau V (seperti P, As dan Sb) kedalam bahan semikonduktor (Si atau Ge), untuk oksigen O_2 atau N_2 kedalam/permukaan silikon untuk pembuatan lapisan isolator (SiO_2 atau Si_3N_4).

IV.3. PEMBENTUKAN SAMBUNGAN P-N

- Sambungan P-N merupakan komponen elektronik yang paling sederhana dan biasa dinamakan diode (penyearah) dan juga sel surya pada dasarnya juga merupakan sambungan P-N. Sedang komponen-komponen elektronik yang lebih rumit seperti IC merupakan gabungan dari beberapa hingga jutaan sambungan P-N.
- Untuk membuat sambungan P-N beberapa hal yang harus diperhatikan adalah sebagai berikut; (1) persiapan wafer silikon, (2) pemilihan jenis ion, (3) penentuan besarnya energi dan dosis ion (4) waktu yang diperlukan untuk proses implantasi, (5) proses implantasi (6) proses anil dan yang terakhir adalah (7) karakterisasi.

1. Persiapan wafer silikon

Silikon/Germanium sebagai bahan baku untuk fabrikasi komponen elektronik dipasaran dijual dalam bentuk serbuk/powder, batangan/rod ataupun dalam bentuk kepingan-kepingan/wafers. Juga dijual dalam berbagai tipe konduksi

misalnya intrinsik, tipe P ataupun tipe N. Jadi untuk membuat sambungan P-N atau ingin membuat sel surya, yang paling mudah adalah membeli wafer silikon tipe P atau tipe N dan jenis dopannya seperti seperti B, Al, Ga, In atau P,As dan Sb). Kalau yang dimiliki silikon wafer tipe P maka dopannya harus dipilih dopan yang bertipe N seperti P,As atau Sb. Sedangkan kalau yang tersedia silikon wafer bertipe N maka dopannya harus dipilih dopan yang bertipe P, seperti B, Al, Ga, atau In. Sebelum proses implantasi, sebagai tahap awal adalah pemotongan (menggunakan gergaji intan atau kawat intan) silikon wafer menjadi potongan-potongan benda uji sesuai dengan kebutuhan, kemudian dilanjutkan pencucian dengan air mengalir yang dicampur dengan detergent dan selanjutnya dikeringkan. Untuk membuka lapisan oksida yang terbentuk selama dalam penyimpanan (walaupun tipis sekali, orde Angstrom) maka sebelum diimplantasi silikon wafer tersebut dietsa dengan larutan Cp4A (HNO₃, HF, CH₃COOH dengan perbandingan volume ; 5,3,3) dengan teknik *swabbing*. Sesudah proses selesai dilanjutkan pencucian dan pengeringan lagi. Benda uji siap diimplantasi.

2. Pemilihan jenis ion

Untuk membuat sambungan P-N atau N-P, jenis dopannya adalah seperti B, Al, Ga, In atau P,As dan Sb). Kalau yang dimiliki silikon wafer tipe P maka dopannya harus dipilih dopan yang bertipe N seperti seperti P,As atau Sb. Sedangkan kalau yang tersedia silikon wafer bertipe N maka dopannya harus dipilih dopan yang bertipe P, seperti B, Al, Ga, atau In.

3. Penentuan besarnya energi dan dosis ion

Untuk membuat sambungan P-N, energi yang diperlukan adalah berkisar antar puluhan keV hingga 100 keV sedang dosisnya berkisar antara 10^{11} ion/cm² hingga 10^{13} ion/cm².

4. Penentuan lamanya proses implantasi

Langkah-langkah penentuan lamanya proses implantasi seperti pada contoh yang diberikan pada perhitungan untuk contoh pengerasan logam .

5. .Proses implantasi

Langkah-langkah kerja sebelum, selama atau sesudah proses implantasi dapat dibaca pada Lampiran I atau dapat dibaca pada buku petunjuk praktikum pada pelatihan ini.

6. Proses anil

Sebagai akibat implantasi ion, akan mengakibatkan kerusakan pada kisi-kisi kristal. Kerusakan ini dapat mengurangi jumlah atom terimplantasi yang aktif listrik. Karena atom-atom tersebut tidak pada posisi yang tepat, juga menjadi penghambur pembawa di kisi sehingga mengurangi mobilitas pembawa. Fungsi aniling disini adalah untuk memperbaiki kerusakan kisi akibat radiasi ion. Tinggi rendahnya temperatur aniling ini tergantung pada tingkat kerusakan radiasinya. Sebagai contoh untuk silikon yang diimplantasi dengan dosis besar maka temperatur aniling yang diperlukan adalah diatas 650°C . Pada prakteknya temperatur anil yang digunakan untuk fabrikasi mikroelektronik antara 300°C – 900°C tergantung pada jenis ion, energi dan dosis.

6. Karakterisasi

Tujuan utama dari fabrikasi komponen elektronik disini adalah sifat elektriknya maka karakterisasi yang paling tepat dilakukan adalah karakterisasi sifat elektriknya. Sifat-sifat elektrik tersebut diantaranya adalah resistansi/resistivitas, karakteristik I-V maupun C-V dllnya. Sedang karakterisasi yang lain seperti struktur kristal, struktur mikro, bukan berarti tidak penting, tetapi tidak harus dilakukan.

V. BEBERAPA CONTOH APLIKASI IMPLANTOR ION UNTUK BERBAGAI KEPERLUAN.

A. ELEKTRONIK

- Piranti IC, LSI, dan Semikonduktor
- Elektrode, Konektor : Al, paduan Al, Ti, Pt, Au, Mo-Si & Ti-Si.
- Isolator, Pasivasi : SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃.

B. Piranti Penampil

- Lapisan Konduktor Transparan : In₂O₃, SnO₂, ITO.

C. Perekam Magnetik

- Lapisan Magnet Lunak : Fe-Ni, Fe-Si-Al
- Lapisan Magnet keras : Fe₂O₃, Co

D. Komponen Elektronik

- Tahanan : Ta, Ta-N, Ta-Si, Ni-Cr
- Thermalprinter head : Ta-N, SiO₂, Ni-Cr, Ta₂O₃, SiC, Ta-Si.
- Bahan Piezoelektrik : ZnO, AlN, PZT, BaTiO₃, LiNbO₃.
- Elektrode, Konektor : Al, Cr, Au, Ni-Cr, Pb, Cu.

E. Untuk Pemanfaatan Energi Surya

- Sel Surya : Si, Ag, Ti, In₂O₃
- Lapisan Penyerap Selektif : Metal karbida
- Lapisan Pemantul Selektif : In₂O₃
- Lapisan Elektrode Transparan : ZnOAl

F. Optik

- Cermin : Al, Ag, Cu, Au
- Shadowmask : Cr

G. Mekanik

- Pelumasan : MoSi
- Ketahanan aus : TiC, TiN, Cr, Pt, Ta.
- Anti korosi : Cr

H. Dekorasi

- Dekorasi plastik : Cr, Al, Ag

VI. APLIKASI GENERATOR NEUTRON

Neutron pertama kali ditemukan oleh Chadwick pada tahun 1932 sebagai hasil dari reaksi inti antara partikel alpha dengan inti Beryllium. Reaksi yang dihasilkan adalah ${}_4\text{Be}^9(\alpha, n){}_6\text{C}^{12}$. Dengan menggunakan sumber alpha dari Polonium dan target Beryllium serta detektor tabung ionisasi Chadwick dapat mengidentifikasi adanya neutron. Reaksi tersebut diatas sebagai dasar pembentukan sumber neutron. Sekarang telah banyak diproduksi sumber neutron dari radioisotop pemancar alpha dan Beryllium dengan cara mencampur kedua radioisotop dalam wadah berbentuk kapsul sehingga merupakan sumber neutron. Neutron juga ternyata dapat dihasilkan dari pembelahan spontan inti ${}^{252}\text{Cf}$. Contoh sumber neutron adalah ${}^{239}\text{Pu}/\text{Be}$, ${}^{241}\text{Am}/\text{Be}$, ${}^{238}\text{Ra}/\text{Be}$, ${}^{244}\text{Cm}/\text{Be}$ dan ${}^{210}\text{Po}/\text{Be}$. Sumber neutron ini mempunyai spektrum energi yang cukup lebar dari ephithermal sampai dengan cepat. Umur sumber neutron tersebut dari orde ratusan tahun (${}^{239}\text{Pu}/\text{Be}$) sampai dengan orde hari (${}^{210}\text{Po}/\text{Be}$). Dengan berkembangnya ilmu dan teknologi, neutron dapat diperoleh dari reaktor nuklir dan akselerator partikel bermuatan. Dari reaktor nuklir diperoleh neutron thermal sampai dengan cepat, terutama neutron thermal yang terjadi akibat perlambatan neutron dari proses pembelahan inti Uranium atau bahan bakar nuklir lainnya. Sedangkan dari akselerator diperoleh neutron cepat dengan bantuan reaksi (α, n) , (p, n) , atau (d, n) yang terjadi tumbukan partikel alpha (α), proton (p) dan deuteron (d) yang dipercepat dengan suatu target. Neutron yang dibangkitkan dari akselerator dapat berenergi tunggal atau majemuk sesuai dengan reaksi inti yang digunakan. Energinya dapat divariasikan dengan merubah energi partikel penumbuk.

VI.1. SIFAT-SIFAT NEUTRON

Neutron adalah suatu partikel tak bermuatan, yang timbul berdasarkan reaksi inti penghasil neutron. Neutron mempunyai massa sebesar $1,0014 \text{ sma} = 939,5 \text{ MeV}$, yang berarti 1838,5 kali massa elektron atau 1,0014 kali massa proton. Oleh karena massa neutron lebih besar dari pada massa gabungan proton dan elektron, maka neutron adalah partikel radioaktif dengan waktu paro $T_{1/2} = 11,7 \text{ menit}$. Dengan waktu paro $T_{1/2} = 11,7 \text{ menit}$ partikel tersebut meluruh melalui skema



Karena neutron tak bermuatan maka dalam menembus atom-atom bahan tidak terpengaruh oleh gaya-gaya Coulomb yang ada. Oleh karena itu neutron sangat mudah sampai ke inti atom meskipun dengan energi rendah dan mengadakan interaksi nuklir dengan inti-inti atom target.

VI.2 INTERAKSI NEUTRON DENGAN MATERI

Interaksi neutron dengan materi mempunyai sifat yang spesifik dibanding partikel nuklir yang lain. Beberapa sifat spesifik berkaitan dengan sifat neutron itu sendiri adalah bahwa neutron tidak bermuatan dan mempunyai massa hampir sama dengan massa proton sehingga dalam interaksinya dengan materi tidak dipengaruhi oleh gaya Coulomb dan neutron mampu mendekati inti. Dengan kata lain neutron mempunyai daya tembus yang besar dibanding partikel nuklir lainnya. Sehingga neutron hanya berinteraksi dengan inti atom melalui gaya inti. Interaksi yang terjadi sangat tergantung pada energi neutron yang digunakan. Pada dasarnya energi neutron dibedakan menjadi 4 daerah energi yaitu;

- Neutron Thermal = 0,025 eV
- Neutron Epithermal = 1 eV
- Neutron Lambat = 1 keV
- Neutron Cepat > 100 keV

Proses yang terjadi akibat adanya perbedaan energi ini mengakibatkan timbulnya berbagai bentuk interaksi antara neutron dengan materi. Diantaranya adalah peristiwa hamburan, yaitu;

- Neutron hanya dibelokkan arahnya saja.
- Peristiwa yang kedua yang tergolong reaksi hamburan adalah neutron memasuki inti atomnya, tetapi sebelum terjadi suatu peristiwa yang lain neutron tadi telah terlepas dari inti atom
- Peristiwa yang ketiga adalah bahwa neutron betul-betul masuk ke dalam inti, sehingga terjadi inti majemuk.
- Inti majemuk ini dalam keadaan terksitasi dan memancarkan partikel-partikel radioaktif.

VI.3. BEBERAPA KEMUNGKINAN INTERAKSI NEUTRON DENGAN MATERI

1. Hamburan elastis (n,n)

Pada peristiwa ini jumlah energi gerak sebelum dan sesudah tumbukan tidak berubah. Energi kinetik neutron awal diserahkan sebagian atau seluruhnya kepada inti atom materi, pemindahan energi ini tidak menyebabkan inti menjadi tereksitasi. Jadi inti tetap pada kedudukan semula dan bergerak dengan energi kinetik sebesar yang diterima. Pemindahan energi neutron untuk hamburan elastis akan efektif jika massa atom materi hampir sama dengan massa neutron, contoh reaksi ini $H(n,n)$.

2. Hamburan tak elastis (n,n')

Dalam peristiwa ini jumlah energi dari sistem tumbukan tidak berubah, tetapi jumlah energi kinetik sesudah terjadinya peristiwa tumbukan lebih kecil dari jumlah energi kinetik sebelum peristiwa tumbukan. Sehingga energi kinetik ini dapat dipakai untuk merangsang inti atom yang ditumbuk ke tingkat energi yang lebih tinggi. Pada tingkat energi yang lebih tinggi ini, inti atom dalam keadaan tidak stabil. Maka inti atom akan kembali ke tingkat dasar dengan memancarkan foton gamma.

3. Tangkapan radioaktif neutron (n, γ)

Peristiwa ini hampir terjadi untuk semua reaksi, bilamana neutron betul-betul masuk ke dalam inti atom. Inti yang baru terbentuk biasanya tidak stabil dan akan mengalami proses peluruhan radioaktif. Kebolehjadian terbesar reaksi ini untuk neutron termal. Contoh reaksi ini adalah $Al(n, \gamma)$

4. Reaksi Pembentukan Partikel

Partikel-partikel yang terbentuk dalam peristiwa ini adalah alpha, proton, atau deuteron berdasarkan reaksi (n, α) , (n,p) , dan (n,d) . Partikel-partikel bermuatan sebelum terlepas dari inti atom harus menembus tanggul Coulomb. Peristiwa ini kebanyakan berlangsung pada neutron cepat dengan inti-inti ringan, kecuali neutron thermal pada reaksi (n,α) dimana energi eksotermisnya cukup untuk mengatasi tanggul Coulomb. Contoh reaksi ini $Al(n,p)$.

5. Reaksi pembelahan

Pada penyinaran neutron untuk inti-inti berat akan terjadi reaksi pembelahan inti menjadi dua inti sebagai belahan-belahan yang biasanya tidak stabil dan akan mengalami proses peluruhan radioaktif. Contoh reaksi ini adalah U(n,f).

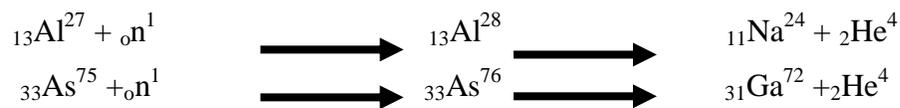
VI.4. INTERAKSI NEUTRON YANG MENUNJANG AKTIVASI

- Neutron yang dikenakan suatu bahan atau medium disamping akan menimbulkan hamburan, baik elastis maupun tak elastis, juga akan menimbulkan reaksi inti. Jika menggunakan generator neutron sebagai sumber aktivasi, maka reaksi inti berlangsung oleh neutron berenergi tinggi, kecuali jika dikehendaki neutron thermal untuk proses aktivasi maka keluaran neutron dari generator neutron harus dithermalkan lebih dahulu dengan suatu bahan moderator.
- Pada umumnya inti-inti bahan yang disinari dengan neutron akan menjadi radioaktif dan akan meluruh dengan periode setengah yang tertentu. Dengan mengukur besar keradioaktifan bahan yang terbentuk, maka dapat ditentukan unsur pada bahan tersebut secara kualitatif maupun kuantitatif.
- Beberapa macam reaksi inti yang terjadi apabila neutron dikenakan pada bahan :

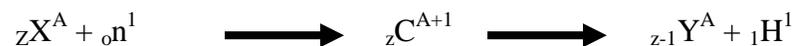
1. Reaksi (n, α)



Hasil dari reaksi ini menimbulkan inti majemuk ${}_Z\text{C}^{A+1}$ yang akan meluruh dengan memancarkan partikel alpha, inti yang terbentuk nomor massanya berkurang tiga dan nomor atomnya berkurang dua dari pada inti semula. Contoh untuk reaksi ini :

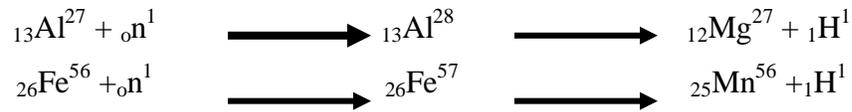


2. Reaksi (n,p)



Pada reaksi ini terbentuk proton, nomor massa tidak berubah sedangkan muatannya berkurang satu.

Contoh untuk reaksi ini :

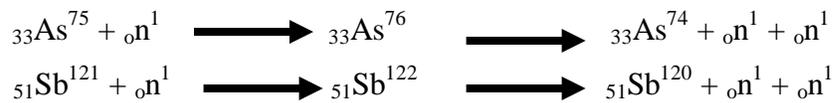


3. Reaksi (n, 2n)



Pada reaksi ini, inti atom menangkap satu neutron dan memancarkan dua neutron. Muatan ini tidak berubah sedangkan nomor massanya berkurang satu.

Contoh untuk reaksi ini :

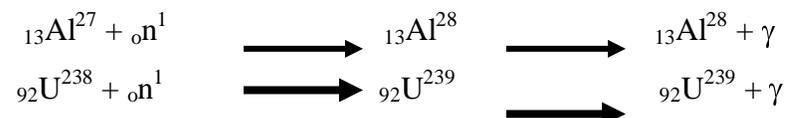


4. Reaksi (n, γ)



Pada reaksi ini, inti majemuk memancarkan satu atau lebih foton gamma. Nomor massa bertambah satu sedangkan nomor atomnya tetap.

Contoh untuk reaksi ini :



Inti-inti yang terbentuk pada reaksi-reaksi (n,a), (n,p), (n, 2n) dan (n, γ) bersifat radioaktif dan akan mengalami proses peluruhan. Oleh karena itu reaksi-reaksi inti diatas dapat digunakan untuk mendukung analisa aktivasi.

VI.5. ANALISIS PENGAKTIFAN NEUTRON CEPAT (APNC)

- Analisis pengaktifan neutron cepat (APNC) merupakan metode analisis unsur dalam suatu bahan dengan menggunakan neutron cepat.
- Dalam APNC, cuplikan yang akan dianalisis, diiradiasi dengan neutron cepat yang dihasilkan oleh generator neutron.
- Akibat iradiasi neutron maka inti-inti atom dalam cuplikan menangkap neutron dan menjadi radioisotop
- Radioisotop yang dihasilkan tergantung pada jenis dan energi penumbuk (dalam hal ini neutron cepat), jenis unsur yang terkandung dalam cuplikan serta jenis reaksi inti yang terjadi.
- Setelah paparan radiasi dianggap cukup, iradiasi dihentikan dan cuplikan dikeluarkan dari ruang iradiasi generator neutron.
- Sinar gamma yang dipancarkan dari berbagai radioisotop dalam cuplikan kemudian dianalisis dengan menggunakan spektrometer gamma.
- Pada APNC analisis dapat dilakukan secara kualitatif maupun kuantitatif.
- Analisis secara kualitatif adalah untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung dalam cuplikan dan jenis reaksi inti yang terjadi. Hal ini dapat dilakukan karena untuk setiap isotop akan memancarkan radiasi karakteristik yang berbeda-beda.
- Sedangkan analisis secara kuantitatif untuk menentukan kadar unsur-unsur yang terkandung dalam cuplikan hal ini dapat dilakukan dengan membandingkan aktivitas isotop yang diketahui komposisi dan kadarnya.
- Metode APNC sangat baik digunakan terutama untuk melacak unsur-unsur ringan suatu cuplikan.
- Pemilihan reaksi yang tepat akan meningkatkan analisis unsur-unsur yang dikehendaki dan menekan reaksi pengaktifan unsur-unsur lain yang bisa mengganggu analisis,
- Reaksi yang sering digunakan pada APNC adalah reaksi inti (n,p) , (n,α) , dan $(n,2n)$

VI.6. PRINSIP ANALISIS PENGAKTIFAN NEUTRON CEPAT

- Akibat iradiasi neutron pada cuplikan, maka sebagian unsur menjadi radioaktif.
- Tetapi karena pada saat yang sama radionuklida yang terbentuk tersebut meluruh, maka laju bersih pembentukan radionuklida merupakan selisih antara laju produksi total dengan laju peluruhannya.
- Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\frac{d_n}{d_t} = \left(\frac{d_n}{d_t} \right)_{produksi} - \left(\frac{d_n}{d_t} \right)_{peluruhan} = \Phi \sigma N_T - \lambda n$$

dengan;

- n = jumlah inti radioaktif yang terbentuk
- ϕ = fluks neutron (neutron/cm² detik)
- σ = tampang lintang aktivasi (cm²)
- N_T = jumlah nuklida sasaran
- λ = tetapan peluruhan radionuklida yang terbentuk (1/detik)

Persamaan diatas merupakan persamaan diferensial orde satu tingkat pertama. Untuk waktu irradiasi t_{irr} dan sebelum iradiasi inti dalam cuplikan stabil ($n = 0$ pada saat $t = 0$), maka penyelesaian persamaan diatas adalah;

$$n = \frac{\Phi \sigma N_T}{\lambda} \left(1 - e^{-\lambda t_{irr}} \right)$$

sehingga aktivitasnya adalah;

$$A_{irr} = \lambda n = \Phi \sigma N_T \left(1 - e^{-\lambda t_{irr}} \right)$$

- Harga A_{irr} .dalam persamaan diatas adalah aktivitas pada saat berakhirnya irradiasi. Dalam praktek untuk melakukan pencacahan cuplikan harus dipindahkan dari ruang irradiasi keruang pencacahan. Waktu pemindahan ini dinamakan waktu transit dan harus diketahui secara cermat pada analisis unsur yang mempunyai waktu paro pendek.
- Untuk memperoleh informasi maksimum pada analisis unsur sengaja diberikan waktu tunda sebelum dilakukan pencacahan.
- Waktu tunda (t_d) ini lazim disebut sebagai waktu pendinginan (*cooling time*)

Aktivitas radionuklida pada waktu tunda (t_d) setelah berakhirnya iradiasi adalah;

$$A_d = A_{ir} \cdot e^{-\lambda t_d} = \Phi \sigma N_T \left(- e^{-\lambda t_{ir}} \right) e^{-\lambda t_d}$$

sedangkan jumlah cacah kejadian peluruhan selama waktu t_c adalah;

$$C = \int_{=0}^{t_c} k A_d e^{-\lambda t} dt = \frac{k \Phi \sigma N_T}{\lambda} \left(- e^{-\lambda t_{ir}} \right) \left(e^{-\lambda t_d} \right) \left(- e^{-\lambda t_c} \right)$$

dengan,

$k = Y\varepsilon$, adalah suatu tetapan yang mengandung efisiensi detektor (ε) dan prosentase peluruhan gamma, yang disebut gamma yield (Y)

Sedang jumlah nuklida sasaran bisa dihitung dengan kesetaraan mol;

$$N_T = \frac{m N_A}{B_A} a$$

dengan,

m = massa cuplikan (gr)

N_A = bilangan Avogadro

B_A = berat atom unsur cuplikan

a = kelimpahan isotop cuplikan

dengan memasukkan harga-harga tersebut diatas maka cacah kejadian peluruhan selama waktu t_c adalah;

$$C = \frac{m N_A a \sigma \Phi Y \varepsilon}{B_A \lambda} \left(- e^{-\lambda t_{ir}} \right) \left(e^{-\lambda t_d} \right) \left(- e^{-\lambda t_c} \right)$$

persamaan ini merupakan dasar dari aktivasi neutron

VI.7. ANALISA KUANTITATIF

- Pada analisa kuantitatif dengan metode APNC banyak digunakan metode komparasi. Pada metode ini diperlukan cuplikan standard yang mengandung unsur yang akan ditentukan dengan kadar yang telah diketahui secara pasti.
- Cuplikan standard disisipkan persis sama seperti cuplikan yang diselidiki dan diiradiasi bersama-sama sehingga mengalami paparan medan neutron yang sama pula.
- Kadar unsur dalam cuplikan dapat dihitung dengan membandingkan laju cacah cuplikan yang diselidiki dengan laju cacah cuplikan standard menggunakan persamaan

$$W = \frac{\overline{cps}_{cpl.}}{\overline{cps}_{std.}} W_{std.}$$

dengan,

W = kadar unsur yang diselidiki

cpl = cuplikan

std = standard

Note :

Unsur standard biasanya harganya mahal maka untuk menghemat pemakaian unsur standard digunakan cara aditif, yaitu penambahan sedikit unsur standard kedalam cuplikan yang diselidiki.

Dengan membandingkan laju cacah cuplikan yang diselidiki sebelum dan sesudah ditambahkan unsur standard maka kadar unsur didalam cuplikan yang diselidiki dapat dihitung dengan persamaan

$$\frac{W_{cpl}}{W_{cpl} + W_{std}} = \frac{\overline{cps}_{cpl.}}{\overline{cps}_{cpl+std.}}$$

ACUAN

1. DJALOEIS, Prof. Dr., *Pengembangan Teknologi Akselerator dan Pemanfaatannya di Indonesia*, Prosiding Seminar Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, PPNY – BATAN, 23 – 25 April 1998.
2. HERMAN, H, *Modification of The Surface Mechanical Properties of Ferrous by Nitrogen Ion Implantation*, Proceeding of 3rd International Conference on Modification of Surface Properties of Metals by Ion Implantation, Pergamon Press, Oxford, 1981.
3. SIOSHANSI, P., *Surface Modification of Industrial Components by Ion Implantation*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 24/25 (506 – 511), North Holland, Amsterdam, 1987.
4. MUNN, P., WOLF, G.K., *Corrosion Behaviour of Ti Surface Ion Beam Alloy with Pd*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 7/8 (2515 – 517), North Holland, Amsterdam, 1985.
5. HUBBLER, G.K., SMITH, F.A., *Application of Ion Implantation to Wear Protection of Materials*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 7/8 (205 – 211), North Holland, Amsterdam, 1985.
6. PEIDE, Z., et. al., *The Effect on N⁺ Ion Beam Bombardment on Aqueous Corrosion of Iron*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 7/8 (195 – 199), North Holland, Amsterdam, 1985.
7. DRESSELHAUS, M.S., KALISH, R., *Ion Implantation in Diamond, Graphite and Related Materials*, Springer Series in Materials Science 22, Springer-Verlag, New York, 1982.
8. WHITE, C.W., et. al., *Materials Science Reports*, a Review Journal, North Holland, Amsterdam, 1989.
9. RYSSEL, H.I, *Ion Implantation*, John Willey & Sons, New York, 1989.
10. TJIPTO SUJITNO, dkk, *.Aplikasi Akselerator Ion Untuk Bahan Maju*, Rapat Koordinasi Tim Akselerator, P3TM-BATAN, Yogyakarta, 22 Juni 1999.
11. SUGITANI, M., *Accelerator Application for Microelectronics*, Batan Accelerator School (BAS), 2002, January 2003.
12. DARSONO, *Applikasi Akselerator Ion Untuk Fabrikasi Mikroelektronik*, Rapat Koordinasi Tim Akselerator, P3TM-BATAN, Yogyakarta, 22 Juni 1999.
13. KUROI, T, et.al., *MeV Ion Implantation in ULSI Technology*, in Proceedings of Fourteenth Symposium on Ion Source and Ion Assisted Technology, The Ion Engineering Society, Japan 1991.
14. CURRENT, M.I., *Ion Implantation for ULSI: Challenge and New Direction*, in Proceedings of Fourteenth Symposium on Ion Source and Ion Assisted Technology, The Ion Engineering Society, Japan 1991.
15. MATSUMARU, M., *Ion Implantation Technology in Giant Microelectronics*, in Proceedings of Fourteenth Symposium on Ion Source and Ion Assisted Technology, The Ion Engineering Society, Japan 1991.
16. DEARMALEY, G., et al., *Ion Implantation*, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1973.
17. NARGOWALLA, S.S., *Activation Analysis with Neutron Generator*, John Willey & Sons, New York, 1973.

18. SUSETYO, W., *Spektrometri Gamma*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta, 1988.
19. ERDMANT, G., *Neutron Activation Tables*, Weinheim Verlag Chemie, New York, 1976.
20. CSIKAI. J., *CRC Handbook of Fast Neutron Generator*, Vol.1, CRC Press Inc, Florida, 1987.