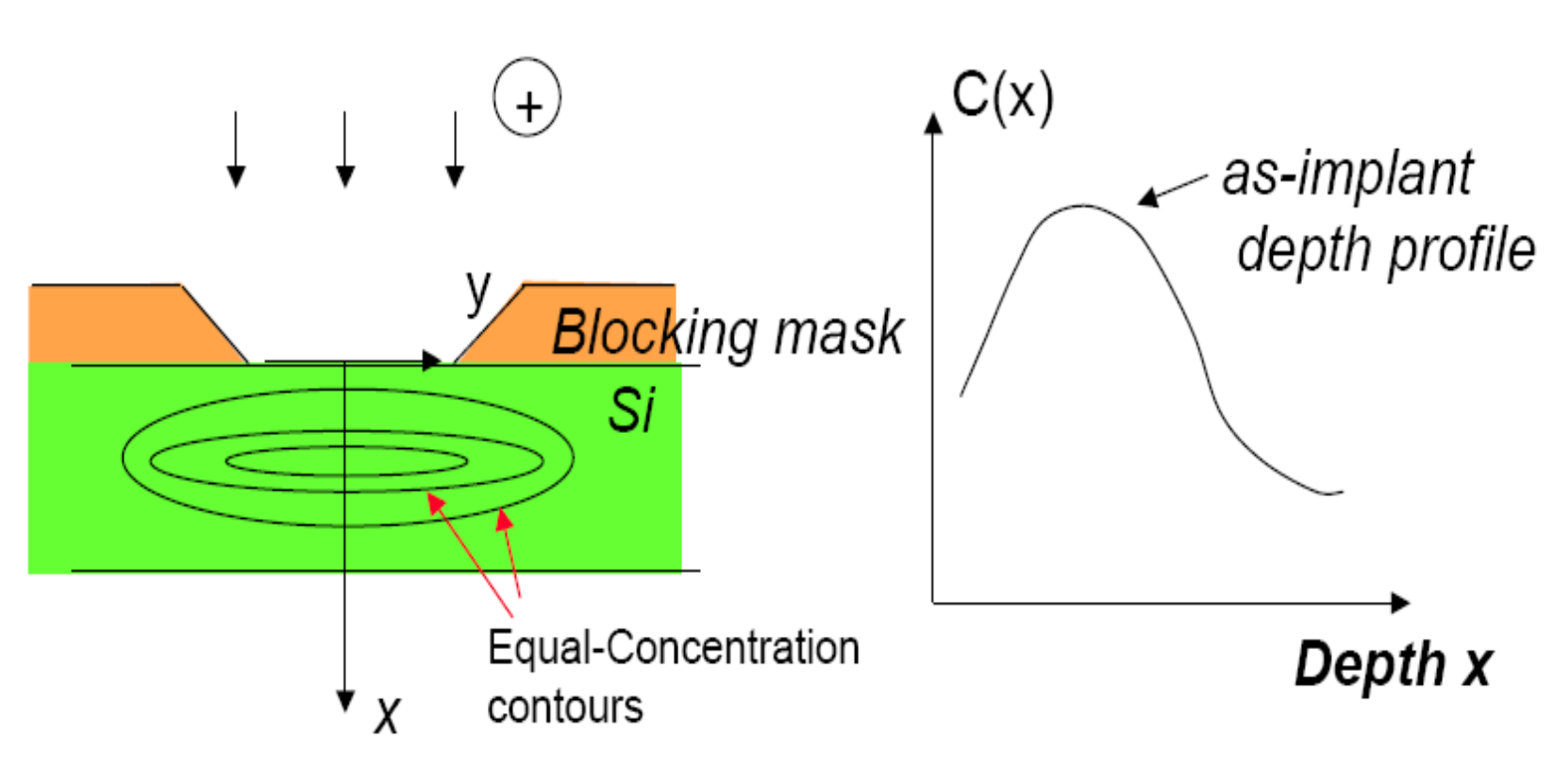
Tehnologije mikrosistema

Prof. dr Vesna Paunović

Proces jonske implantacije

Jonska implantacija je tehnološki proces koji se primenjuje više od 50 godina, kojim se naelektrisani i ubrzani atomi ili molekuli direktno ubacuju u poluprovodnički supstrat, pri čemu se energije implantiranih jona kreću u intervalu od nekoliko keV, pa sve do nekoliko MeV.

U tehnologijama za proizvodnju mikroelektronskih komponenata i integrisanih kola, proces jonske implantacije se koristi za selektivno dopiranje supstrata. Ovaj proces je patentirao Shockley 1957 godine, ukazujući i na činjenicu da je posle procesa jonske implantacije neophodno izvršiti dodatno odžarivanje poluprovodnika kako bi se redukovala koncentracija defekata i električno aktivirali implantirani primesni joni.



Karakteristike procesa

- Zbog mnogobrojnih prednosti koje proces jonske implantacije ima u odnosu na druge procese dopiranja, kao što su predepozicija, difuzija, itd., u tehnološkim nizovima za proizvodnju savremenih integrisanih kola jonska implantacija je gotovo potisnula klasične metode dopiranja.

- Osnovne prednosti procesa jonske implantacije su:

  - precizna kontrola količine primesa (doze) koja se implantira u poluprovodnički supstrat;
  - Širok opseg doza 10^{11} do $10^{16}/cm^2$
  - smanjuje se lateralno prostiranje primesnih atoma, tako da postoji mogućnost za proizvodnju komponenata manjih lateralnih dimenzija;
  - primesni atomi se mogu implantirati u poluprovodnik i kroz slojeve koji se nalaze na površini supstrata (veliki broj materijala koji se koriste kao maska);
  - mogu se formirati veoma strmi p-n spojevi;
  - proces jonske implantacije je niskotemperaturni proces;
  - Mogućnost formiranja ukopanih spojeva
  - profili implantiranih primesa su uniformni;

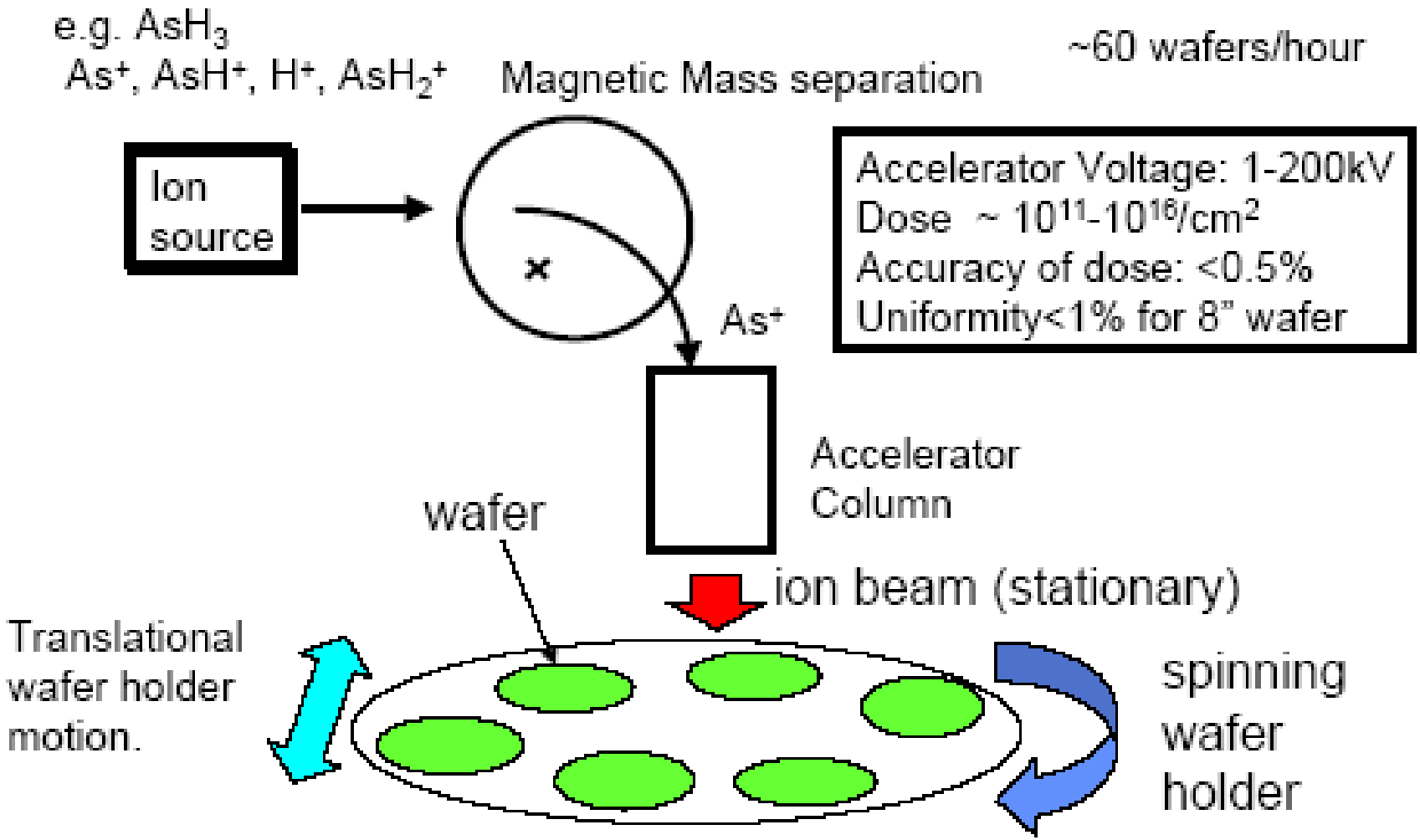
- postoji mogućnost da se u supstrat korišćenjem jednog implantera implantira više različitih vrsta primesnih atoma;
- Pogodan za podešavanje V_T MOS tranzistora
- proces jonske implantacije se veoma uspešno modelira, pri čemu se dobija veoma dobro slaganje sa eksperimentalno određenim profilima primesa.

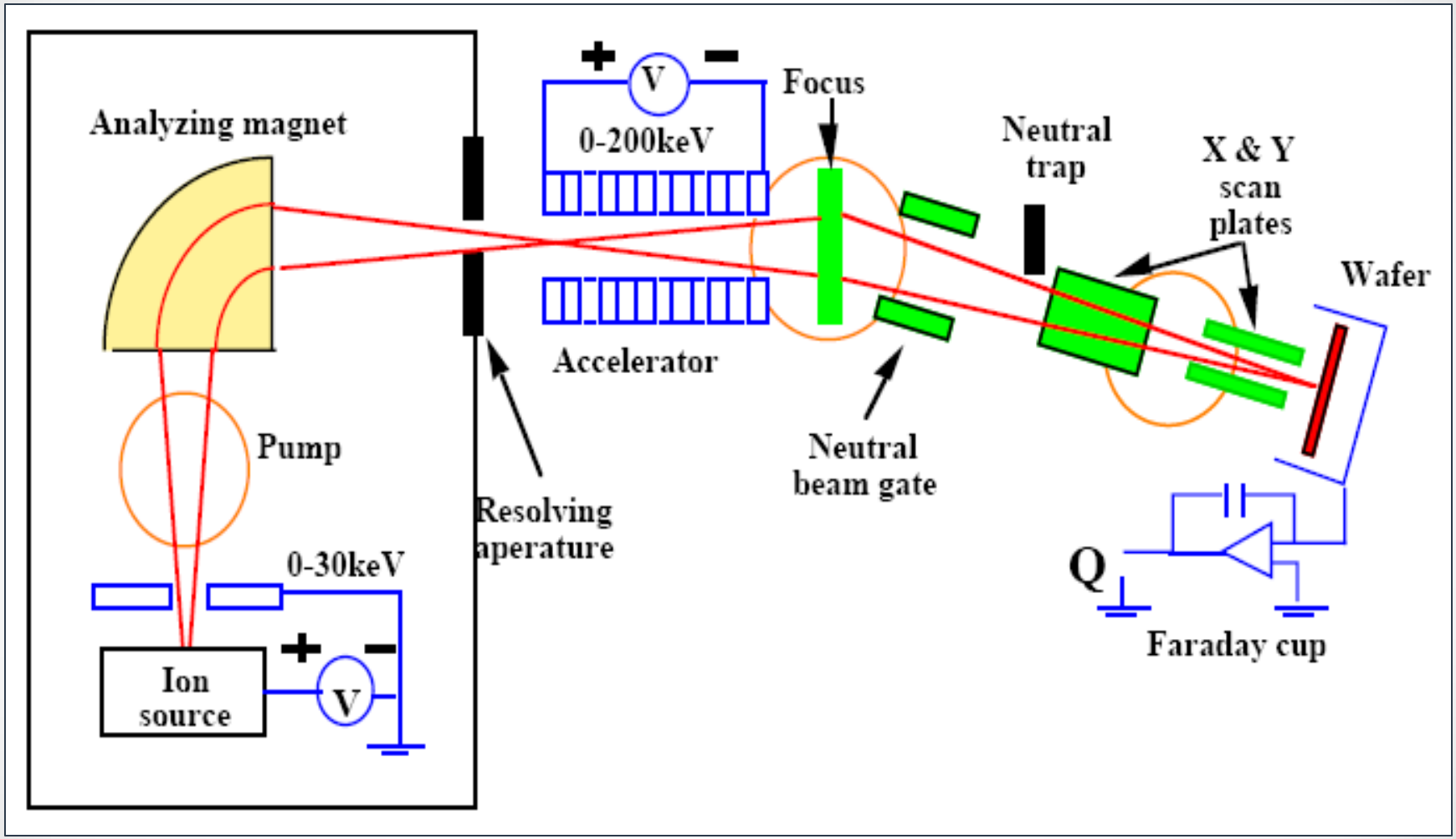
- Postoje i određeni problemi i ograničenja koja prate proces jonske implantacije, i to:
  - proces jonske implantacije prouzrokuje oštećenja kristalne poluprovodničke strukture, pa je zbog toga potrebno kratkotrajno termičko odžarivanje kako bi se defekti eliminisali;
  - maksimalna dubina implantiranih jona je relativno mala, naročito kod implantacije "teških" jona, za energije manje od 300 keV. Primenom većih energija, reda nekoliko MeV, mogu se dobiti i veće dubine;
  - lateralno rasejavanje primesnih jona, iako mnogo manje, nije zanemarljivo;
  - pri implantaciji većih doza proces jonske implantacije je dugotrajan;
  - oprema potrebna za realizaciju procesa jonske implantacije je veoma složena i skupa.

Ion Implanter

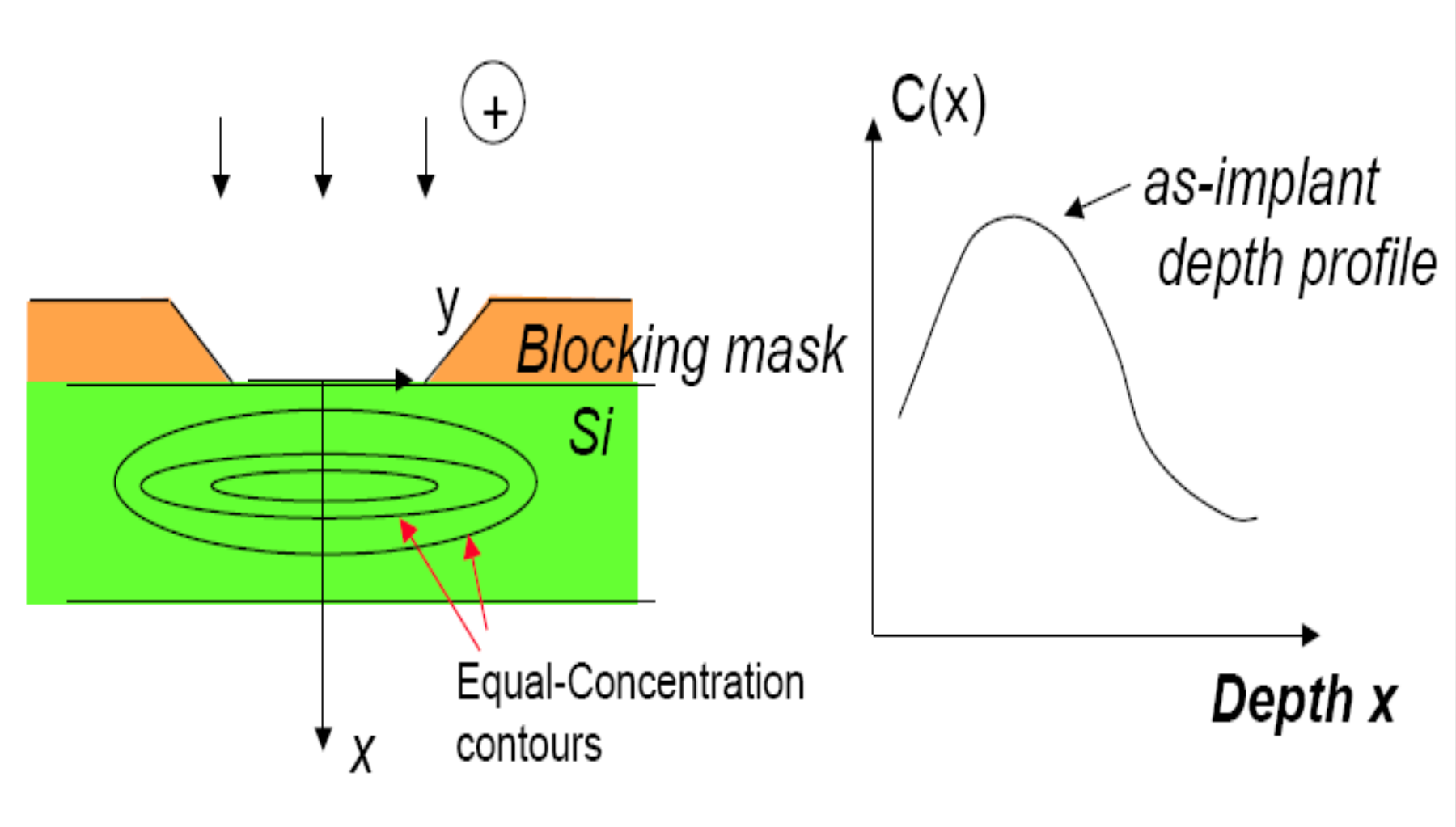
$3-4M/implanter

~60 wafers/hour



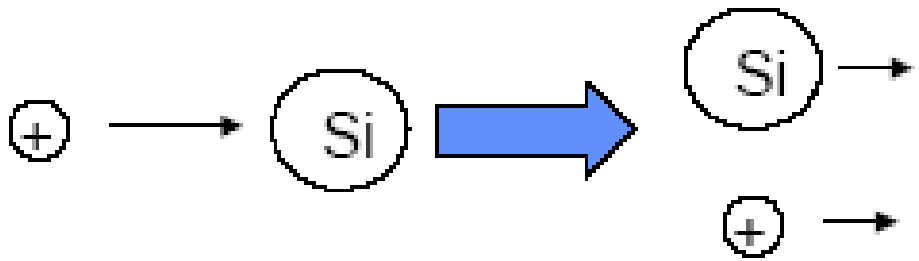

Analyzing magnet
Pump
0-30keV
Ion source
V
Resolving aperature
V
0-200keV
Accelerator
Focus
Neutral beam gate
Neutral trap
X & Y scan plates
Wafer
Q
Faraday cup

Eaton HE3 High Energy Implanter, showing the ion beam hitting the 300mm wafer end-station.


+
y
Blocking mask
Si
Equal-Concentration
contours
x
C(x)
as-implant
depth profile
Depth x

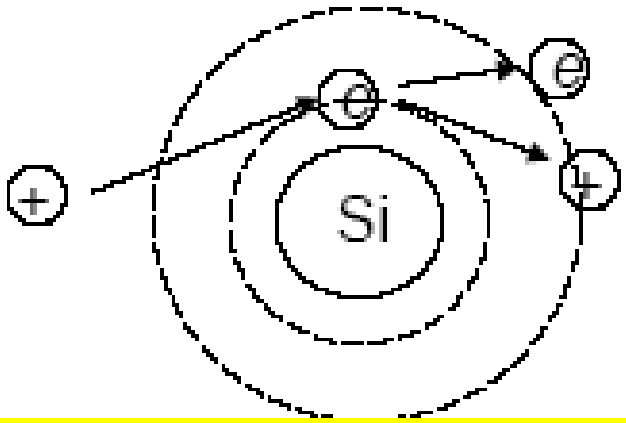
Ion Implantation Energy Loss Mechanisms

Nuclear stopping



Crystalline Si substrate damaged by collision

Electronic stopping



Electronic excitation creates heat

Energy Loss and Ion Properties

Light ions/at higher energy ⟶ more electronic stopping

Heavier ions/at lower energy ⟶ more nuclear stopping

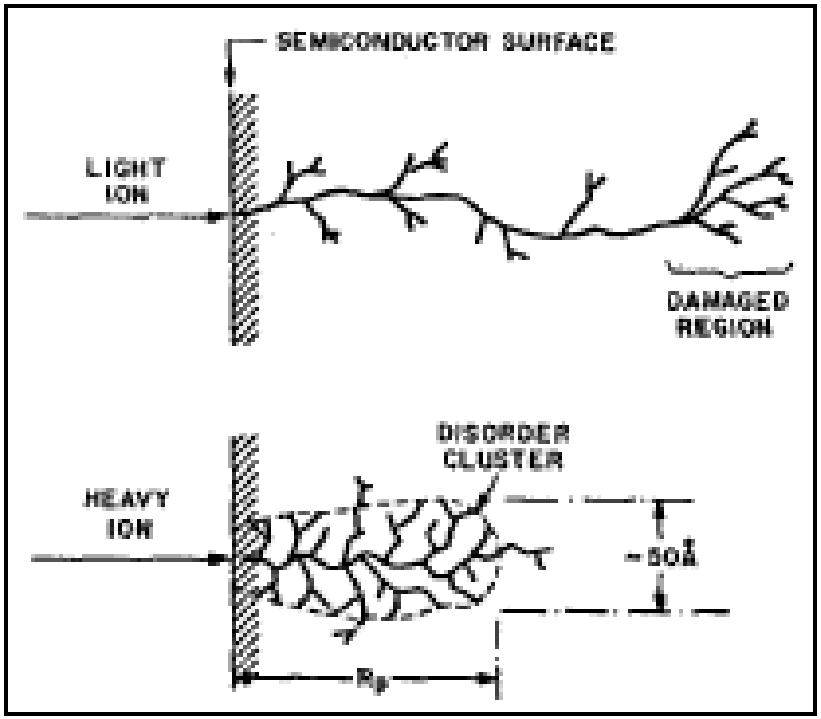
EXAMPLES

Implanting into Si:

H^+ ⇨ Electronic stopping dominates

B^+ ⇨ Electronic stopping dominates

As^+ ⇨ Nuclear stopping dominates



Stopping Mechanisms

- Electronic collisions dominate at high energies.
- Nuclear collisions dominate at low energies.

	E1(keV)	E2(keV)
B into Si	3	17
P into Si	17	140
As into Si	73	800

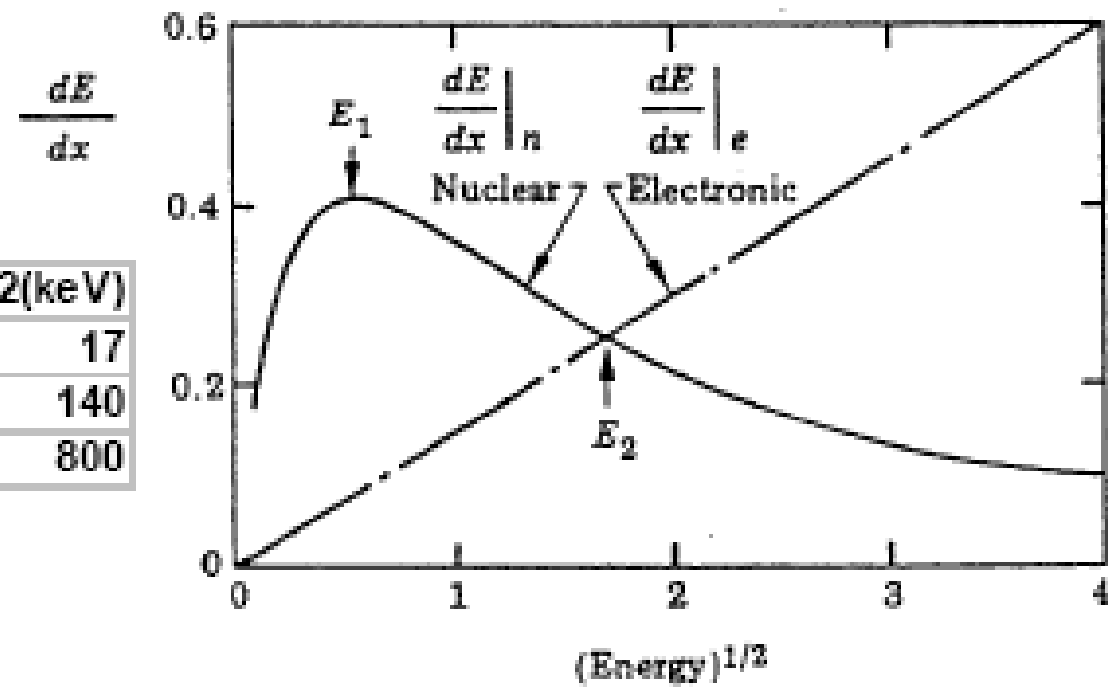
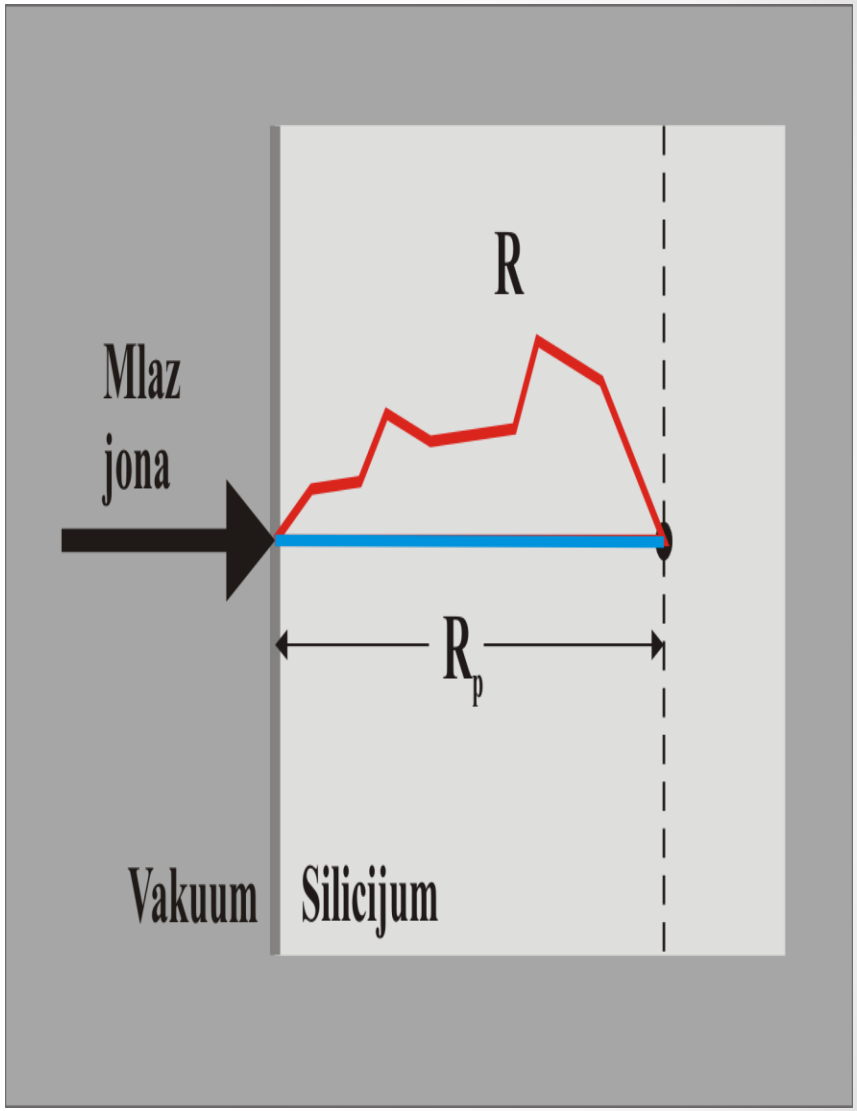
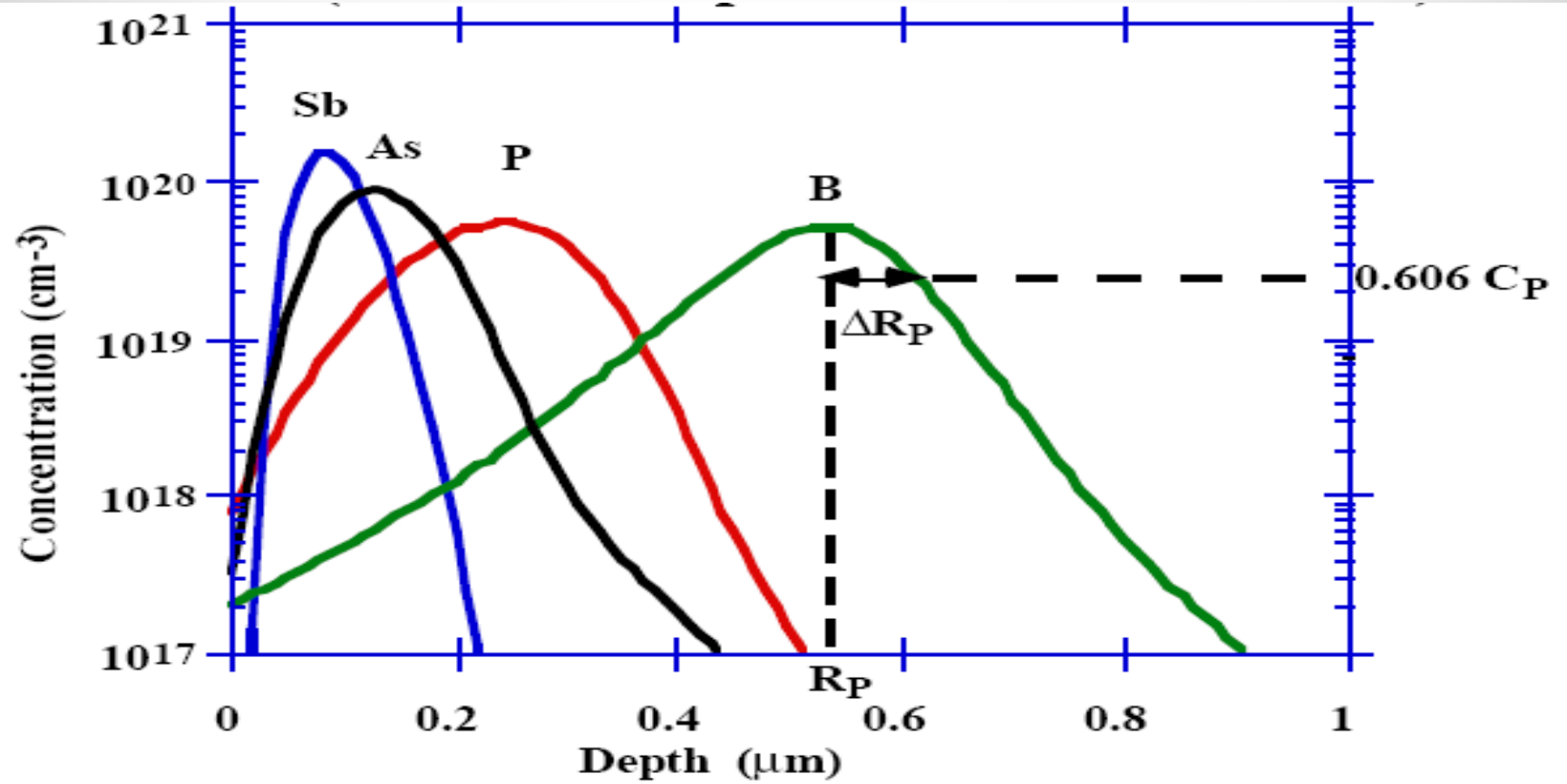


FIGURE 8.12 Rate of energy loss dE/dx versus $(\text{energy})^{1/2}$, showing nuclear and electronic loss contributions.

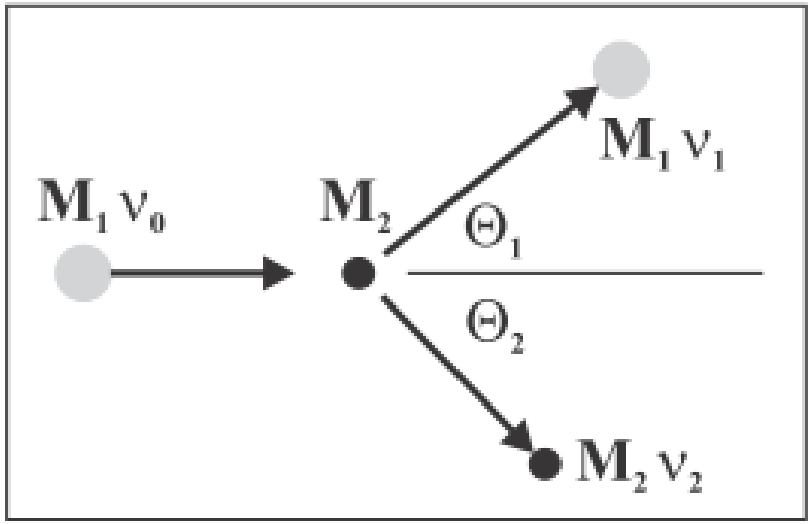
- U osnovi procesa jonske implantacije je random proces.
- Visokoenergetski joni (1-1000keV) bombarduju supstrat i gube svoju energiju usled sudara sa jezgrima atoma Si (nuclear stopping) i interakcije sa elektronima (electronic stopping).





- Dobijeni profili primesa se veoma često opisuju Gaussian raspodelom koja ima dva parametra: projektovani domet Rp i standardnu devijaciju ΔRp (200keV implantirani profili B, P, As i Sb su prikazani na slici gore).

Zaustavljanje implantiranih jona usled sudara sa jezgrima atoma i usled interakcije sa elektronima



ukupna izgubljena energija implantiranog jona po jedinici predjenog puta može se odrediti kao:

$$\frac{dE}{dx} = S_n(E) + S_e(E),$$

Ukupni predjeni put implantiranog jona, tj. domet R, se može odrediti kao:

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{-dE/dx},$$

Efektivni presek zaustavljanja usled interakcije sa elektronima Se (E) je proporcionalan brzini jona, tj. kvadratnom korenu energije:

$$S_e(E) = k_e \cdot E^{0.5}.$$

$$C(x) = C_P \exp\left(-\frac{(x - R_P)^2}{2\Delta R_P^2}\right)$$

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} C(x)dx \quad \text{or} \quad Q = \sqrt{2\pi}\,\Delta R_P\, C_P$$

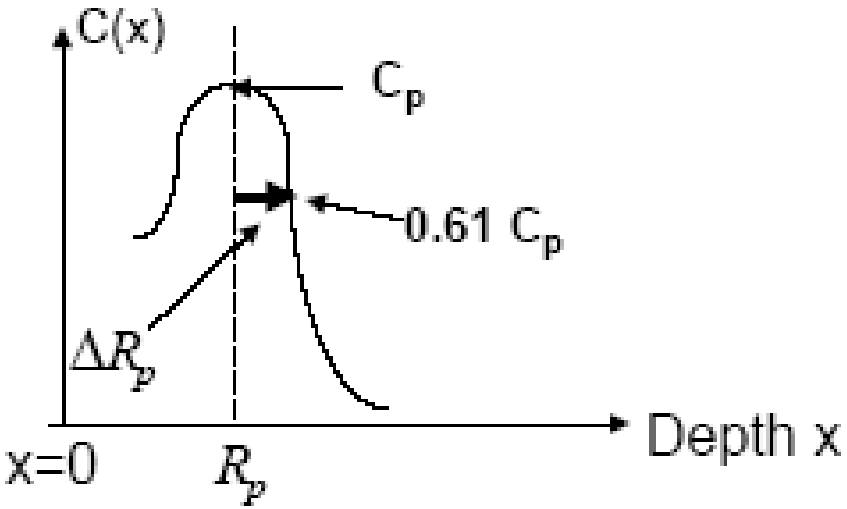
gde je C(x) – vršna vrednost koncentracije (=0.4N/ΔRp) i određena je za srednju dubinu prodiranja (x=Rp), a ne na površini Si supstrata.

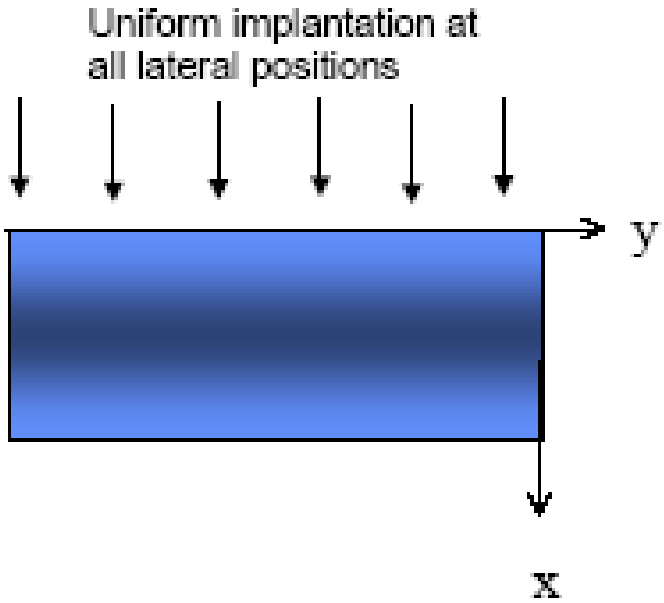
- Q-Doza: ukupni broj implantiranih jona*

*Jednačina je korisna veza između doze i vršne vrednosti koncentracije za energije u opsegu (100-200) keV.

* Za veće energije koristi se Dual Pearson model.

Gaussian Approximation of One-Dimensional Implant Depth Profile





$$C(x) = C_p \cdot e^{\frac{-(x-R_p)^2}{2(\Delta R_p)^2}}$$

R_p = projected range

ΔR_p = longitudinal straggle

Note: For lateral positions far from masking boundaries, C(x) is independent of lateral position y

Dose-Concentration Relationship

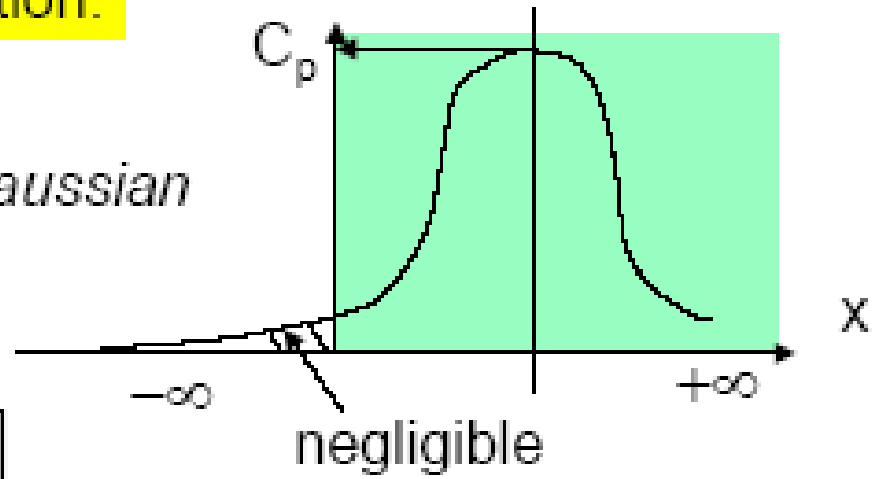
Using Gaussian Approximation:

$$\text{Dose} = \phi = \int_0^{\infty} C(x)dx$$

Gaussian

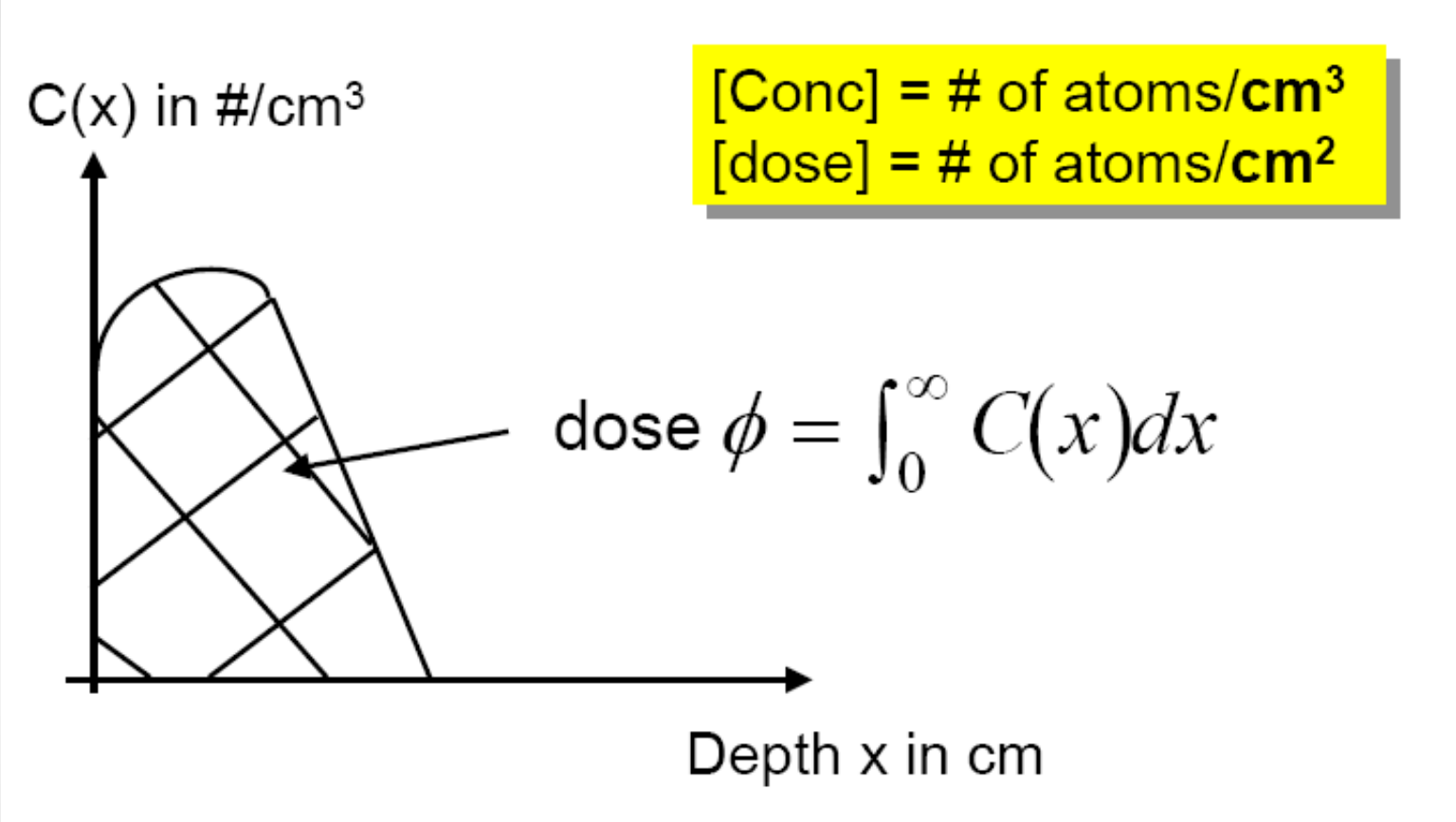
$$\approx \int_{-\infty}^{+\infty} C(x)dx$$

$$= C_p \cdot \left[\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p\right]$$



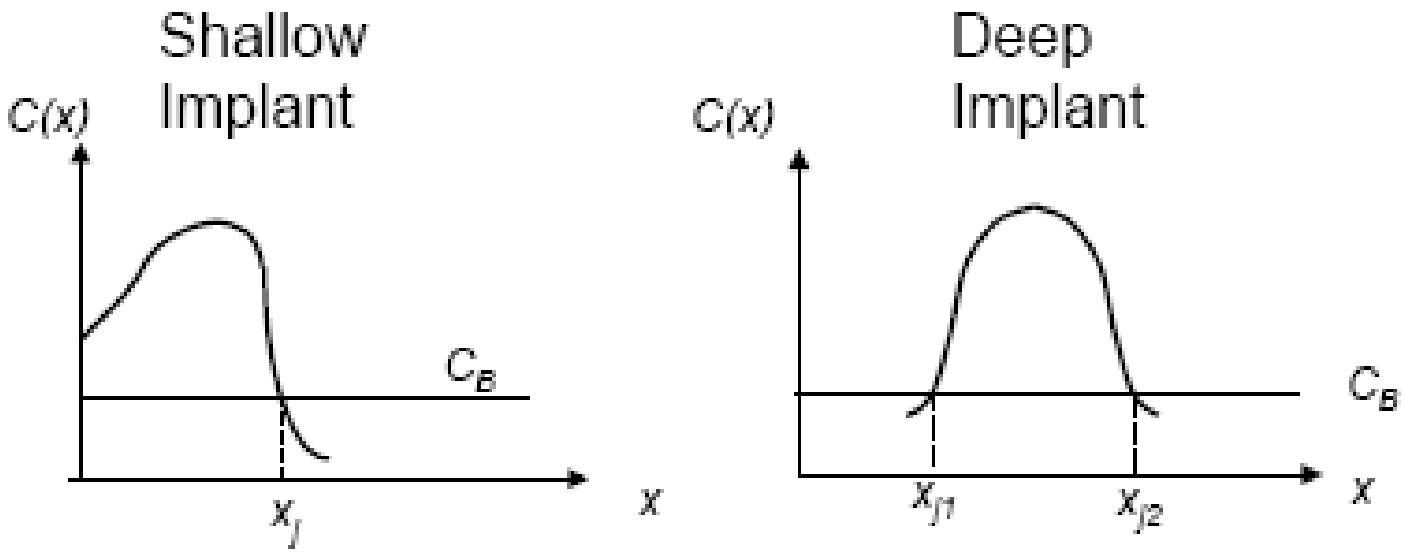
$$\therefore C_p = \frac{\phi}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p} \cong \frac{0.4\phi}{\Delta R_p}$$

Doza implantacije



Doza –broj atoma unet po jedinici površine, u celoj zapremini Koncentracija – broj atoma po jedinici zapremine

Junction Depth, x_j



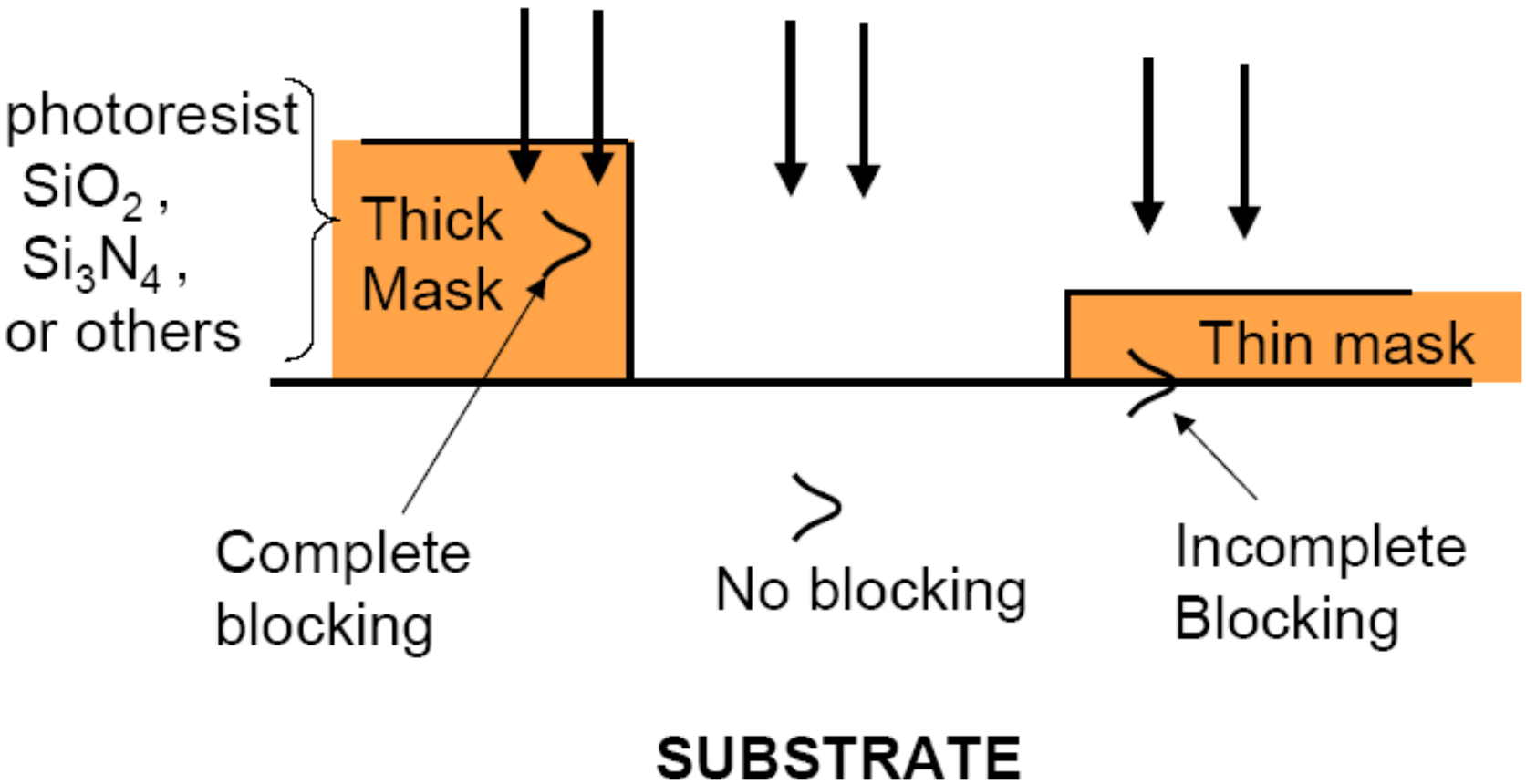
$C(x = x_j) = N_B$ = *Bulk Conc.* $\Rightarrow$ *Solution for* x_j

If Gaussian approx for C(x) is used , from

$$C_p \exp[-(x_j - R_p)^2 / 2(\Delta R_p)^2] = C_B$$

we can solve for x_j .

Mask layer thickness can block ion penetration



Definitions of Profile Parameters

For reference only

(1) **Dose** $\phi = \int_0^\infty C(x)dx$

(2) **Projected Range**: $R_p \equiv \frac{1}{\phi}\int_0^\infty x \cdot C(x)dx$

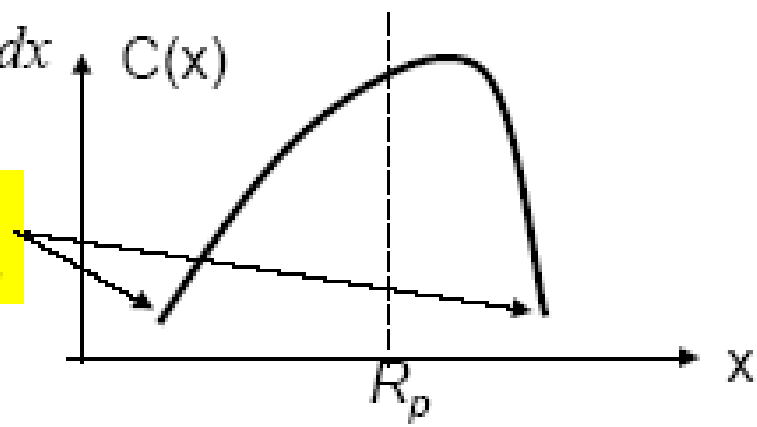
(3) **Longitudinal Straggle**: $(\Delta R_p)^2 \equiv \frac{1}{\phi}\int_0^\infty (x - R_p)^2 \cdot C(x)dx$

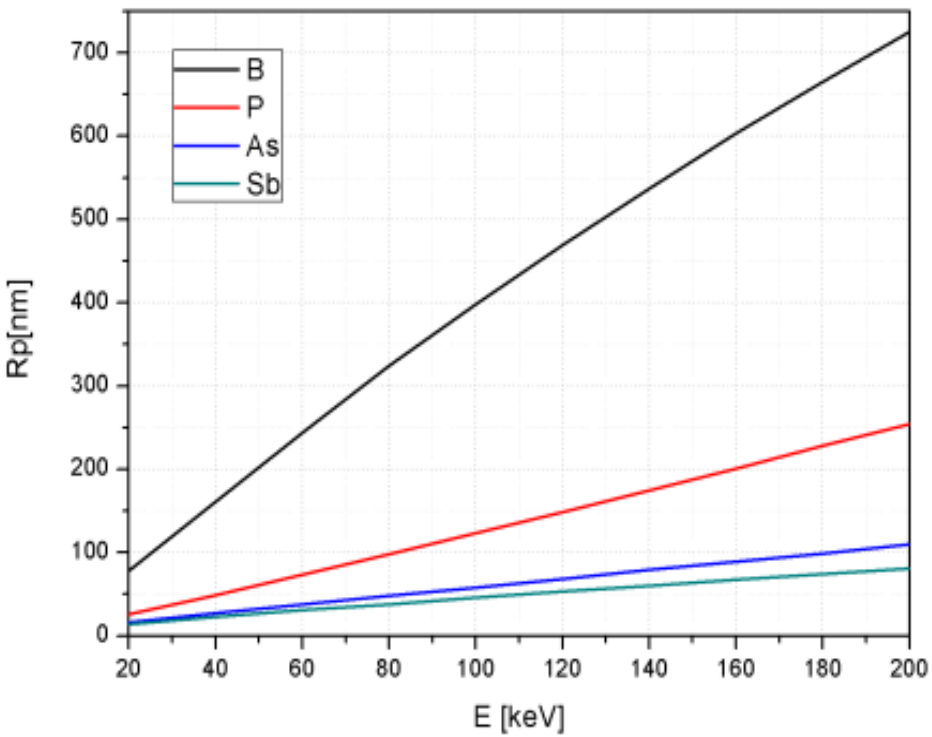
(4) **Skewness**: $M_3 \equiv \frac{1}{\phi}\int_0^\infty (x - R_p)^3 C(x)dx \quad M_3 > 0 \text{ or } < 0$

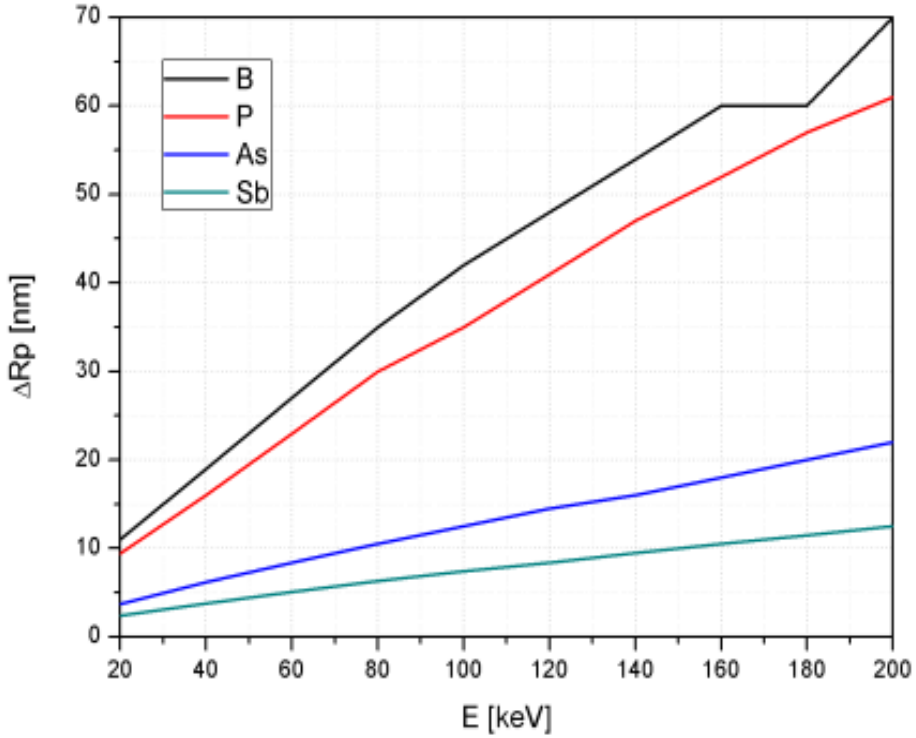
-describes asymmetry between left side and right side

(5) **Kurtosis**: $\propto \int_0^\infty (x - R_p)^4 C(x)dx$

Kurtosis characterizes the contributions of the "tail" regions

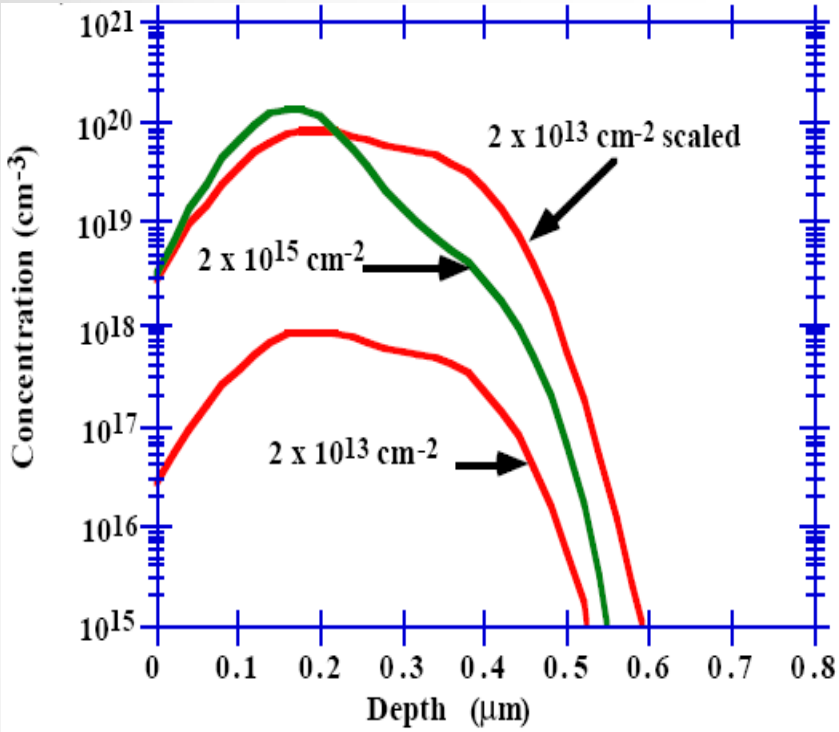


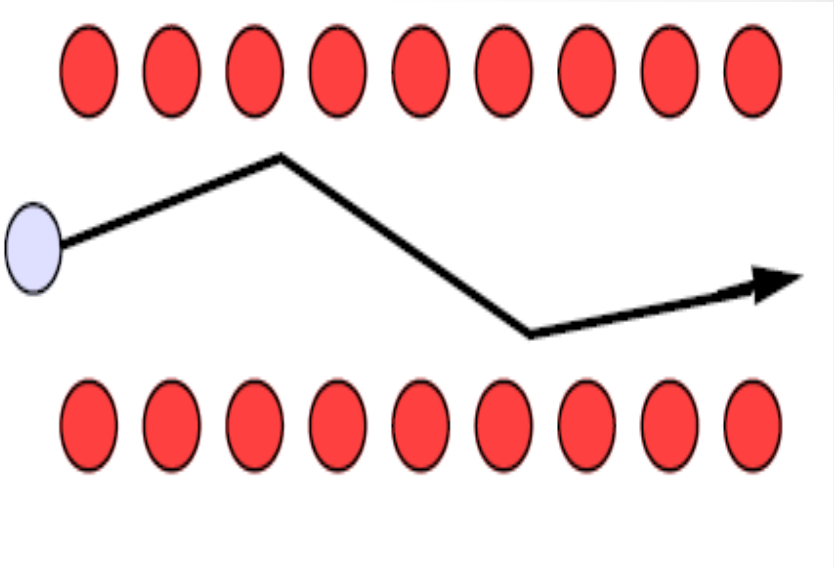




- **Projektovani domet Rp i standardna devijacija ΔRp za najčešće korišćene primese u opsegu od 0 do 200keVsu date na slikama.**

Kanalovanje – implantacija u monokristalnom Si



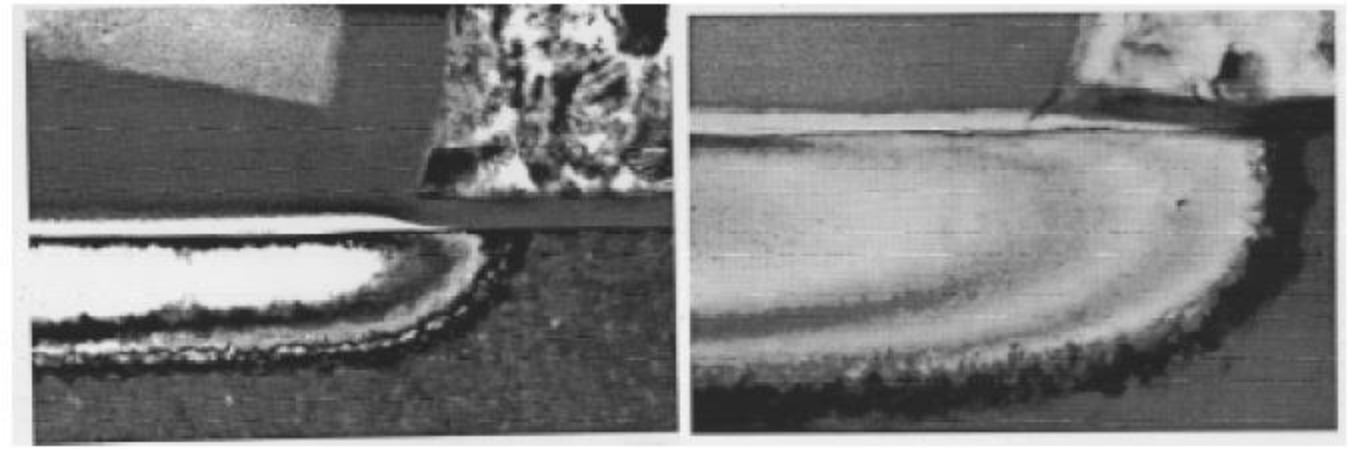


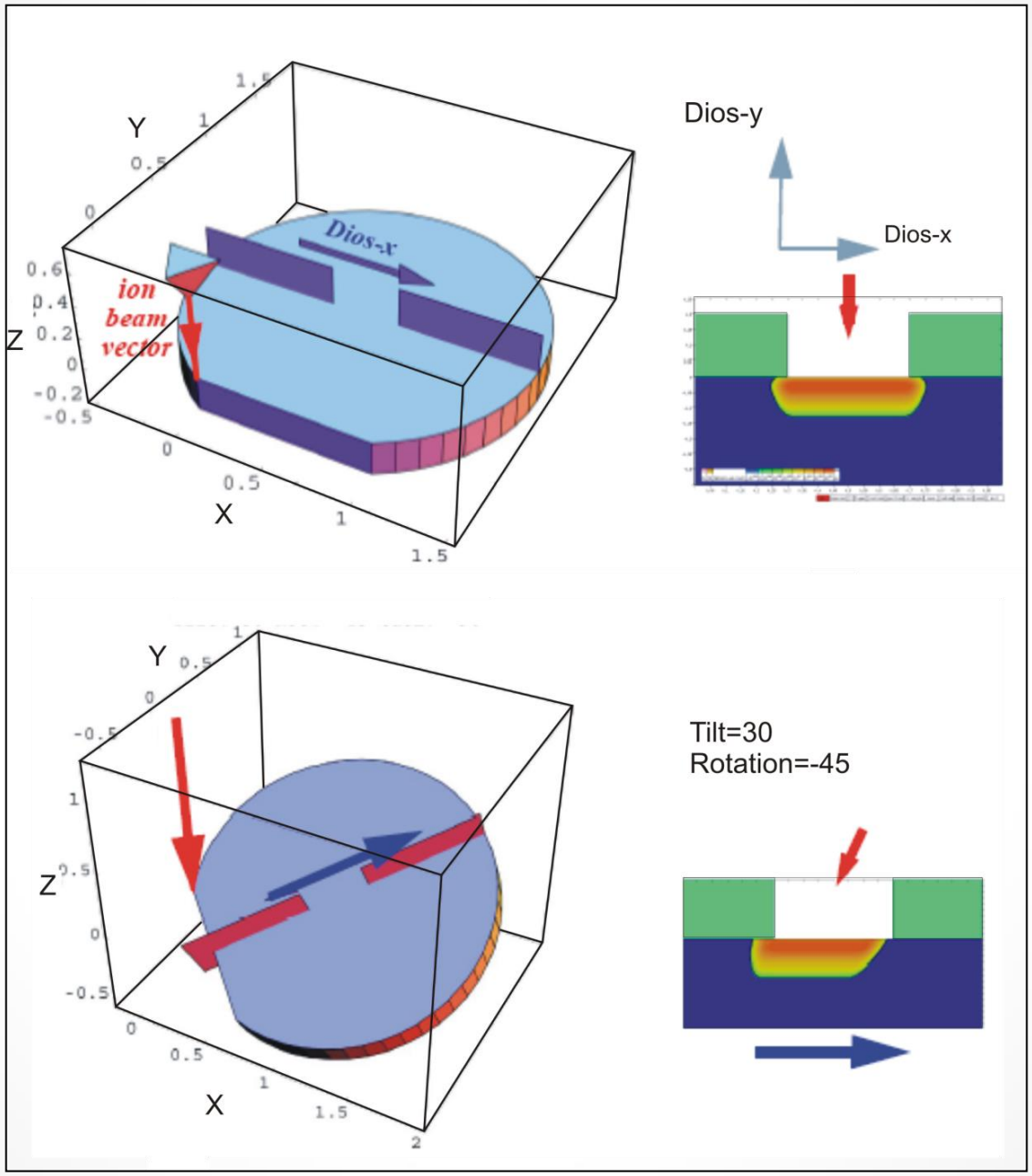
- Silicijum koji se koristi za proizvodnju čipova i IC je kristalni materijal.
- Efekat kanalovnja kao rezultat daje profile čija je dubina veća od očekivane.
- Kada se primese implantiraju u monokristalni Si i pravac prodiranja snopa jona se poklapa sa kristalografskom orijentacijom supstrata, dopanti prodiru dublje od teorijski predvidivih dubina.
- Tunelovanje se sprečava tako što se primese implantiraju pod određenim uglom u odnosu na normalu supstrata. U praksi je ugao implantacije od 7° do 10° za orijentacije kristala (100) ili (111).

- Često se pretpostavlja da je dvodimenzionalna raspodela sastavljena samo od proizvoda vertikalne i bočne raspodele.

$$C(x,y) = C_{vert}(x)\exp\left(-\frac{y^2}{2\Delta R_{\perp}^2}\right)$$

- Šta se dešava na ivici maske – ako je maska dovoljno debela da blokira implantat, bočni profil ispod maske je određen bočnim pomeranjem. (35keV i 120keV As implantati na ivici poli gejta (Alvisa et al.))




Y
Z
X
Dios-x
ion
beam
vector
Dios-y
Dios-x
Tilt=30
Rotation=-45

- Realni implantirani profili su daleko kompleksniji nego što se to može predstaviti Gaussian distribucijom:
  - Light ions backscatter to skew the profile upwards.
  - Heavy ions scatter deeper.
  - 4 moment descriptions of these profiles are often used (with tabulated values for these moments).

Range:

$$R_P = \frac{1}{Q} \int_{-\infty}^{\infty} x\, C(x)\, dx$$

Std. Dev:

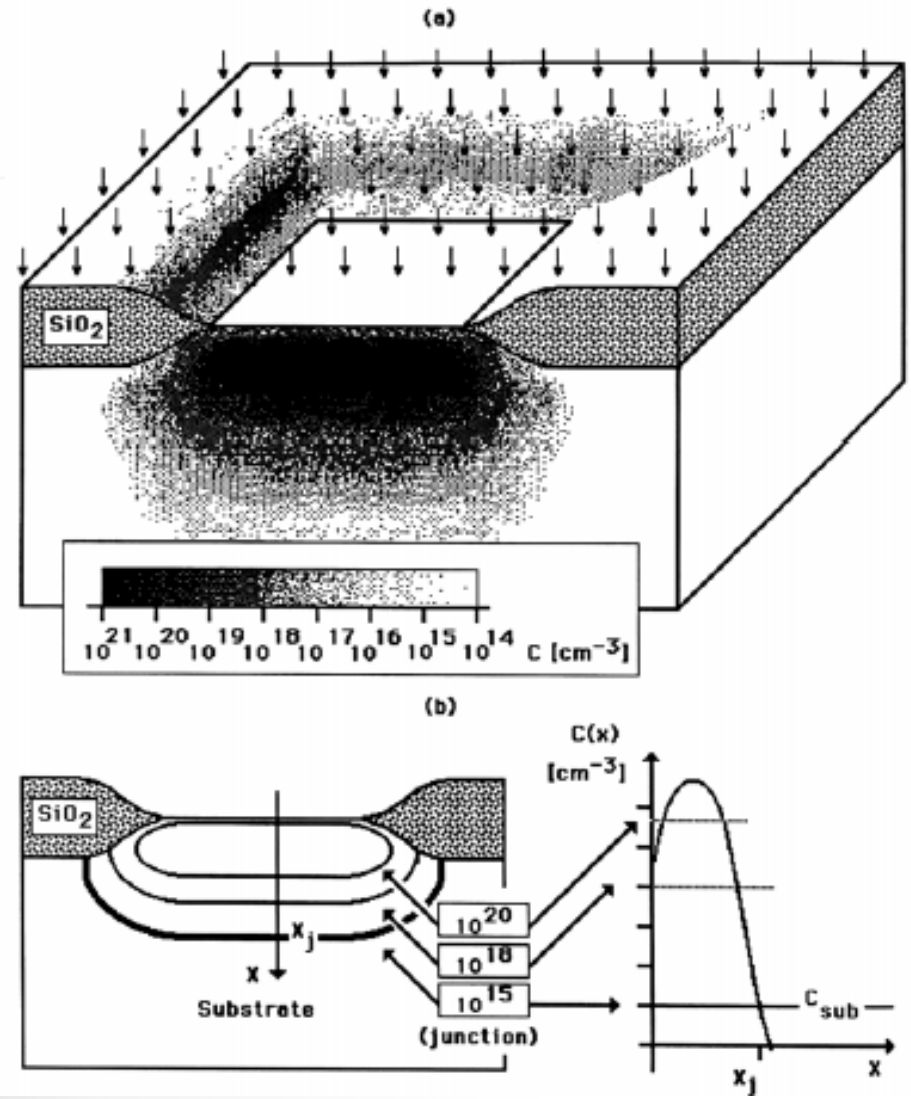
$$\Delta R_P = \sqrt{\frac{1}{Q} \int_{-\infty}^{\infty} (x - R_P)^2\, C(x)\, dx}$$

Skewness:

$$\gamma = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x - R_P)^3\, C(x)\, dx}{Q\, \Delta R_P^3}$$

Kurtosis:

$$\beta = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x - R_P)^4\, C(x)\, dx}{Q\, \Delta R_P^4}$$

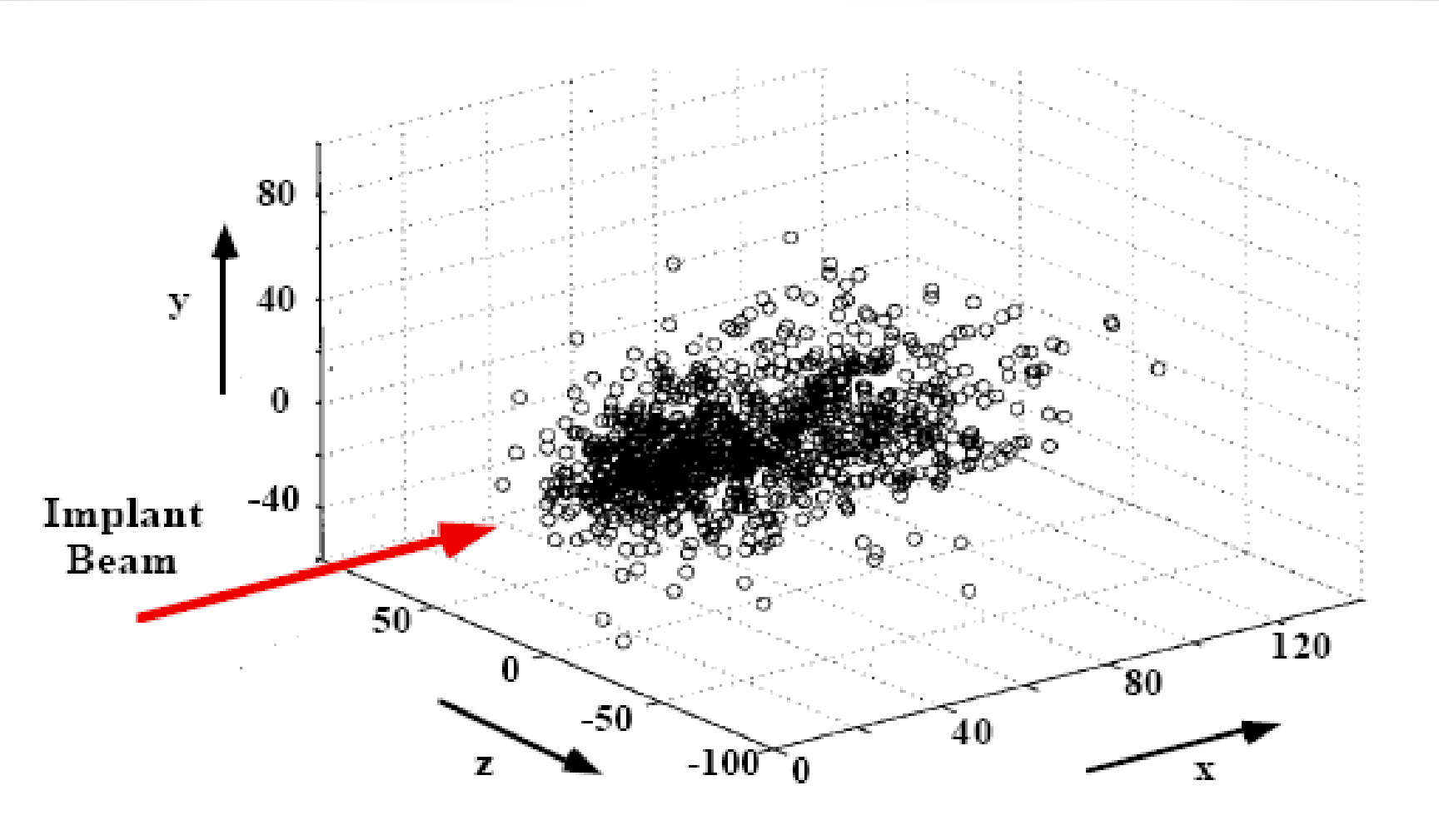


Processing Temperature

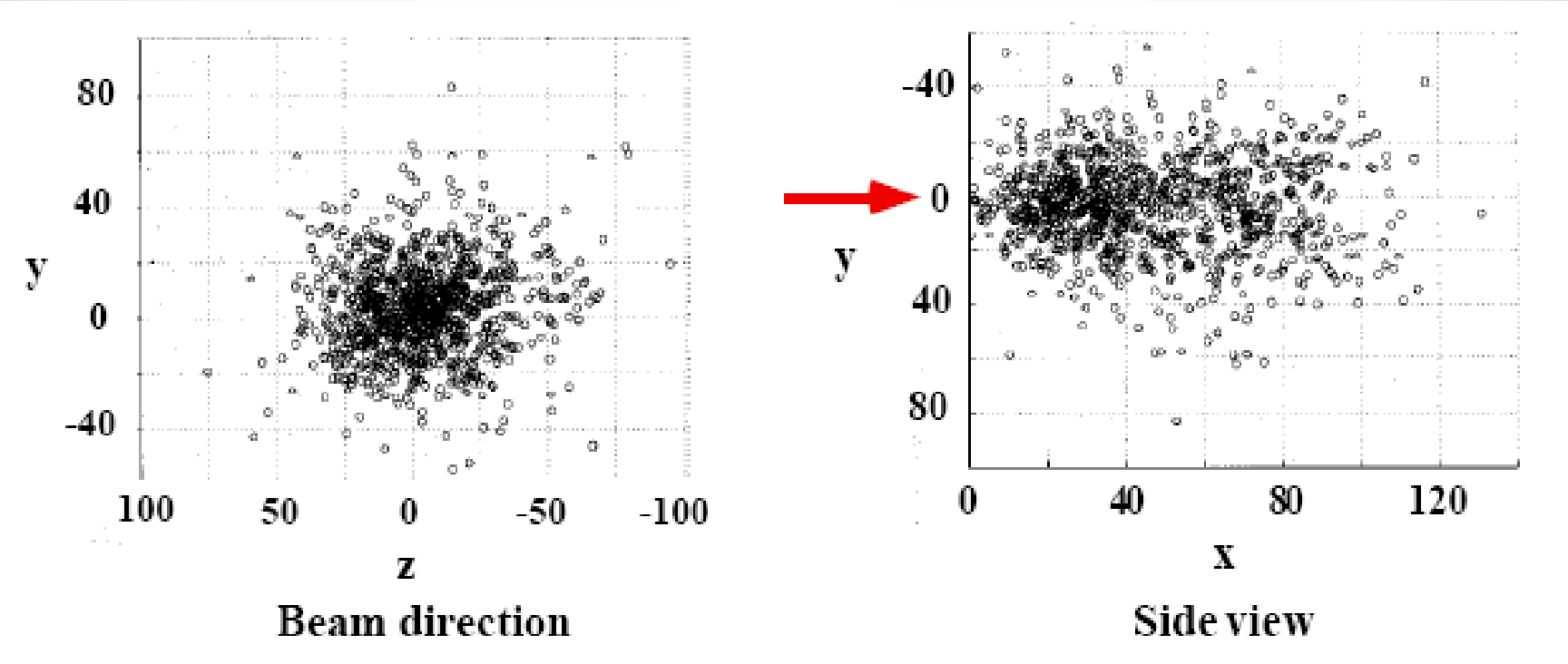
Room temp during implantation.

After implantation, a 900°C-1000°C anneal step is needed to:

1) activate dopants
2) restore Si crystallinity



- 3D Monte Carlo simulacija putanja implantiranih jona (1000 P jona energije 35 keV.)



- Izgleda kao izdužena elipsa jer je većina visokoenergetskih jona podvrgnuta malim uglovima sudara.
- Bočni pogled pokazuje **Rp i ΔRp**, dok direktni pokazuje lateralno rasipanje
- .