

Високотемпературни процеси в технологията на микро- и наносистемите

Доц. д-р Мария Александрова

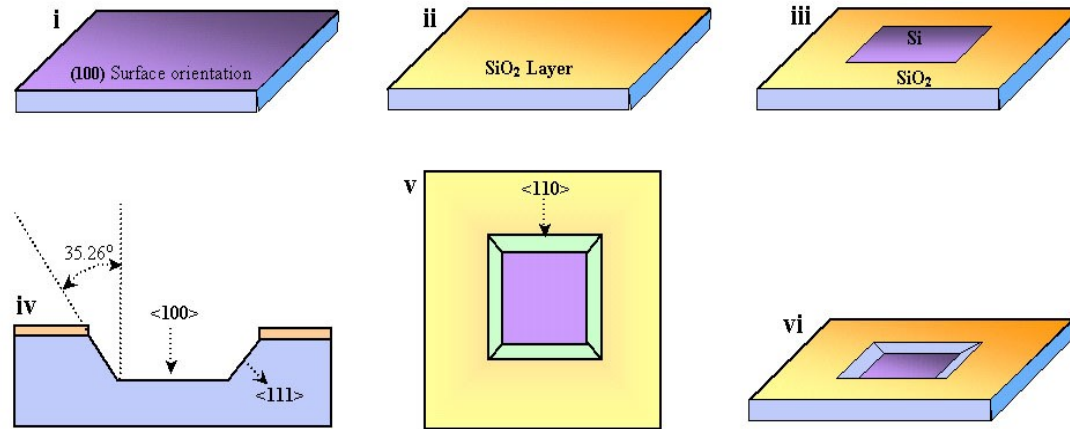
СЪДЪРЖАНИЕ

- Термично окисление на силициева пластина
 - Предназначение на процеса
 - Технология и режими на процеса
 - Механизъм на процеса и фактори, влияещи върху качеството
 - Особености

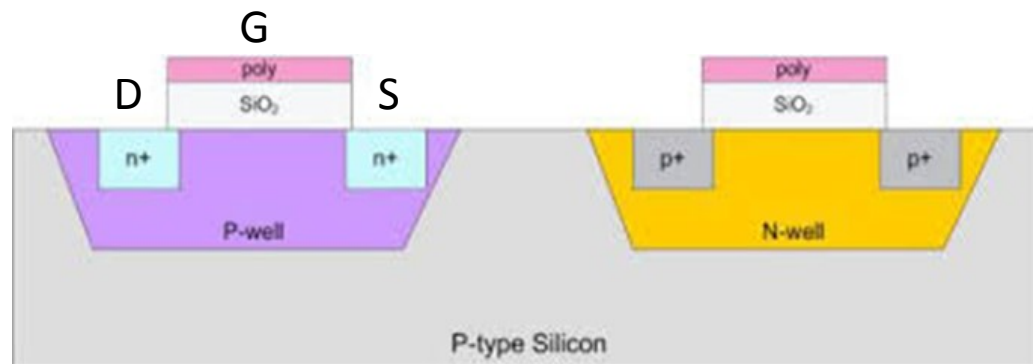
- Дифузия на легиращи примеси в полупроводниковата пластина
 - Предназначение на процеса
 - Механизъм на процеса и фактори, влияещи върху качеството
 - Закони на Фик, технология и режими на процеса

- Йонна имплантация като алтернатива на дифузията
 - Съпоставка с процеса на дифузия
 - Механизъм на процеса и техническа реализация

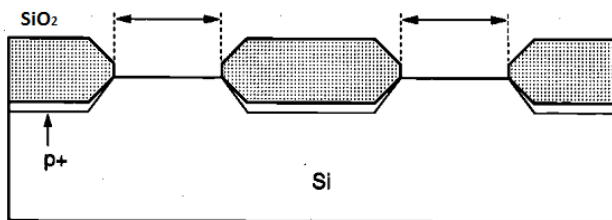
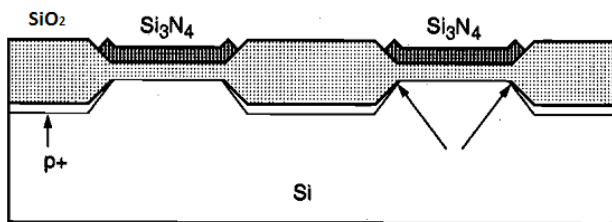
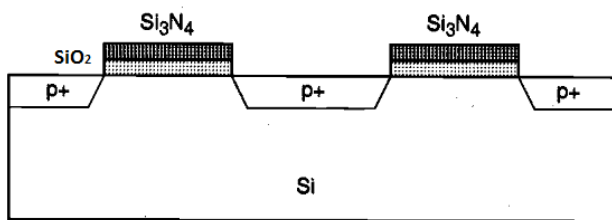
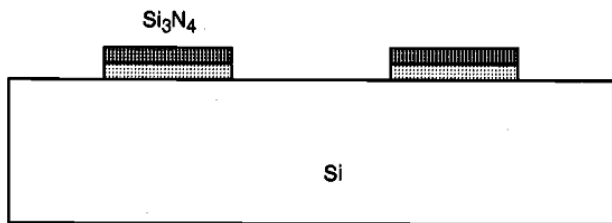
- **Термично окисление на силициева пластина:** Предназначение на процеса - термичното окисление е процес, чрез който върху изходната пластина се създава тънък слой оксид с дебелина от около 30 nm до около 1 μm . Той се използва, като:
 - защитна маска при локална дифузия, йонна имплантация и за дълбоко ецване на силиций;



- подгейтов оксид в MOS транзистори и диелектричен слой в MOS кондензатори



- изолация между елементи в интегрални схеми;



Много добри диелектрични свойства.

$\epsilon_r \sim 3.7 - 3.9$ диелектрична проникваемост, която е достатъчно голяма, за да може структурата да се използва като кондензатор и достатъчно малка, за да не доминира времконстантата $R.C$, която описва времезакъснението на сигнала в микропроводници със съпротивление R , изолирани от SiO_2 .

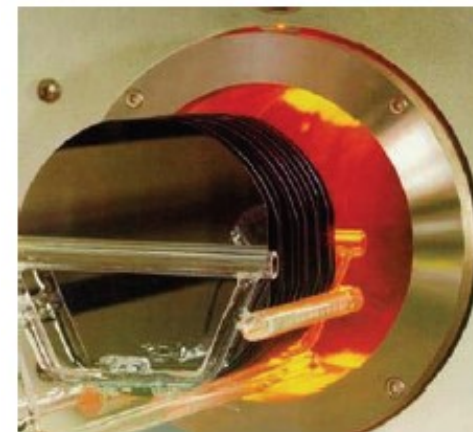
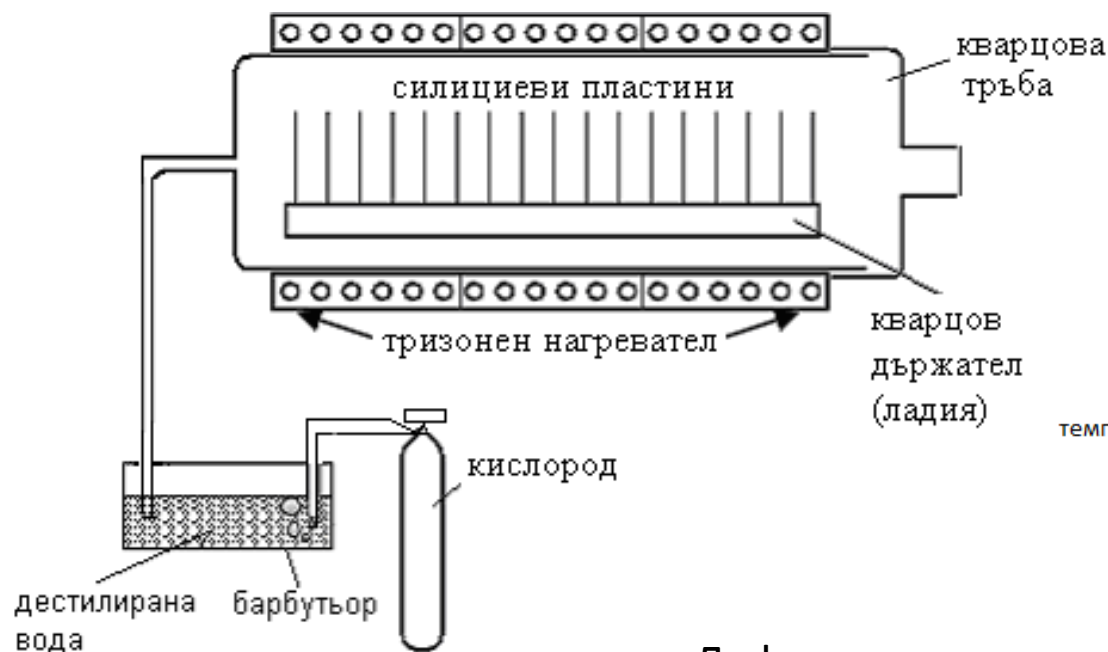
Специфично съпротивление $10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$

Забранена зона 9 eV

Пробивно напрежение 10 MV/cm

Нисък коефициент на дифузия за легиращите примеси използвани в полупроводниковата (ПП) индустрия, което го прави ефективен защитаваш (маскиращ) материал при локални дифузионни процеси.

Технология и режими на израстване:

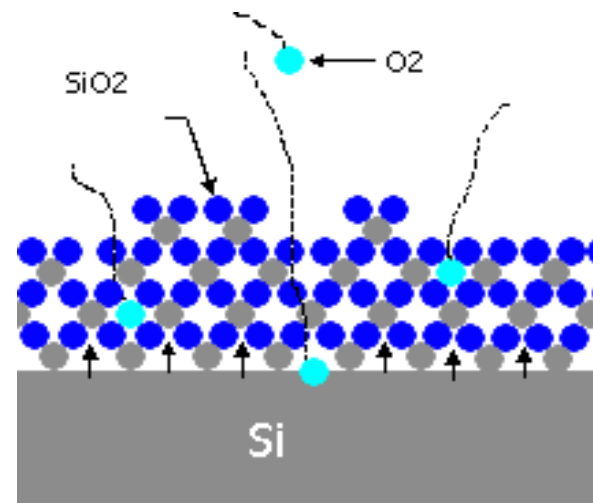


Дифузионна пещ – използва се и за окисление на Si

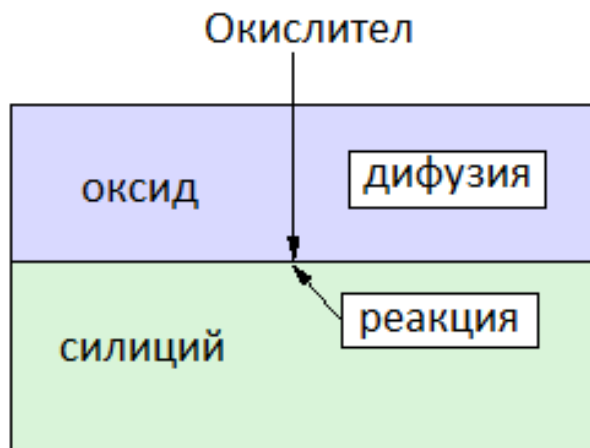
- израстването на SiO_2 става при висока температура (900-1200 °C) в кислородна атмосфера или в кислородна атмосфера + водни пари. Оттук следват разновидностите на процеса:

- Сухо окисление: $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$

- Окисление в среда на влажен кислород (Мокро окисление): $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$



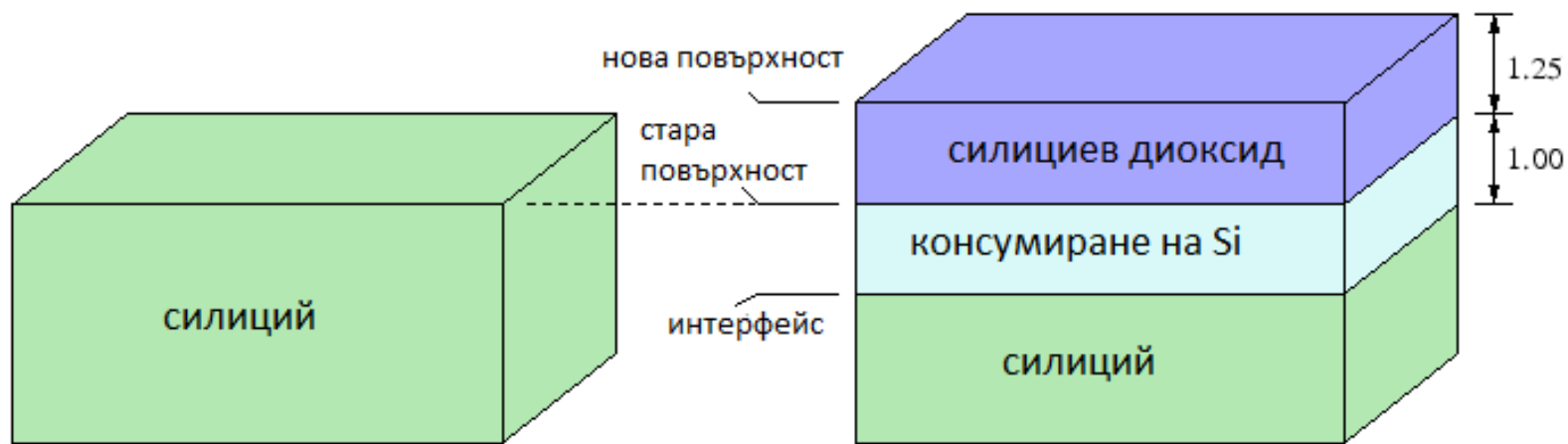
Механизъм и параметри на процеса



- Скорости на процеса при сухо окисление: $< 100 \text{ nm/hr}$; Плътност на оксида – висока; Утечни токове - слаби

- Мокро окисление: ~ 5 пъти по-висока скорост на израстване; Плътност на оксида – ниска; Утечни токове - големи

- Комбиниране на режимите сухо-мокро-сухо окисление.



Интерфейсът се движи в дълбочина на силициевата пластина, защото в хода на израстване са необходими нови свободни силициеви атоми, които да се свържат с кислорода. Диоксид с дебелина d се формира за сметка на участък от силициевата подложка с дебелина $0,44d$. Това трябва да се има предвид в последствие, когато се легира или ецва пластината.

Модел на Дийл-Гроув за силициевото окисление

За окисление, окислителят трябва: (1) да преминава от газовата фаза към границата между газа и оксида с определен поток F_1 , (2) да се движи през слой SiO_2 към силиция с поток F_2 и (3) да реагира със силиция на границата $\text{Si} - \text{SiO}_2$ с поток F_3 .

$$F_1 = h(C^* - C_0)$$

h е коефициент на пренос на газовата фаза, C_0 е концентрацията на окислител в оксида при външна повърхност, а C^* е равновесната концентрация на окислител в оксида.

Законът на Фик се използва за описване на потока от окислител през оксидния слой:

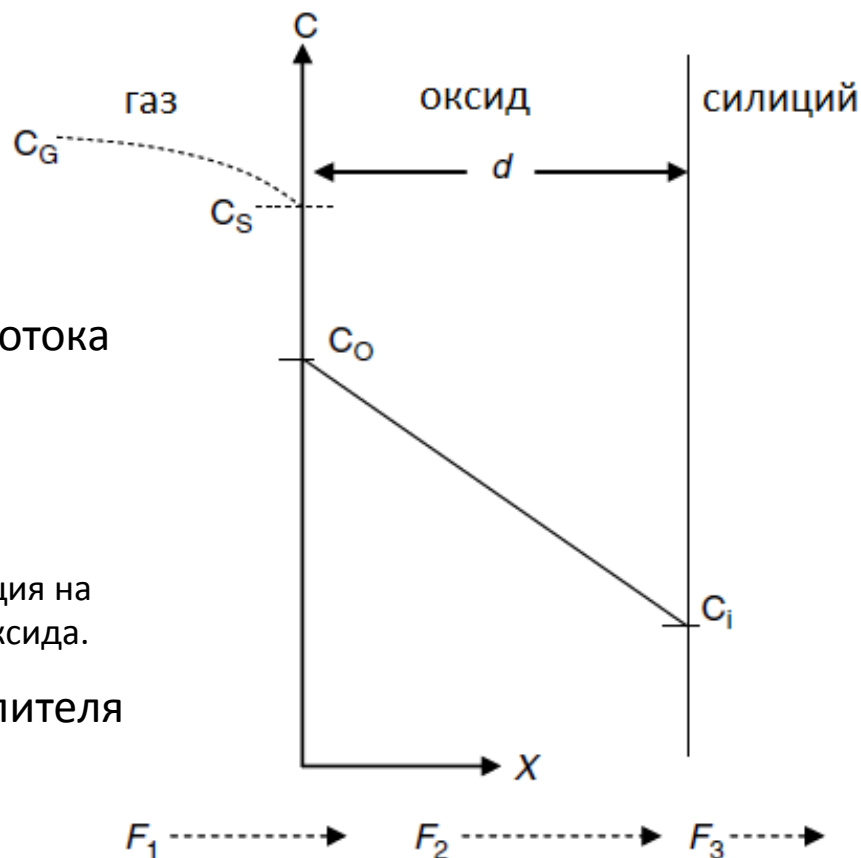
$$F_2 = \frac{D_{\text{eff}}(C_0 - C_i)}{x_0}$$

D_{eff} е ефективната дифузионна константа, C_i е концентрацията на окислител на интерфейса $\text{Si} - \text{SiO}_2$ и x_0 е дебелината на оксида.

Потокът, съответстващ на реакцията на окислителя на границата $\text{Si} - \text{SiO}_2$, е

$$F_3 = k_s C_i$$

където k_s е константа за скоростта на химичната реакция.



Този модел приема, че процесът на окисление е в стабилно състояние, така че всеки от потоците трябва да бъде равен ($F=F_1=F_2=F_3$).

Чрез решаване на горните уравнения за потока F , скоростта на растеж на оксида може да се определи от:

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{F}{N_1}$$

където N_1 е броят на окислителните молекули, включени в единица обем на оксидния слой, а N_1 е $2,2 \times 10^{22}$ SiO_2 молекули / cm^3 за сух кислород и $4,4 \times 10^{22}$ молекули/ cm^3 за H_2O . Решаване на това диференциално уравнение и приемане, че може да има начална дебелина на оксида (x_i) ($x_0=x_i$ при $t=0$), води до следната връзка за дебелината на оксида като функция на времето:

$$x_0 = \frac{A}{2} \left[\left(1 + \frac{t + \tau}{A^2/4B} \right)^{1/2} - 1 \right]$$

$$A = 2D \left[\frac{1}{k_s} + \frac{1}{h} \right] (\text{cm}) \quad B = \frac{2DC^*}{N_1} (\text{cm}^2/\text{s}) \quad \tau = \frac{x_i^2 + Ax_i}{B} (\text{s})$$

τ представлява еквивалентно изместване във времето поради наличието на първоначална дебелина на оксида. За дълго времена на окисляване ($t \gg \tau$, $t \gg A^2/4B$), уравнението се свежда до параболичен закон.

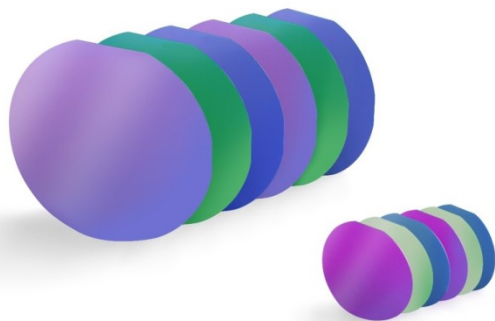
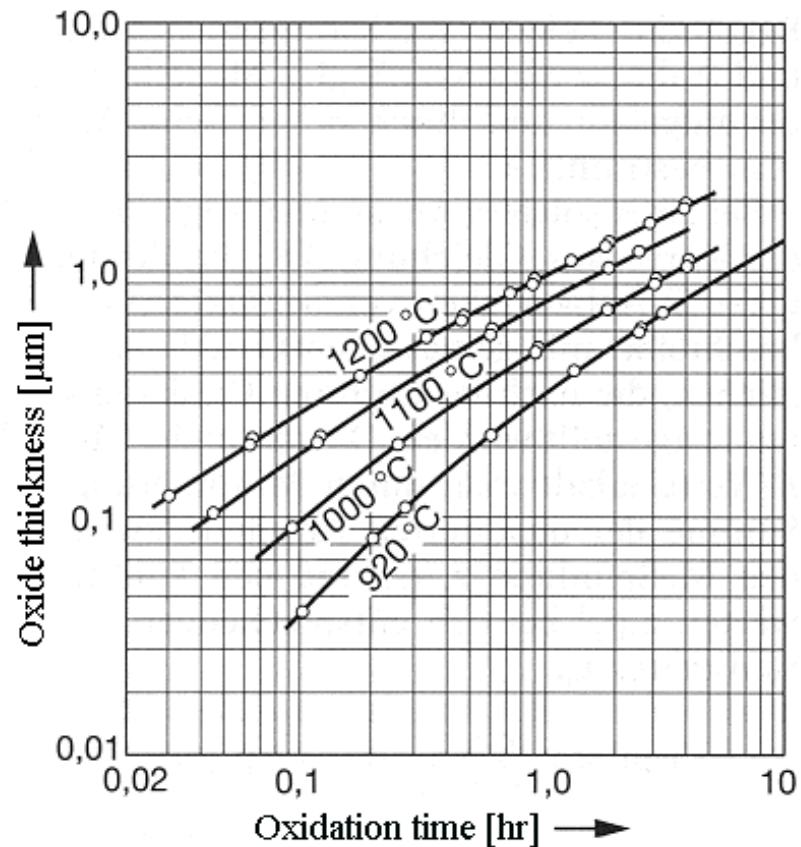
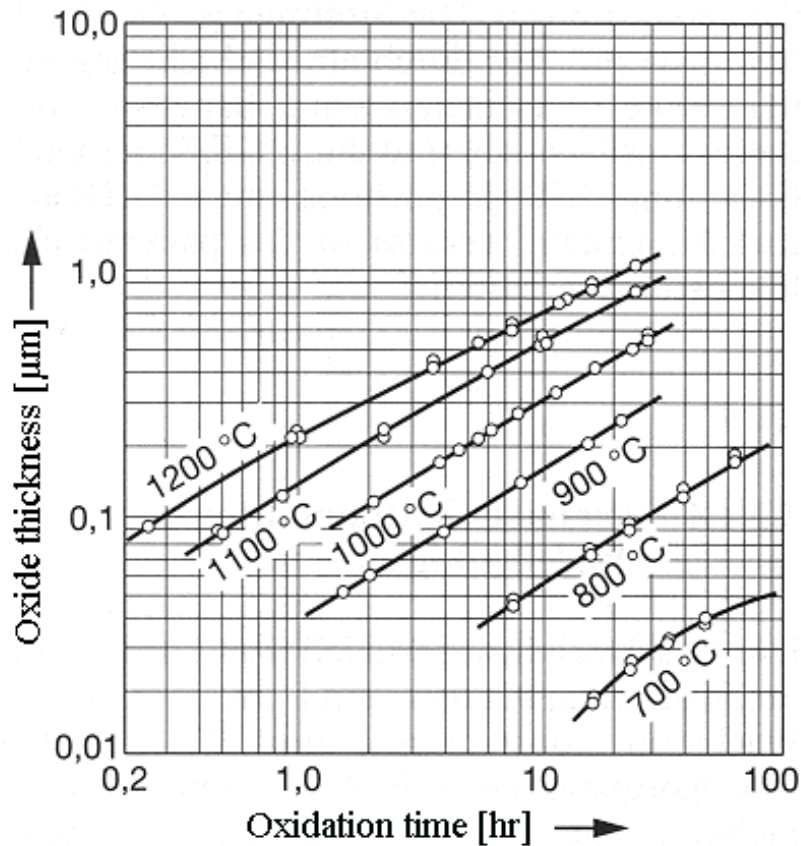
$$x_0^2 = Bt$$

където B е параболичната константа на скоростта на растеж.

За кратки времена на окисление ($t + \tau \ll A^2/4B$), уравнението се свежда до линеен закон:

$$x_0 = \frac{B}{A}(t + \tau)$$

където B/A е линейната константа на скоростта. За дебели слоеве (дълги времена на окисление) реакцията е ограничена от етапа на дифузия на кислород, което води до параболичен растеж във времевата зависимост, докато за по-тънките слоеве (кратки времена на окисление) реакцията е ограничена от кинетиката на кислородната реакция със силиция водещо до линеен растеж във времето.



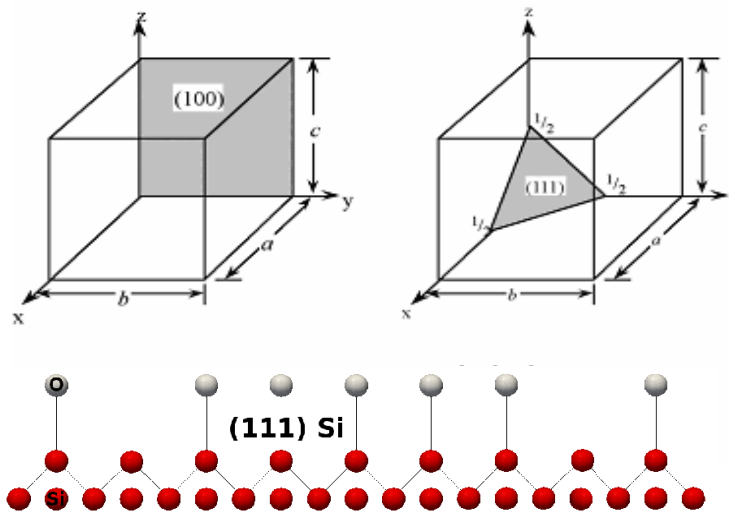
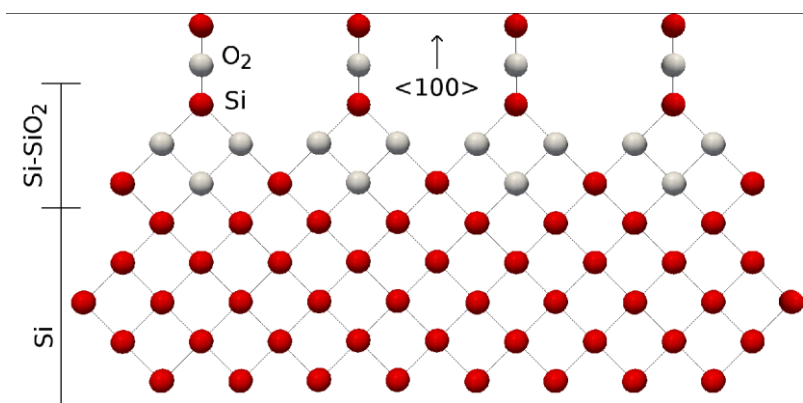
Зависимост на дебелината на оксида от времето за окисление в среда на сух (вляво) и влажен кислород (вдясно) и при различни температури – мокрото окисление е няколко пъти по-бързо.

Някои от ключовите фактори, влияещи върху еднородността на слоя SiO₂ са:

- подготовката на повърхността на Si пластина (почистване от естествен оксид);
- динамика на газовия поток в реакционната камера;
- равномерност на температурата по дължина на реакционната камера;
- контрол на температурата в зоните на плавно нарастване и спадане;
- чистота на газа (кислородния поток);
- разстояние между пластините (стъпка);
- скорост на изваждане на пластините на околна среда и температура

Особености:

- Скоростта на процеса зависи от степента на легиране на пластината, като нараства за силно легирани пластини, а също и окислението води до преразпределяне на примесите.
- Скоростта на процеса зависи от кристалографската ориентация на пластината (най-висока за $\langle 111 \rangle$ и най-ниска за $\langle 100 \rangle$).



Атомна конфигурация на граничната повърхност Si-SiO₂

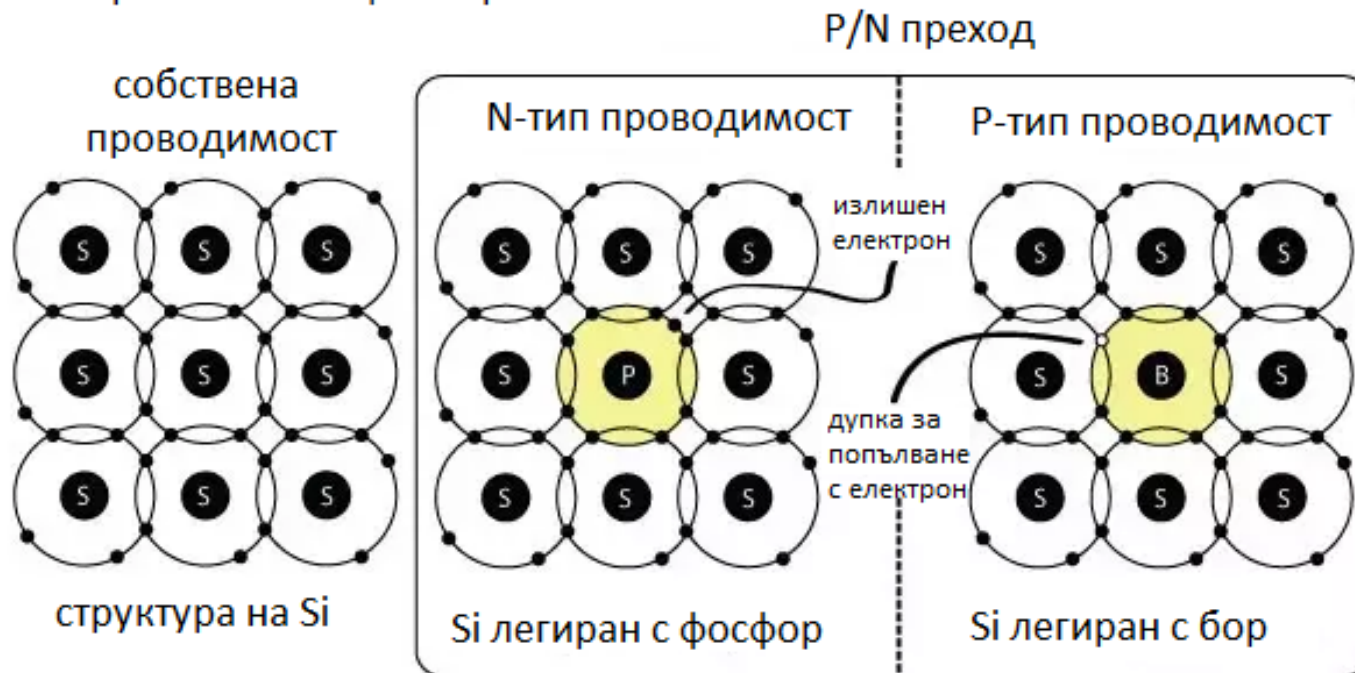
След провеждане на дифузия и формиране на р-областите например високата температура при окисление за формиране на следващите n-области ще доведе до преразпределение на примесите, въведени в силиция. Промяна на зададената дълбочина на преходите би влошила електрическите параметри на приборите (пробивното напрежение и изходното съпротивление). Затова при дифузията се предвижда запас по дълбочина на проникване на примесите.

- **Дифузия на примеси в полупроводникова пластина:**

Това е контролируемо въвеждане на примесни атоми в основния полупроводник с цел създаване на локални области с определен тип проводимост – p или n.

Реализира се като на повърхността на пластината се създава голяма концентрация на легиращия примес, който дифундира в дълбочина при висока температура заради градиента в концентрацията.

Легиране на силиций с примеси

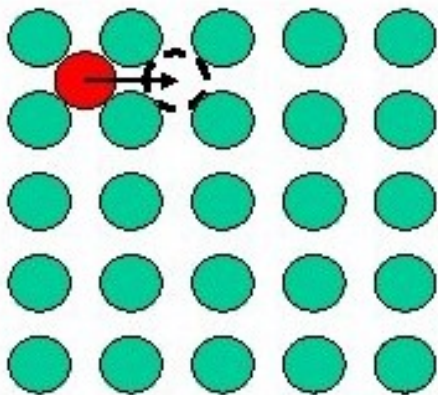


Необходимо е да се въвеждат последователно донорни и акцепторни примеси, за да се формират съседни области с противоположен тип на проводимостта.

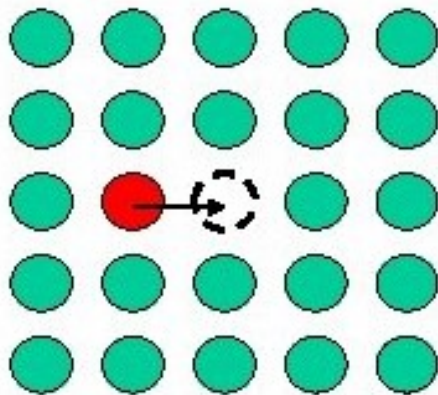
Механизмът на въвеждане на примеси от III-та и V-та група в кристалната решетка на силиция (или друг полупроводник) е ваканционен, затова дифузията е бавна.

Ваканцията е място в кристалната решетка на материала, от което липсва атом и това е вид дефект.

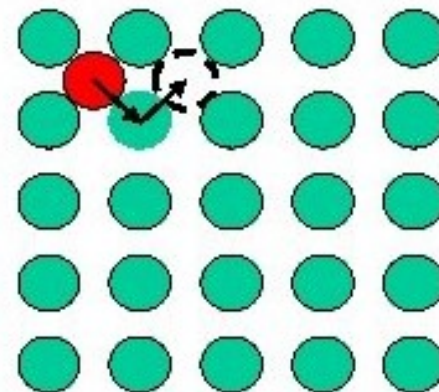
междувъзлов механизъм



вканционен механизъм



заместващ механизъм



Процесът на легиране зависи от големината на дифундиращия атом и от големината и кристалната подредба на атомите в основния полупроводник.

Първи закон на Фик за скоростта на разпространение на атомите на дадено вещество в друго. Отнася се за даден момент от време:

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

J – дифузионен поток (брой частици, пренесени за единица време през единица площ, перпендикулярна на посоката на движение);

c – концентрация на дифундиращите частици в единица обем;

x – дълбочината на проникване;

D – коефициент на дифузия (не е константа, зависи от температурата и концентрацията на дефекти в кристалната решетка).

Знак (-) обозначава, че дифузията възниква в посока противоположна на посоката на увеличената концентрация.

Втори закон на Фик за изменение на концентрацията на дифундиращото вещество с течение на времето в различни точки на приемащото вещество:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}$$

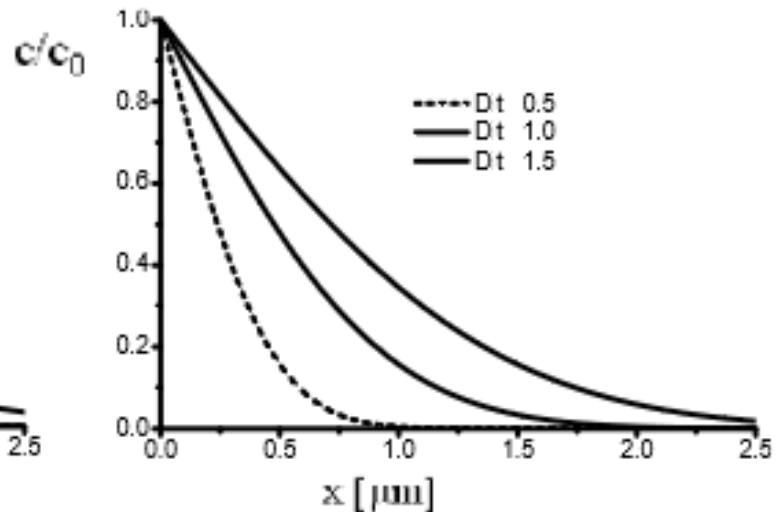
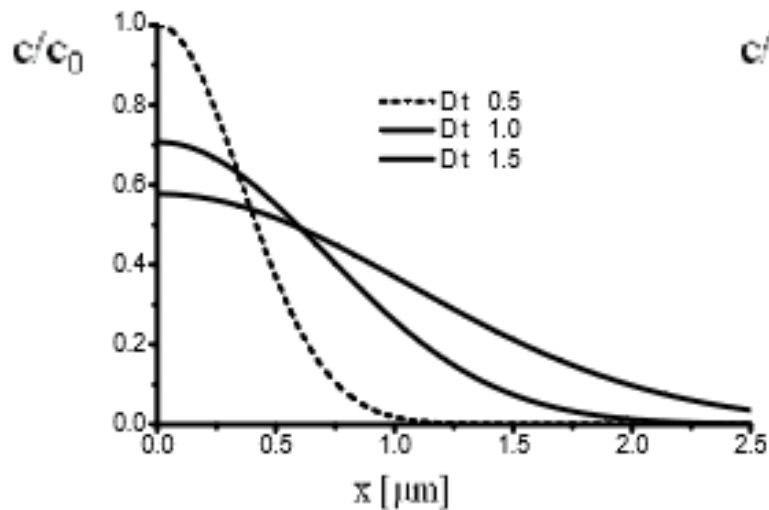
Разпределение на дифузанта в една посока навътре в кристала

t – времето за дифузия

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$$

Разпределение на дифузанта във всички пространствени направления

Граничните и начални условия при решаването на уравнението са 2: а) дифузия от неограничен (постоянен) източник на примеси; б) дифузия от ограничен източник.

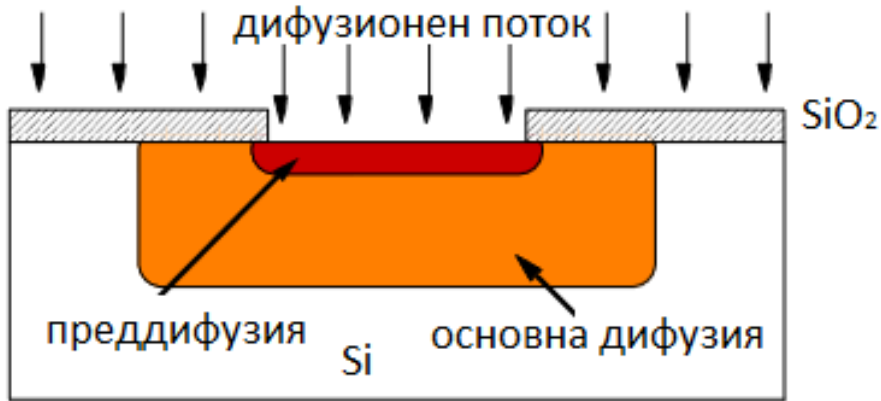


Дифузия от ограничен източник:

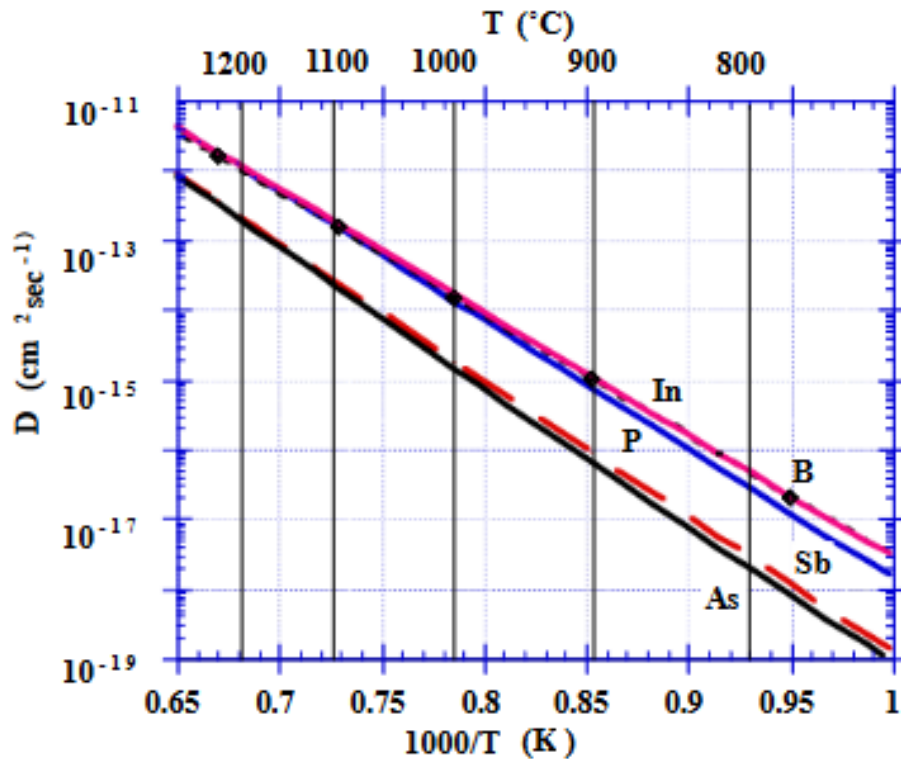
- Извършва се от наситен с примеси повърхностен слой и няма постоянен приток на примеси отвън на пластината, затова с течение на времето повърхностната му концентрация намалява.
- Гаусова функция, зависеща от дифузионната дължина (произведение от D и t), тоест дълбочината на проникване на примеса се увеличава при увеличаване на температурата (косвено чрез D) или времето на дифузия, но за сметка на повърхностната концентрация.

Дифузия от неограничен източник:

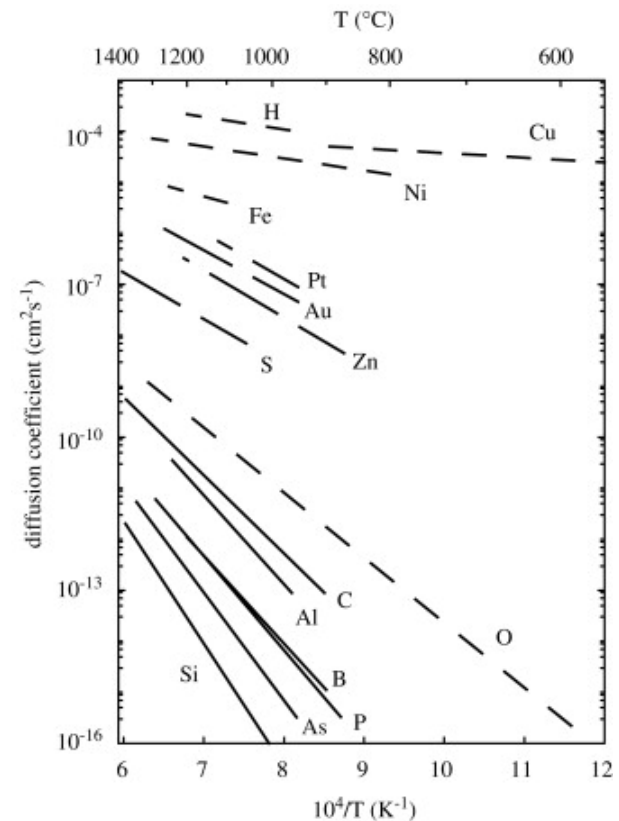
- Концентрацията на примеси от едната страна на пластината се поддържа постоянна във всеки момент докато примесите проникват в дълбочина в силиция с увеличаването на D или t .
- Функция, допълваща Гаусовата функция на грешката до единица.

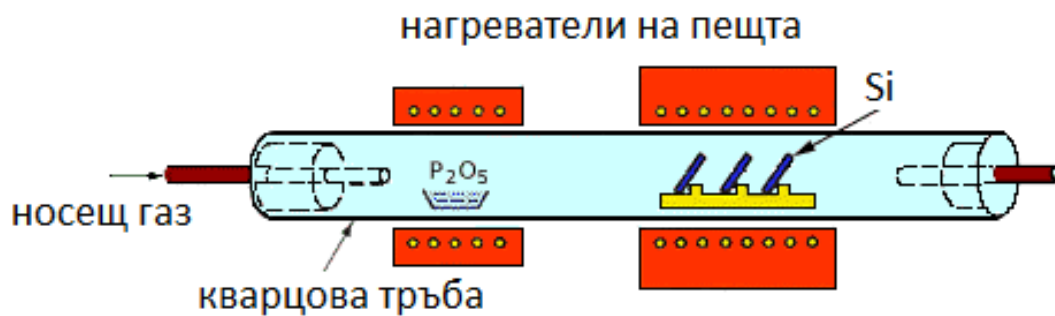


Двустадийна дифузия – дифузия от неограничен източник (преддифузия), след което тази област служи като ограничен източник + допълнителна термична обработка за разпределение.



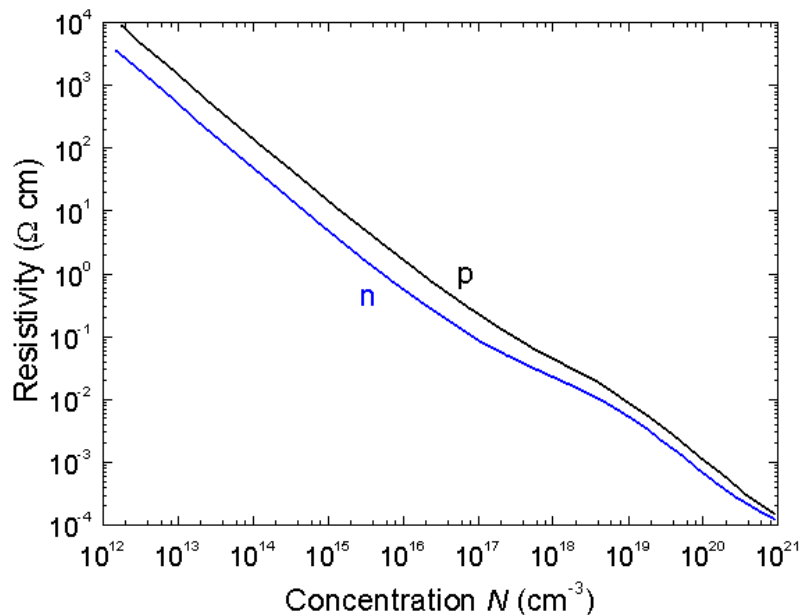
Зависимост на коефициентите на дифузия на различни материали в силиция според температурата.





Източниците на примеси може да са твърди, течни или газообразни, но винаги постъпват към повърхността на пластината в парообразно състояние. За транспортиране на парите се използва носещ инертен газ.

Могат да се използват пещите, които се използват за термично окисление като работната температура е около 1300 °C, поддържана с точност до 0,5 °C в зоната с пластините.



Връзка между повърхностното специфично съпротивление и повърхностната концентрация. Измерва се по 4-сондов метод.

На база на тази зависимост и чрез т.нар. криви на Ирвин може да се определят дълбочината на дифузионния слой, разпределението на примеси и концентрацията им в дълбочина.

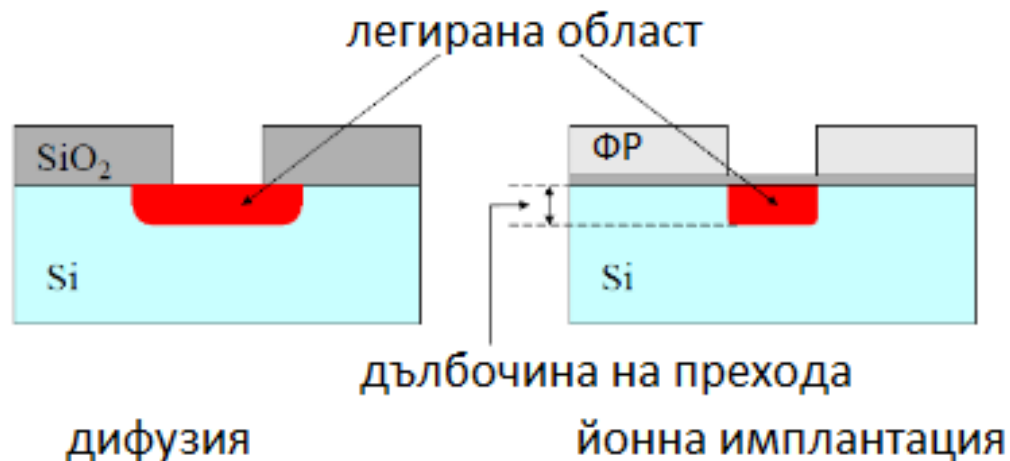
- **Ионна имплантация на примеси в полупроводникова пластина:**

Ионната имплантация е процес, при който високоенергийни йони на примесите се сблъскват с повърхността на пластината, прониквайки под нея и пораждайки контролирано йонно разпределение. Имплантираните йони обикновено са добавки, като бор, фосфор, арсен, индий и антимон.

- енергията на имплантация може да варира от 0,2 keV до повече от 3 MeV;

- концентрацията може да варира в диапазон от $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ до повече от $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$;

- ъглите на падане варират от наклон с ъгъл от 0° (перпендикулярно към повърхността) до наклон спрямо нормалата към повърхността 60° .



Дифузия

Невъзможност за постигане на висока концентрация на примеси;

Високотемпературен процес, изискващ температурно-устойчива маска (SiO_2);

Изотропен профил на легиране

Невъзможно независимо контролиране на концентрация и дълбочина на легиране;

По-проста и евтина апаратура;

По-ниска концентрация на дефекти в легираните области;

Невъзможност за легиране на сложни ПП съединения (например GaAs) или за получаване на късоканални транзистори.

Йонна имплантация

Възможност за получаване на широк диапазон от легиращи концентрации;

Нискотемпературен процес;

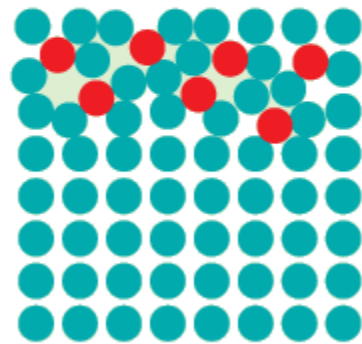
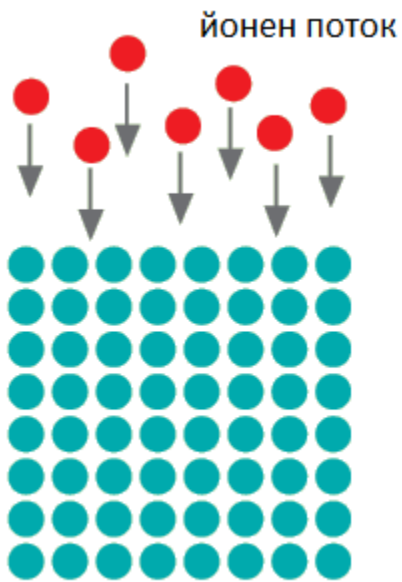
Анизотропен профил на легиране;

Възможен е независим контрол на концентрация и дълбочина на легиране

По-сложна и скъпа апаратура;

По-висока концентрация на дефекти в легираните области, което изисква допълнително отгряване;

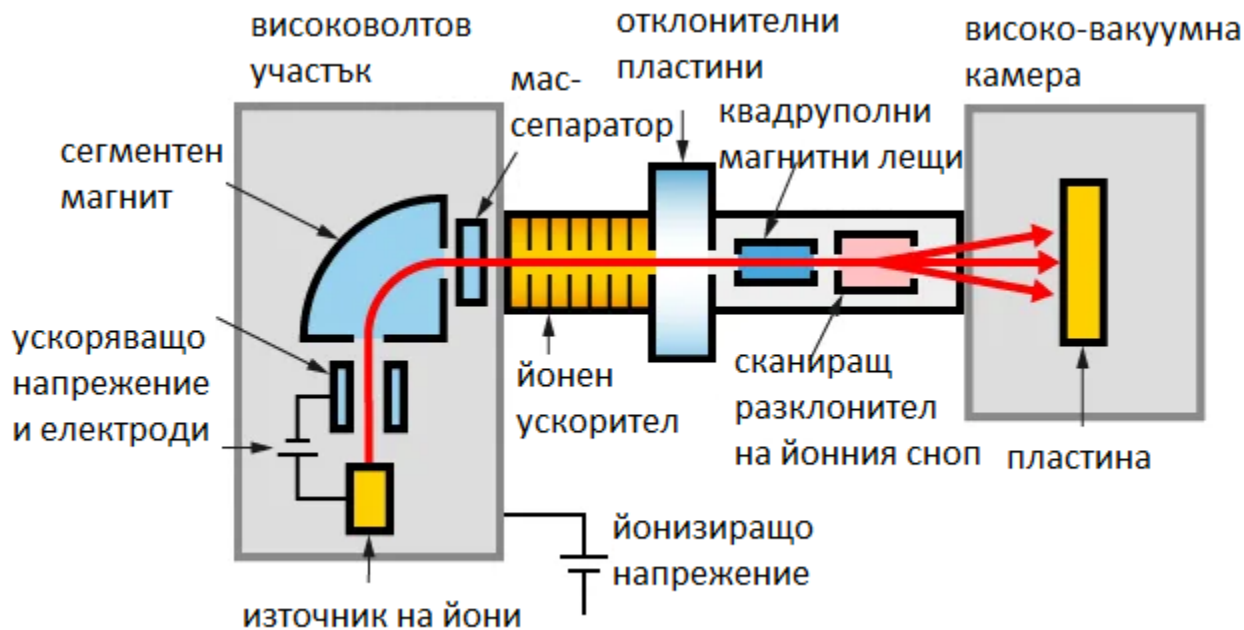
Възможност за легиране на сложни ПП съединения (например GaAs) и за получаване на късоканални транзистори.



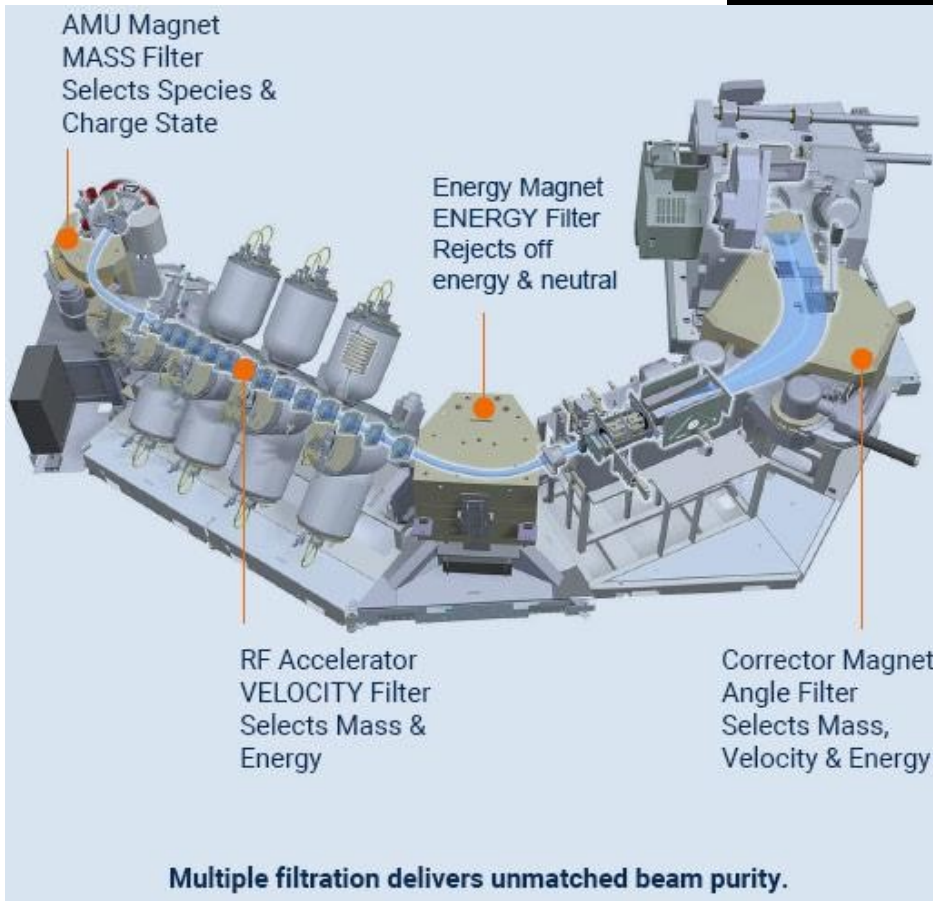
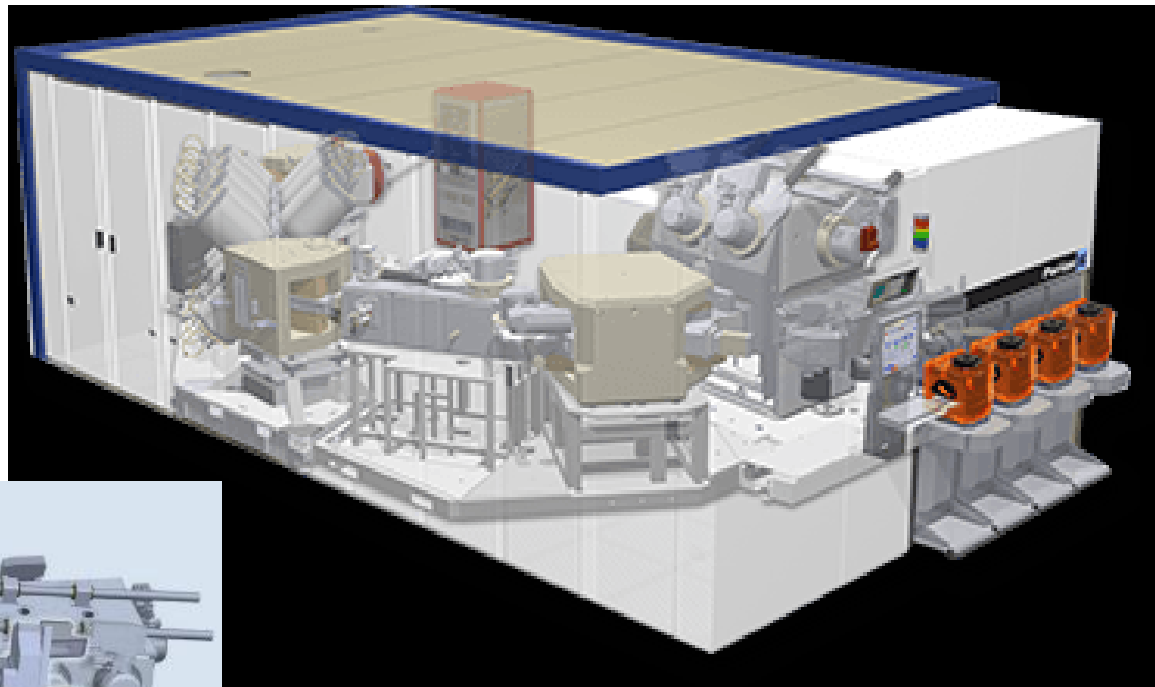
преди и след процеса на имплантация

Концентрацията на примеси при йонната имплантация обикновено следва Гаусово разпределение като най-високата концентрация не е на повърхността, а в рамките на определена дълбочина.

кристална решетка на полупроводника



Апаратура за йонна имплантация



AMU Magnet
MASS Filter
Selects Species &
Charge State

Energy Magnet
ENERGY Filter
Rejects off
energy & neutral

RF Accelerator
VELOCITY Filter
Selects Mass &
Energy

Corrector Magnet
Angle Filter
Selects Mass,
Velocity & Energy

Multiple filtration delivers unmatched beam purity.

<https://www.axcelis.com/products/purion-xe-series-high-energy-ion-implantation/>

Благодаря за вниманието!