



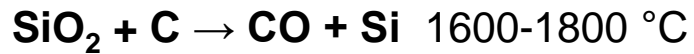
**виробництво кремнію
для електроніки**

металургійний кремній
MG-Si = 97-98% Si



застосування Si:

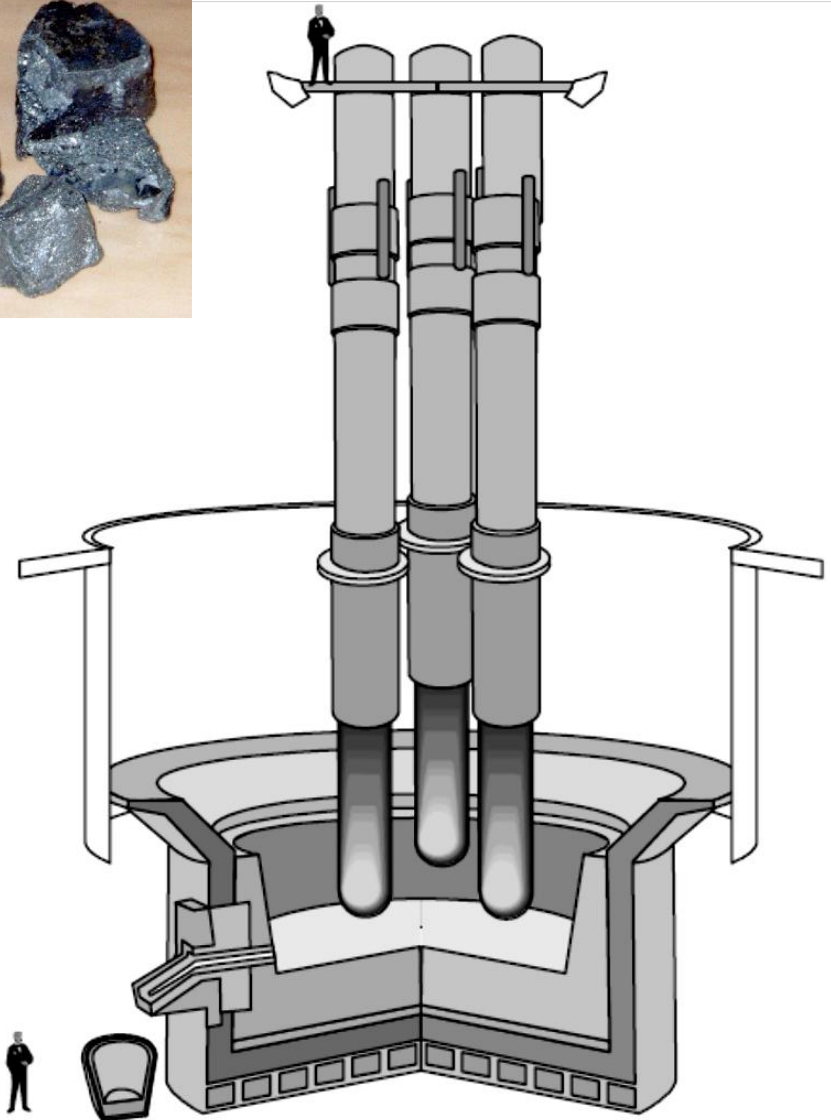
- електротехнічна сталь (~ 6% Si)
- кислотостійка сталь (~ 16% Si)

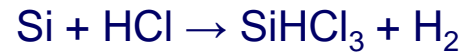


побічні продукти: SiO, SiC

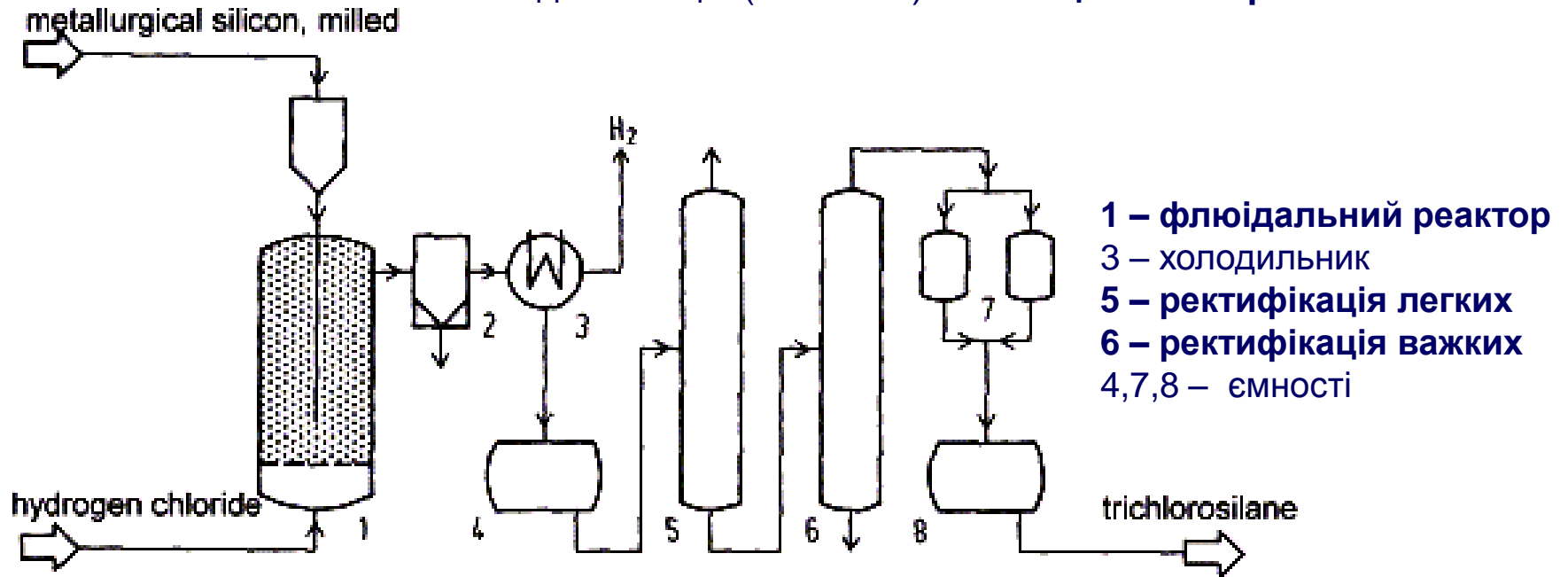
> 10 млн тон /рік

Китай, США, Україна, Польща





дистиляція (ок. 32 °С) → очищення 10⁸ разів



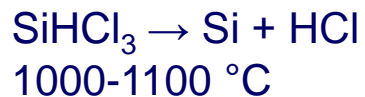
трихлоросилан **SiHCl₃** – Siemens (60.), Union Carbide

тетрахлоросилан **SiCl₄** – Rhône-Poulenc, Westinghouse, Texas Instruments

дихлоросилан **SiH₂Cl₂** – Wacker Siltronic

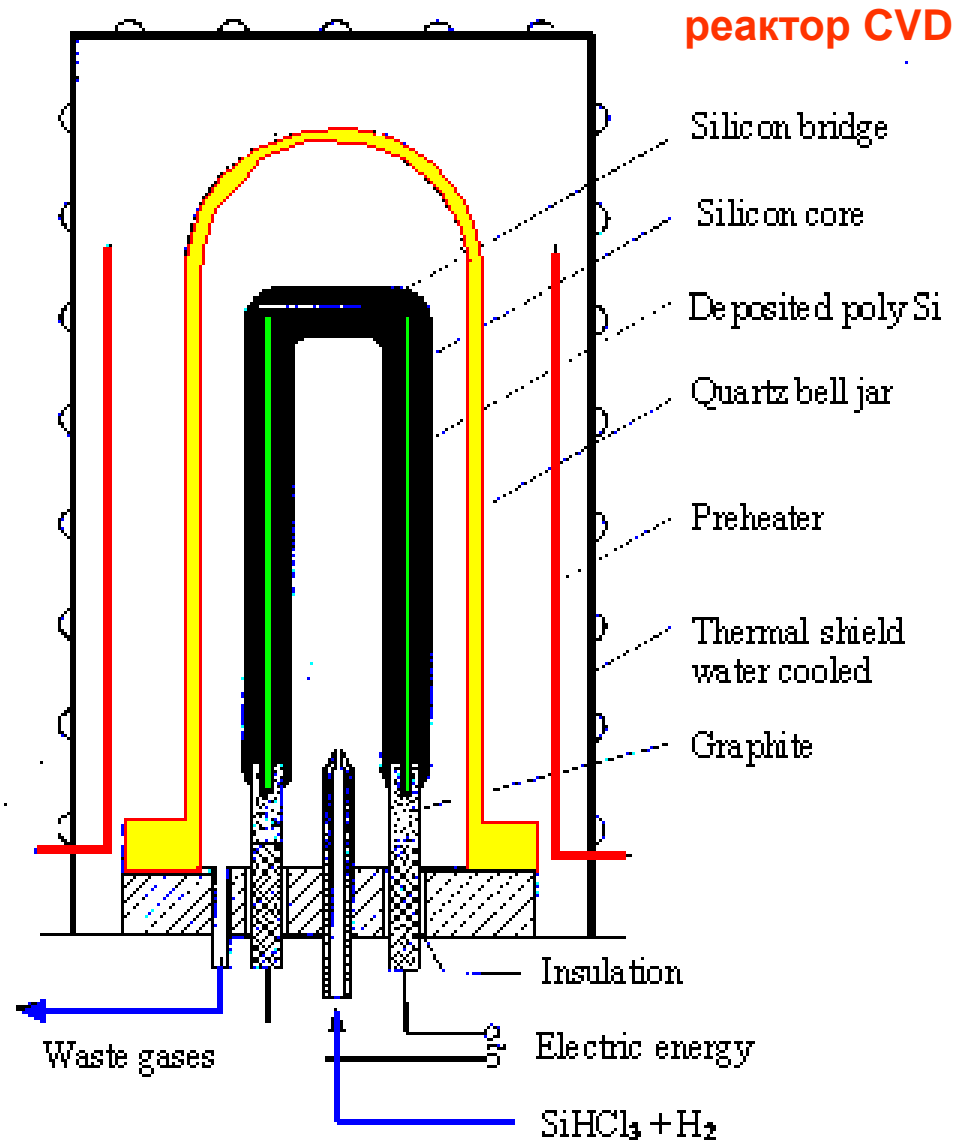


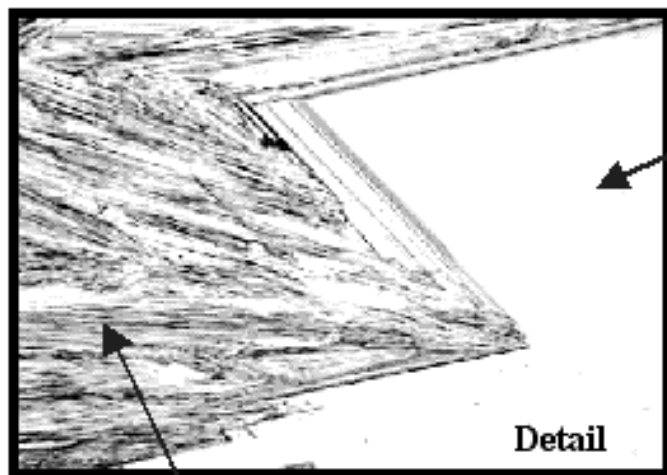
виробництво електронного Si
EG-Si > 99,999999%



цільові домішки:
PH₃, PCl₃, AsCl₃, BCl₃

термоліз на поверхні =
 Chemical Vapor Deposition, **CVD**

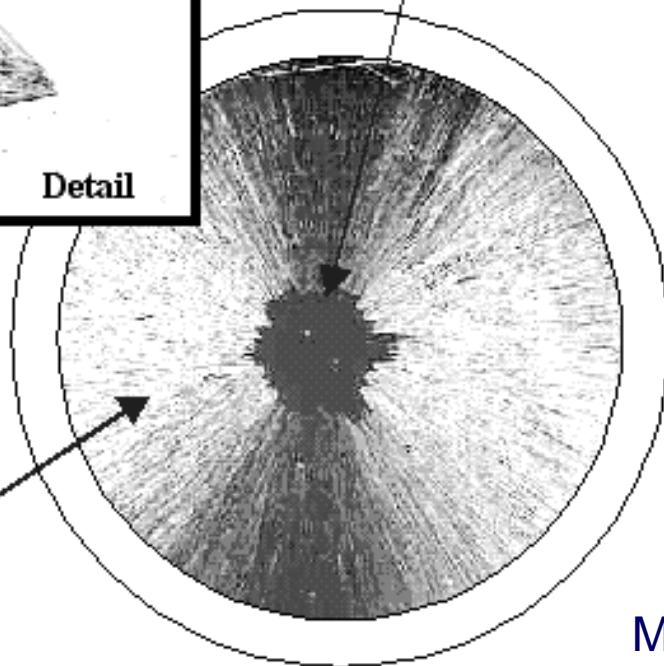




Starting rod

> 10 тис. тон / рік

Finely grained
polycrystalline
CVD Poly



MG-Si ~ \$1.5 /kg
EG-Si ~ \$30 /kg

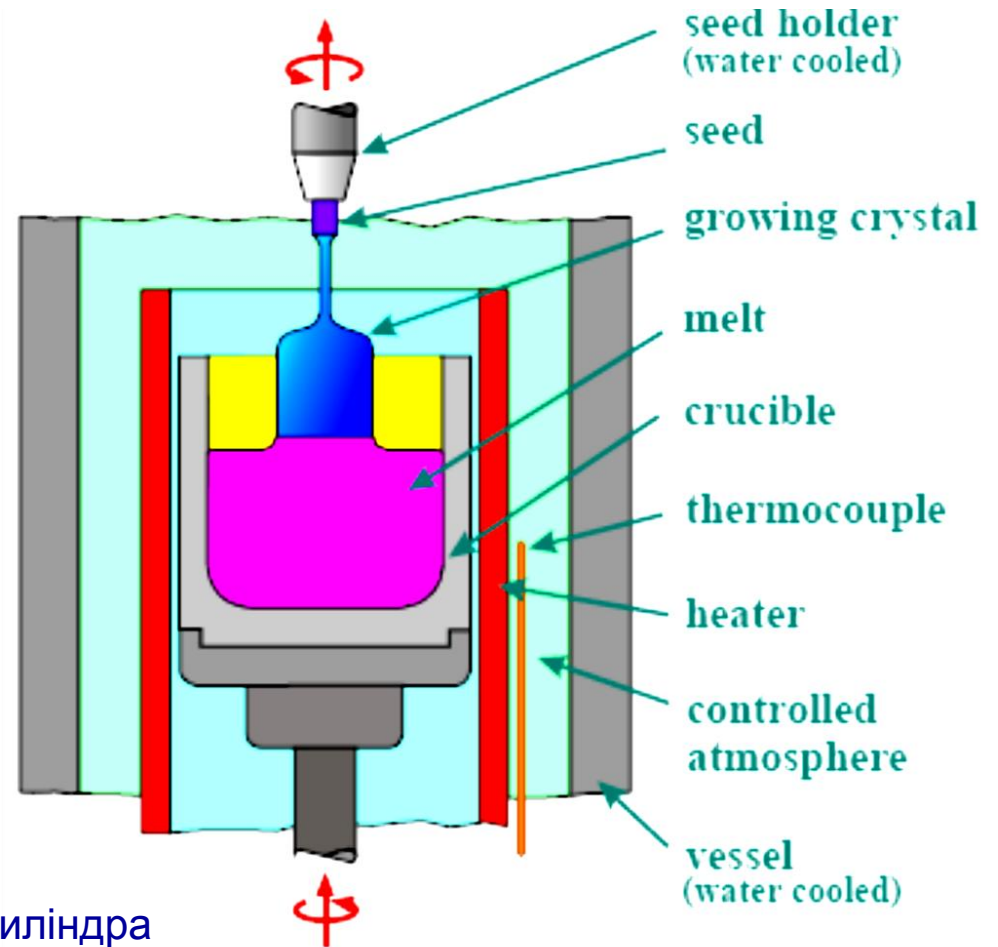
метод Чохральського = витягування кристалу з розплаву

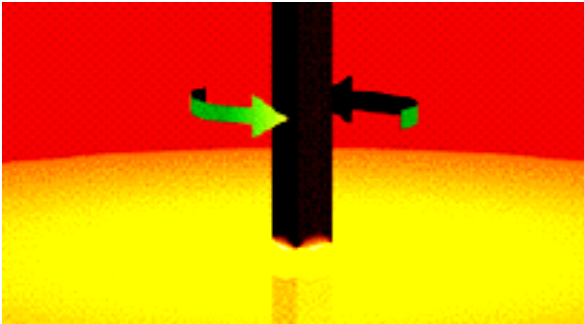
основна перевага CZ:

немає контакту з тиглем

→ мін структурних дефектів

- **тоємпература** 1412 °C
- **тигель** SiO_2 (~ odporny)
- **продування** (SiO) Ar
- тигель обертається 10-15 min^{-1}
- заданий тип поверхні (100)
- кристал обертається → форма циліндра
- **витягування** 1-5 mm/min (діаметр)

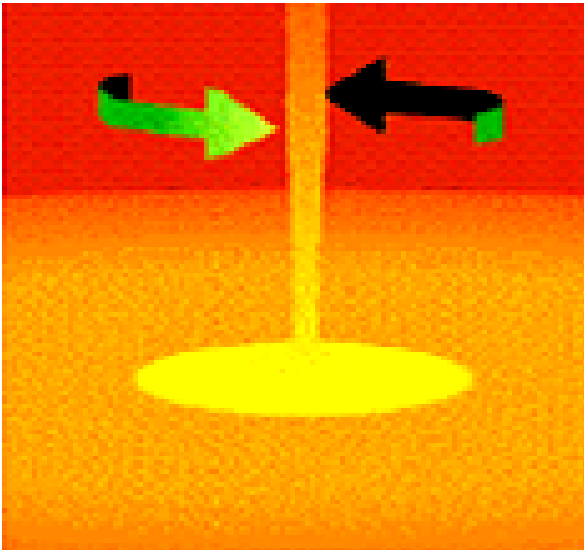




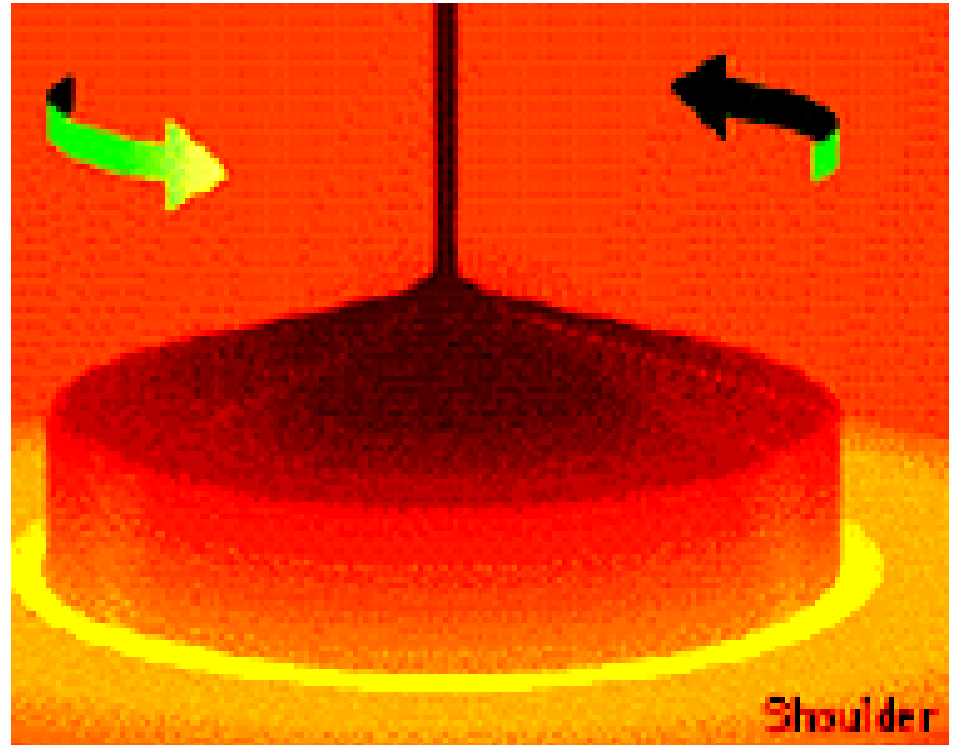
зародковий кристал торкається розплаву
площина = (100) або (111)
термічний шок → дефекти

швидке витягування → мінімум дефектів
(швидкість висока + зростає)

швидкість витягування поступово зменшують –
діаметр росте до норми



витягування кристалу
заданого діаметра



сегрегація домішок:

коефіцієнт сегрегації $k = C_{\text{solid}}/C_{\text{liquid}}$

$$C_s = k \cdot C_o \cdot (1 - x)^{k-1}$$

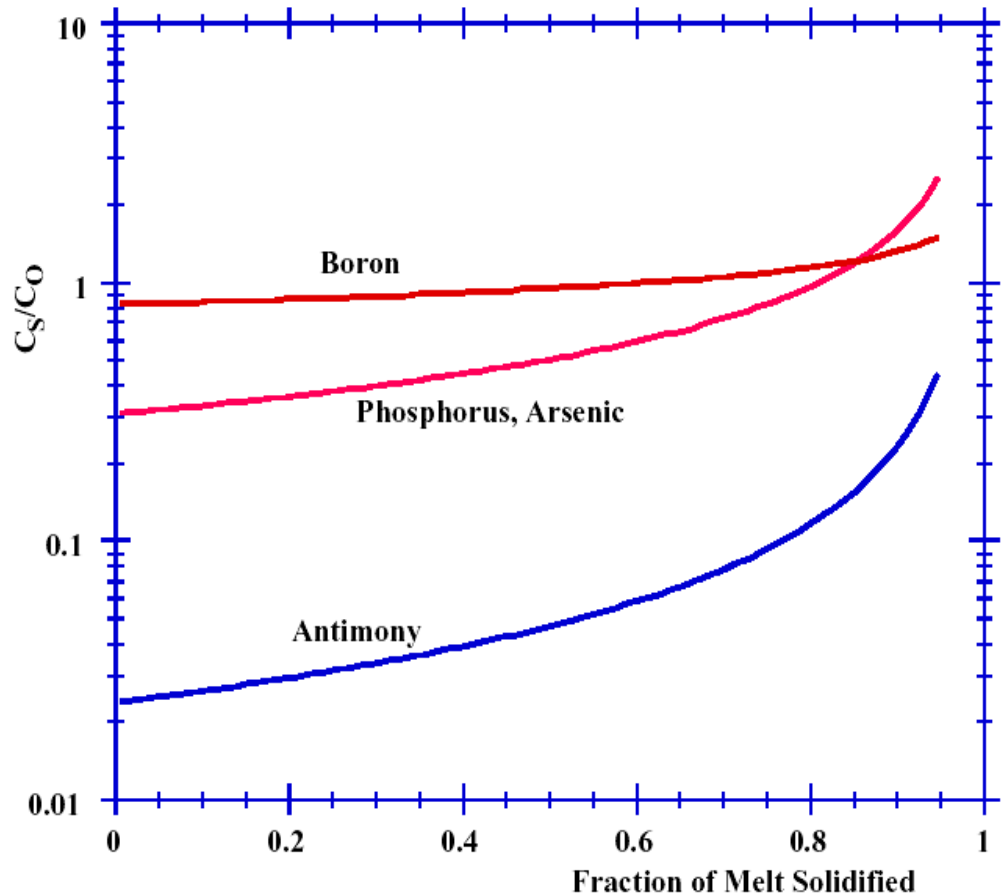
x – ступінь кристалізації

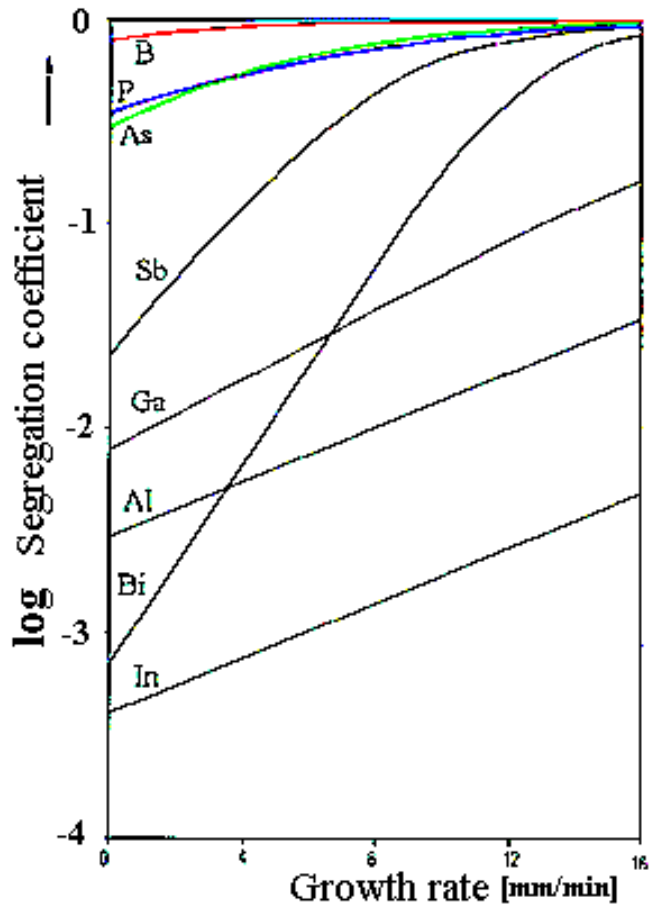
C_o – початкова концентрація

C_s – концентрація в кристалі

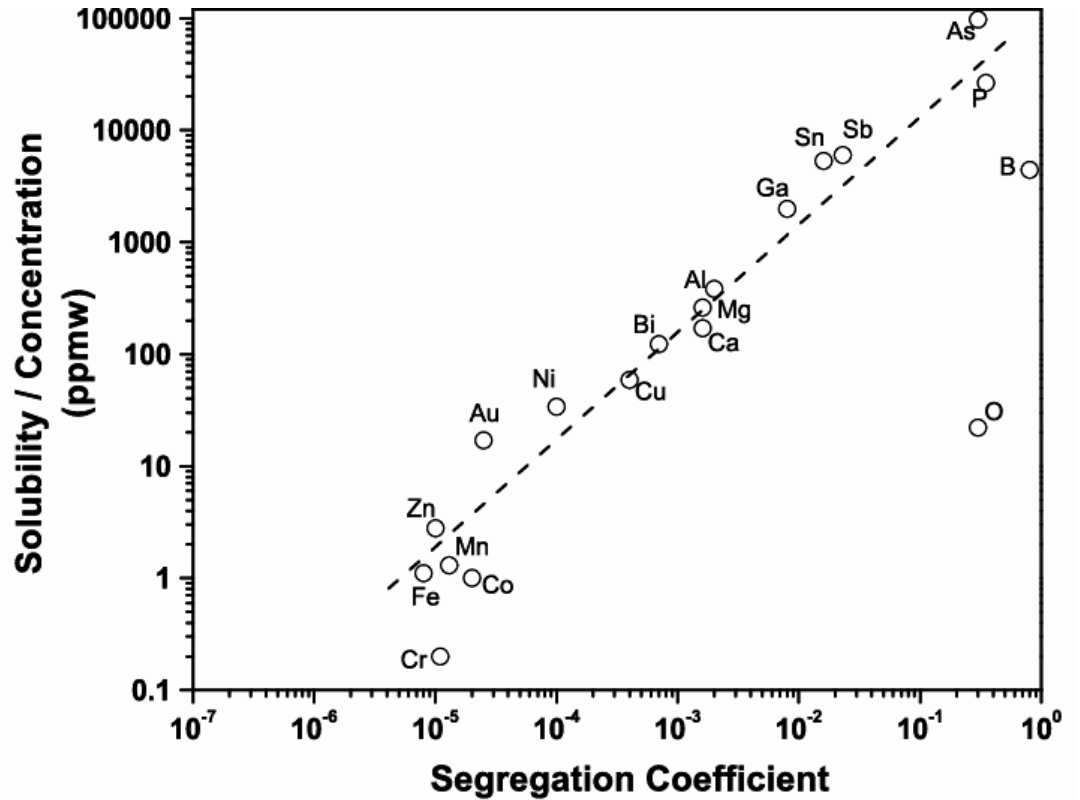
	k
B	0,8
P	0,35
As	0,3
Sb	0,02
Ge	0,03
Mn	0,00001
Cu	0,000004

- додаткове очищення
- нерівномірний розподіл домішок вздовж кристалу





коєфіцієнт сегрегації залежить від швидкості витягування
 мала швидкість – тiп домишок
 бiльша швидкість – менше домишок O





верхня частина кристалу містить
тіл домішок – відрізають → виробництво

монокристал розрізають на плитки („wafers”)

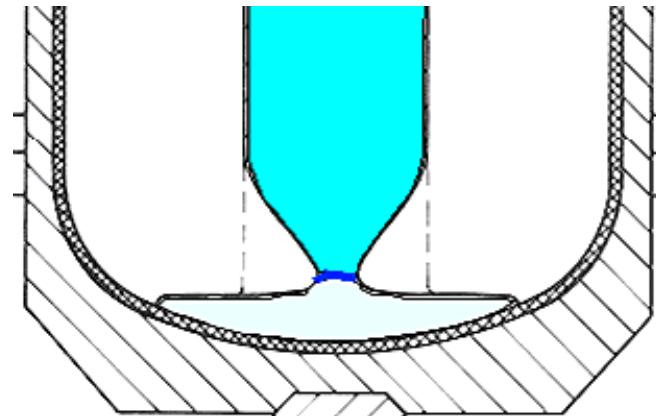
концентрація домішок відрізняється →

відрізняється провідність →

відрізняються параметри чіпів

кінцівка кристалу CZ

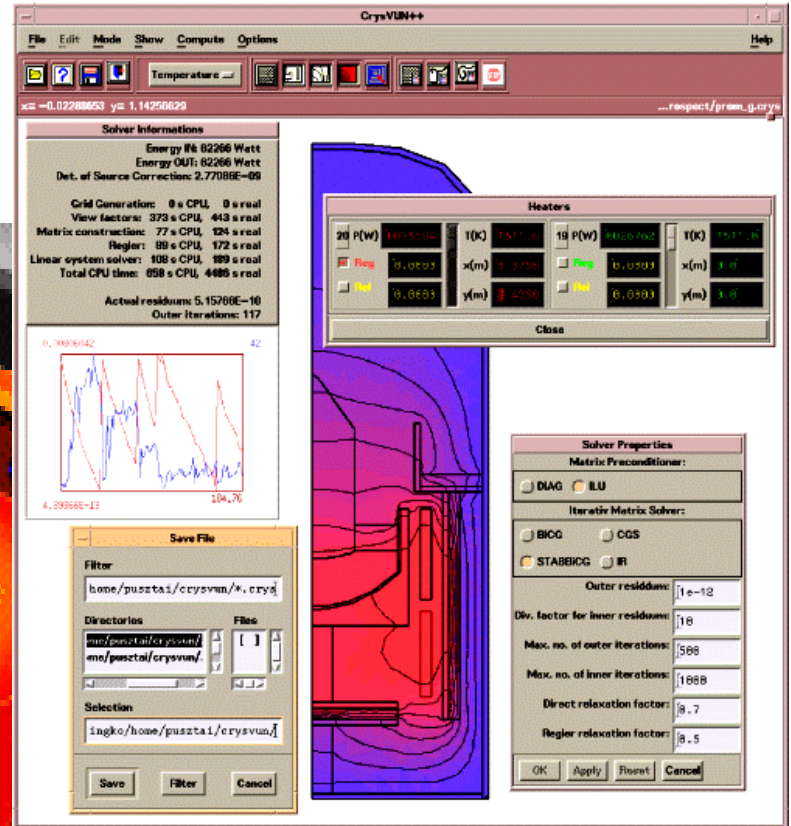
містить max домішок → очищення



зміна занурення кристалу → змінний градієнт температури

→ постійна зміна технологічних параметрів:

- швидкість обертання кристалу
- енергія нагрівання
- швидкість витягання кристалу
- інтенсивність перемішування розплаву



поле високої частоти – краща регуляція нагрівання



промисловий puller

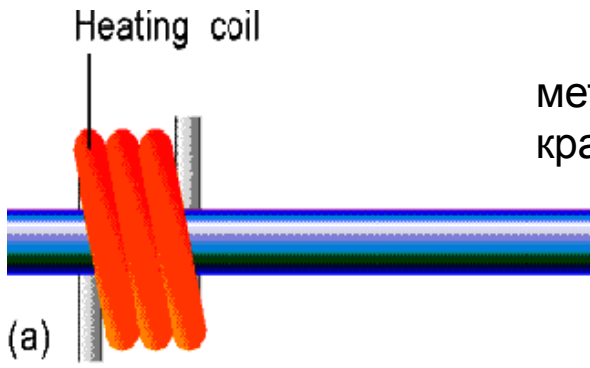
перевага методу CZ:
діаметр = 30-40 см
(+ довжина = 1,5-2 м)

універсальність →
широке застосування:

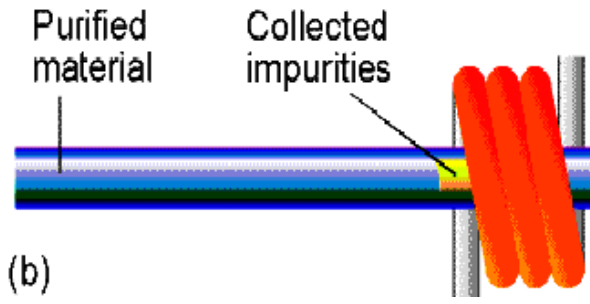
- Si, Ge, GaAs, GaN
- CsI, KBr, CaF₂
- LiNbO₃, YAlO₃

~ 90% виробництва EG-Si

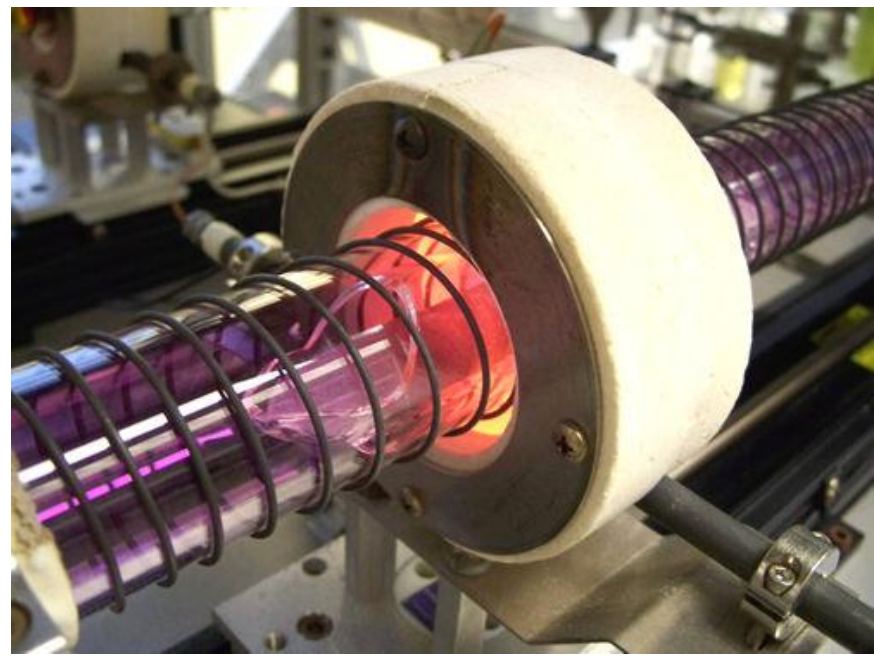




метод **зонної плавки** (Zone Melting,) –
 краплина розплаву пересувається вздовж кристалу



метод **плаваючої зони**
 (Floating Zone)



зона розплаву переміщується

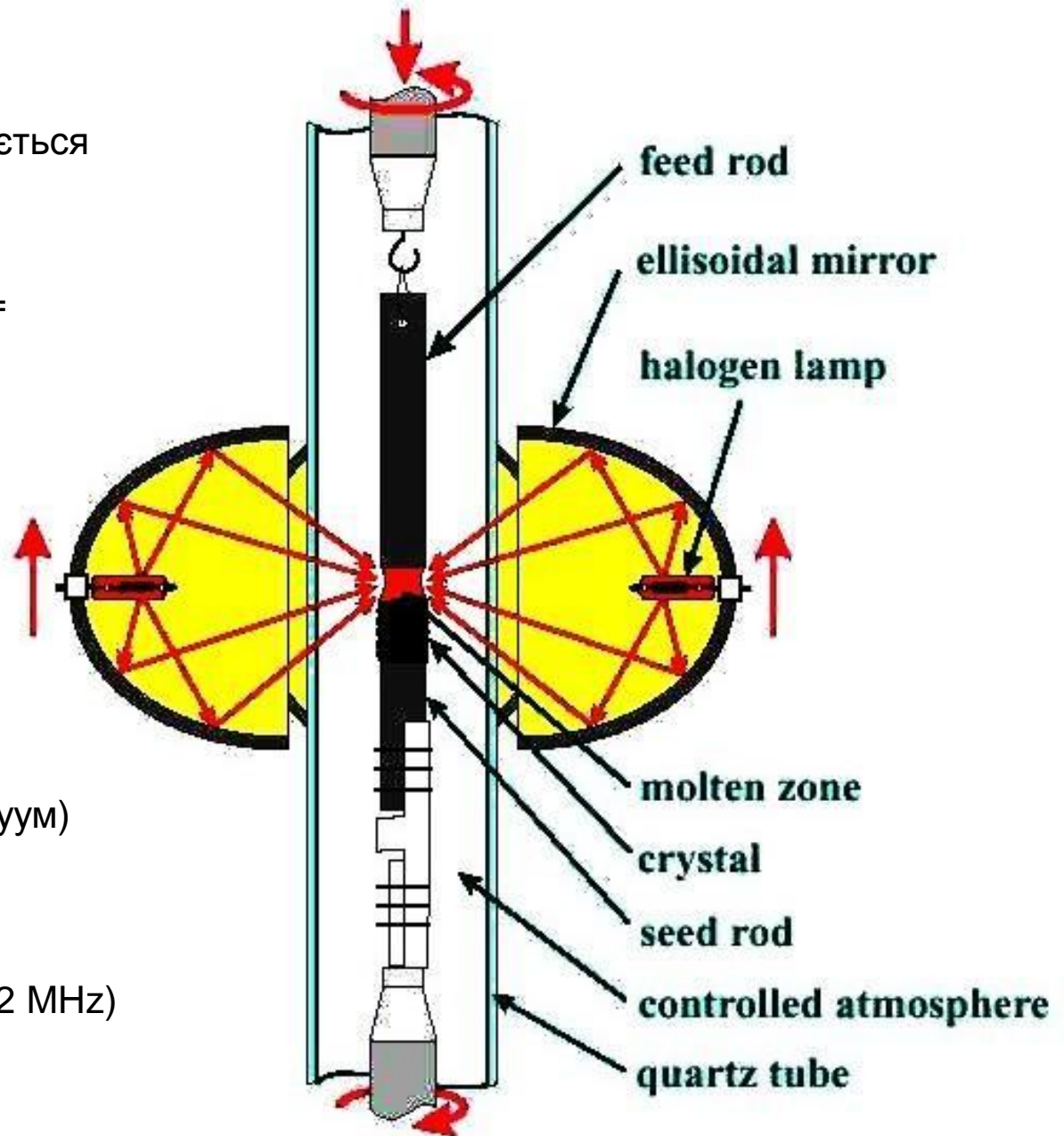
швидкість пересування =
~3 mm/min

обертання: 13-16 min⁻¹

атмосфера – Ar (або вакуум)

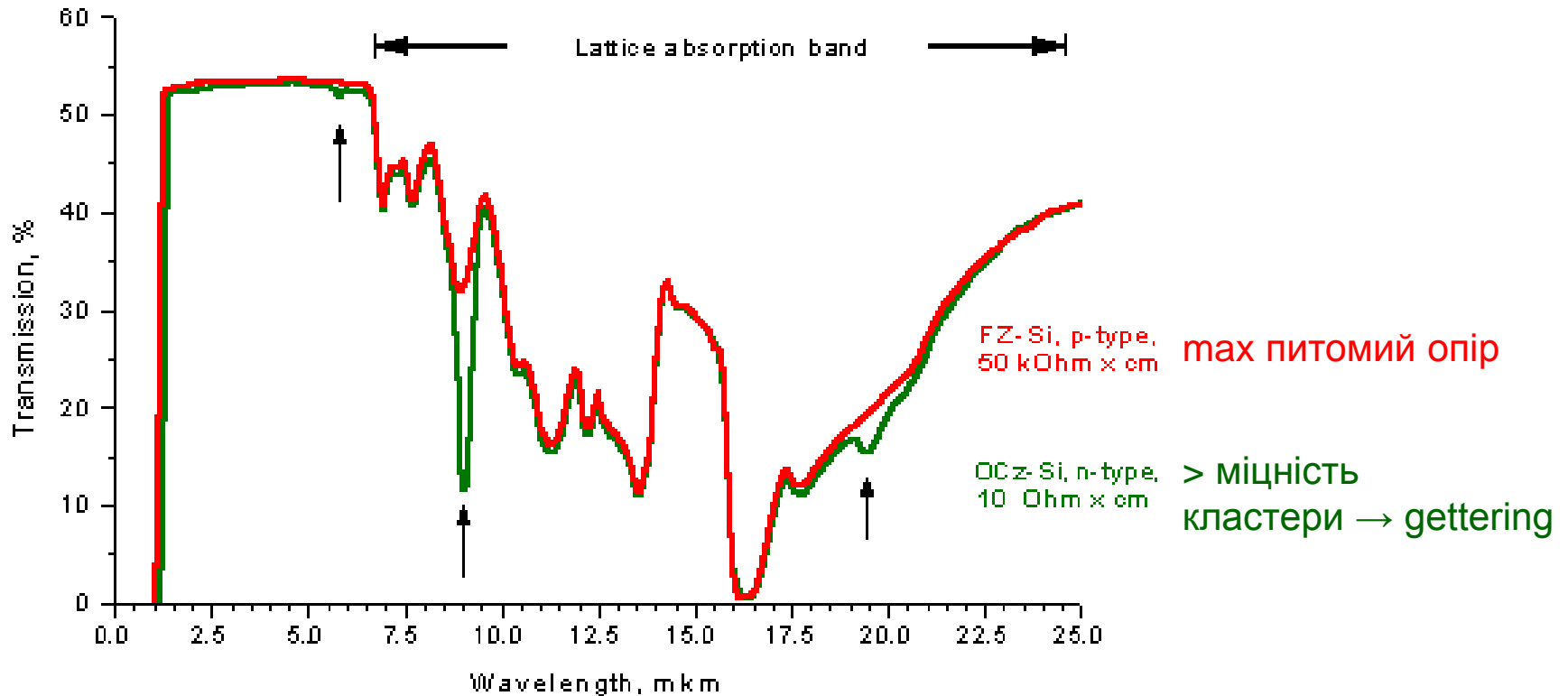
нагрівання:

- ІЧ (рис.)
- електромагнітне поле (2 MHz)

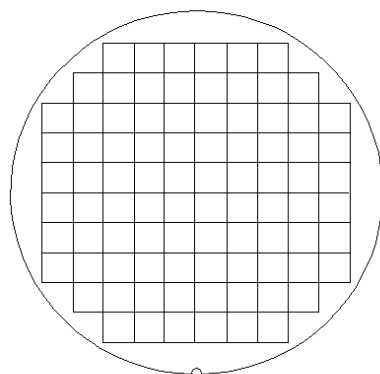


**перевага методу FZ: відсутність тигля → вища чистота кристалів
рівномірне розміщення цільових домішок**

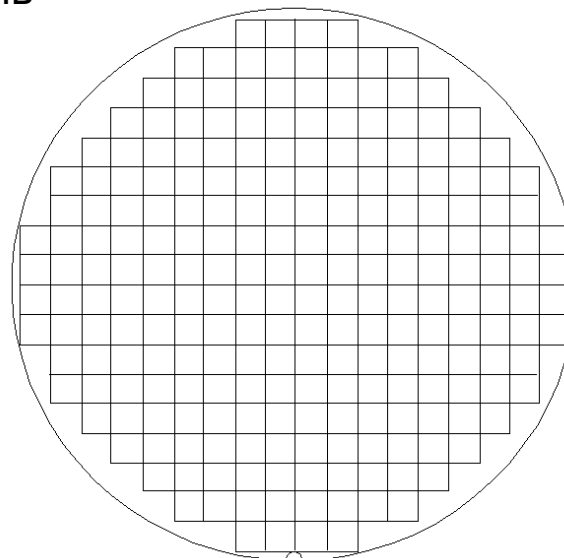
мін конц. кисню: 10^{16} атомів / cm^3
(метод CZ – 10^{18} атомів/ $\text{cm}^3 = 20$ ppm)



недолік методу FZ
– обмежений діаметр кристалів

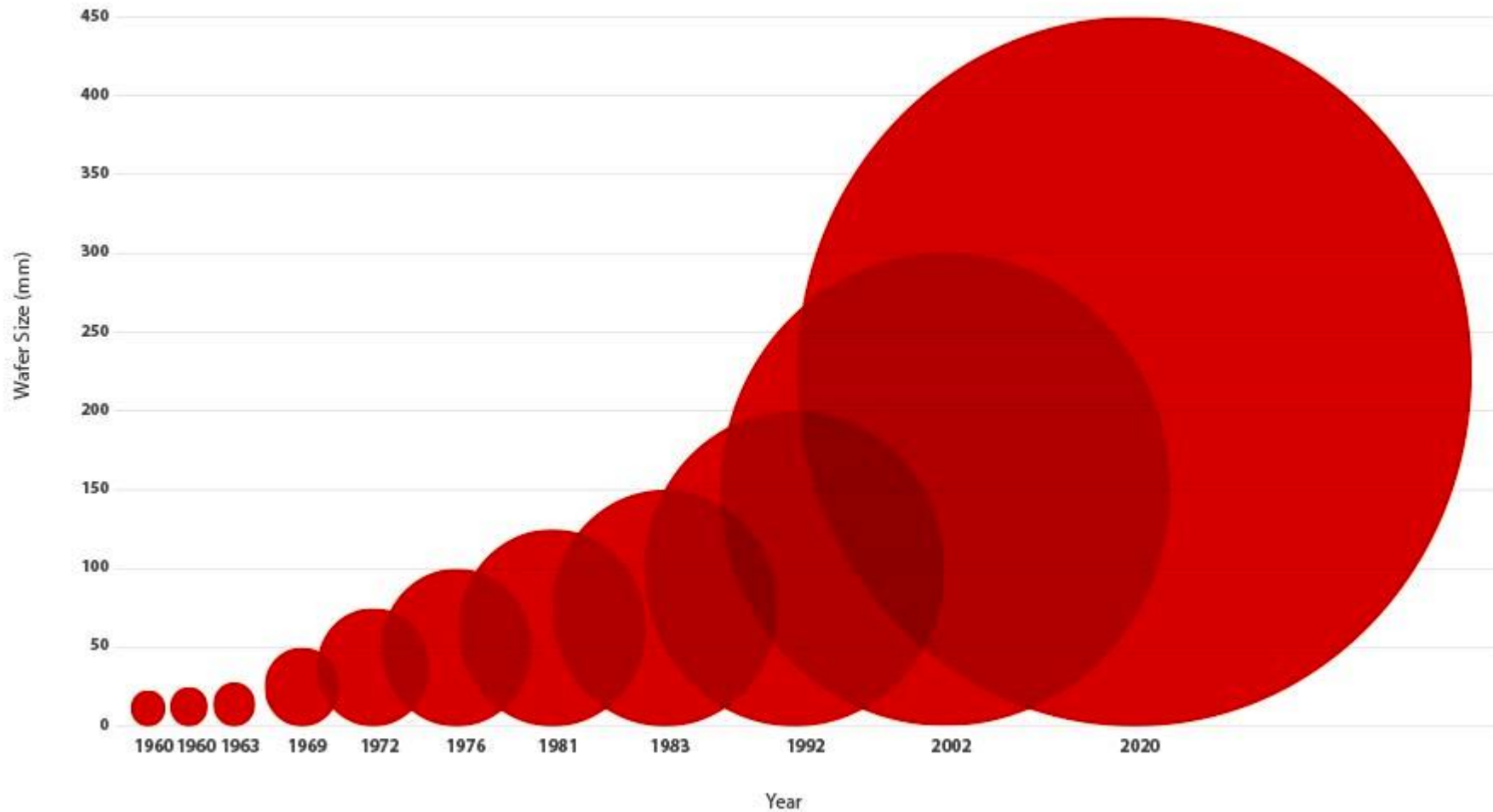


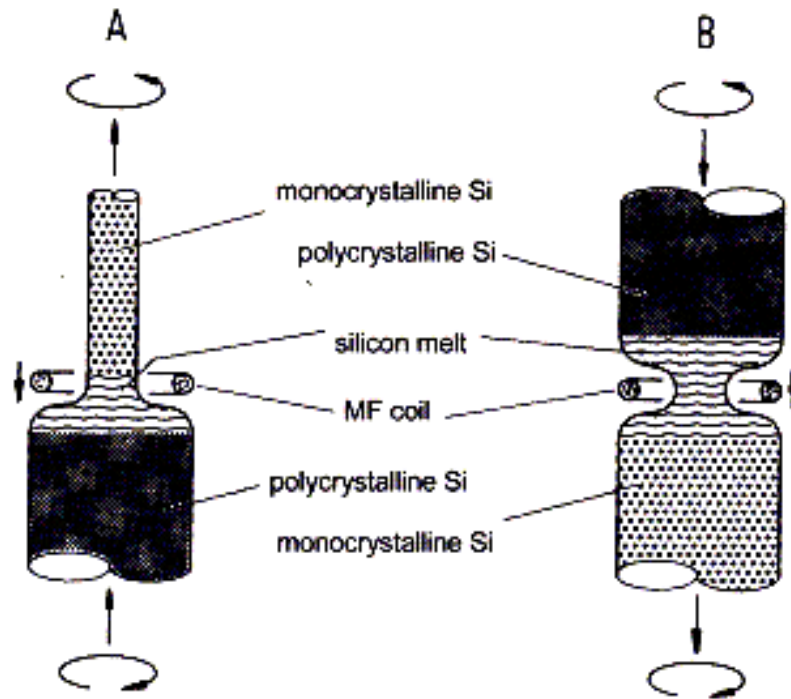
88 die
200-mm wafer

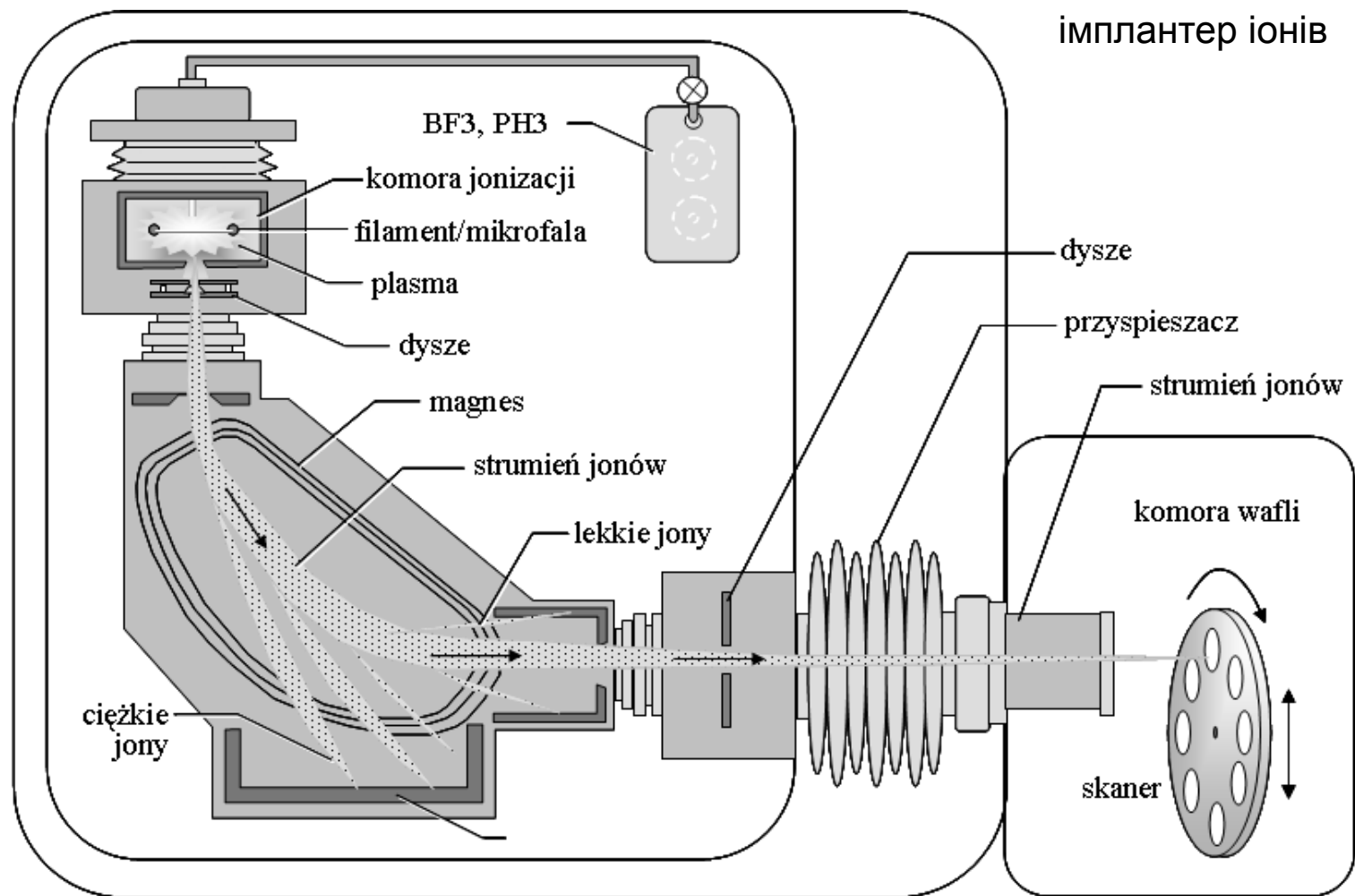


232 die
300-mm wafer

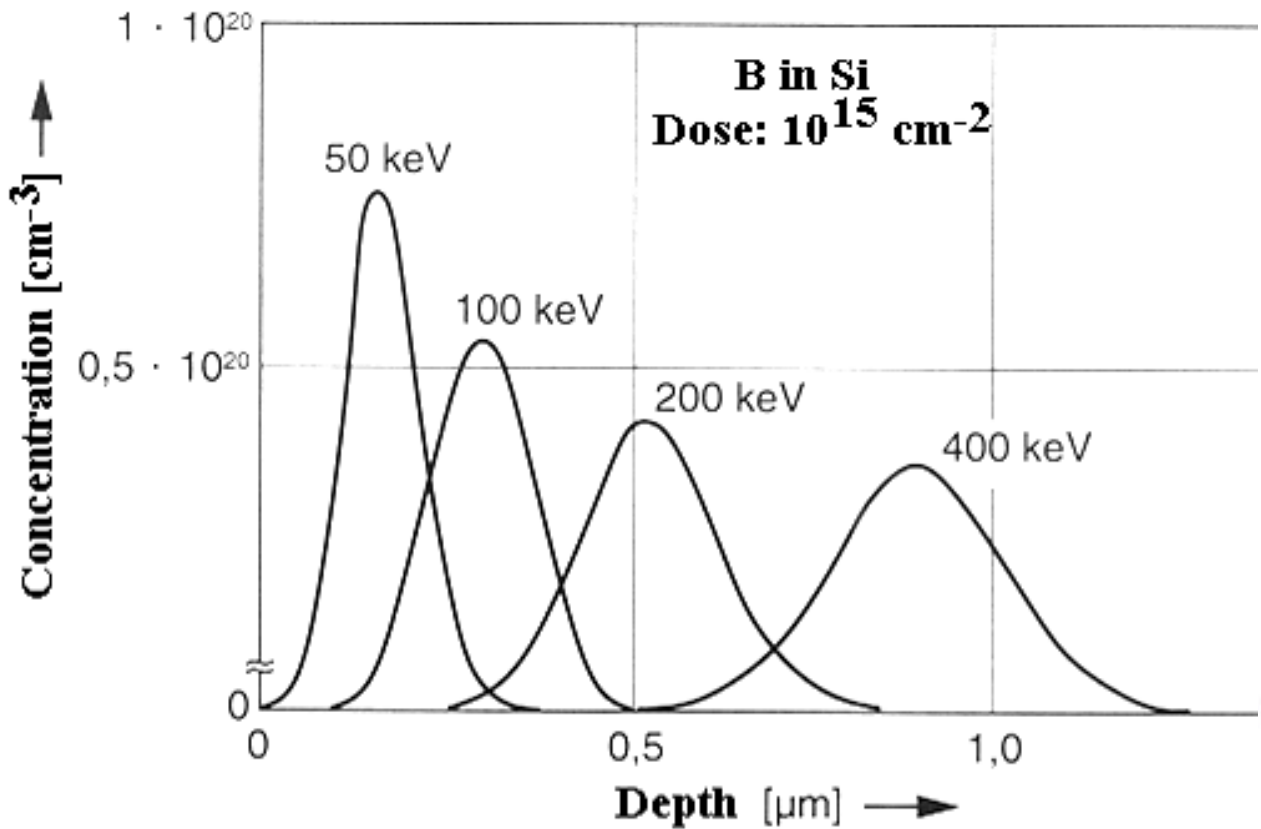
більший діаметр → менші виробничі витрати (до 30%)







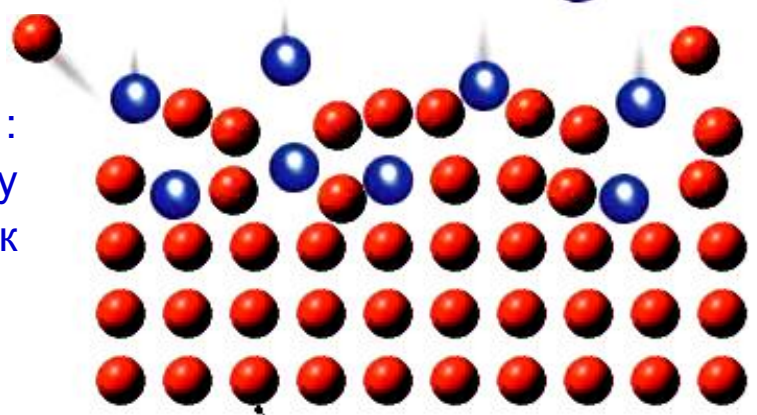
імплантер іонів



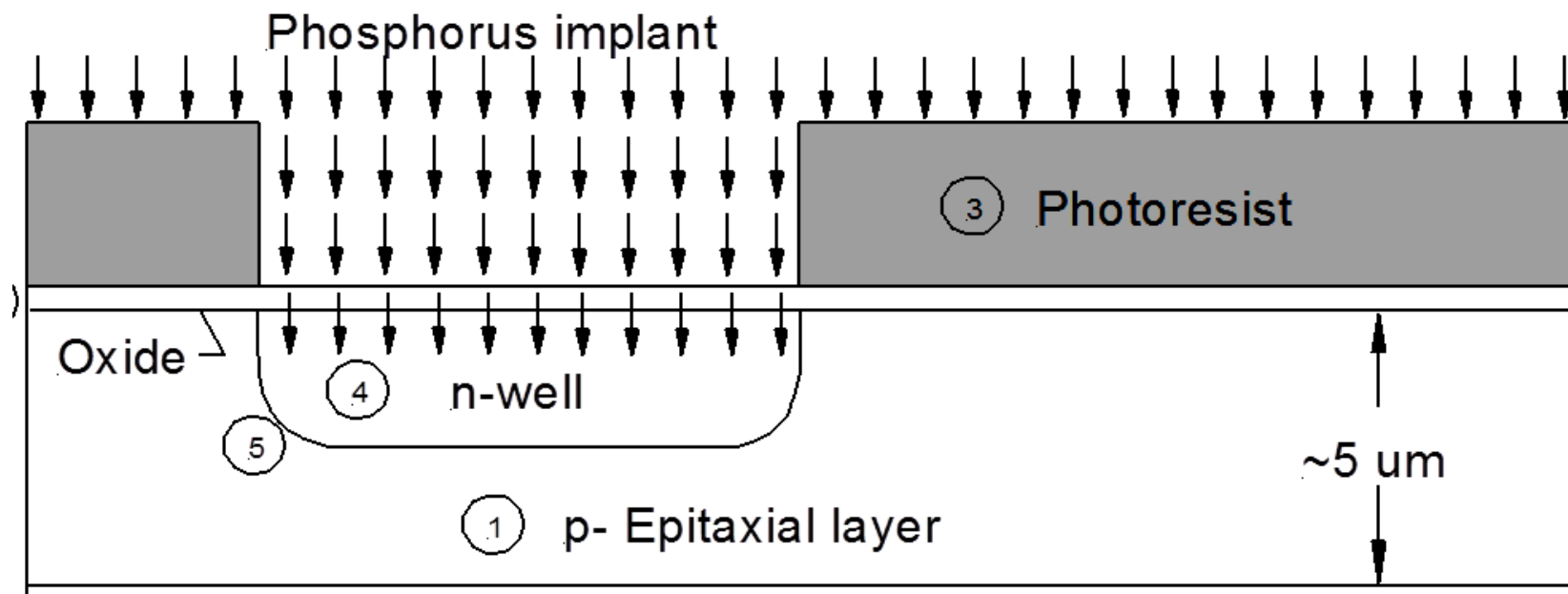
Implanted ions

відпалювання (600-900 °C, ~30 хв) :

- відновлення аморфізованого шару
- вбудовування атомів домішок



формування контактів транзистора:
Імплантація іонів через віконце в шарі фоторезисту





- + різноманітні домішки
- + точне дозування
- + повторюваність
- + низька температура процесу



- низька продуктивність
- безпека праці