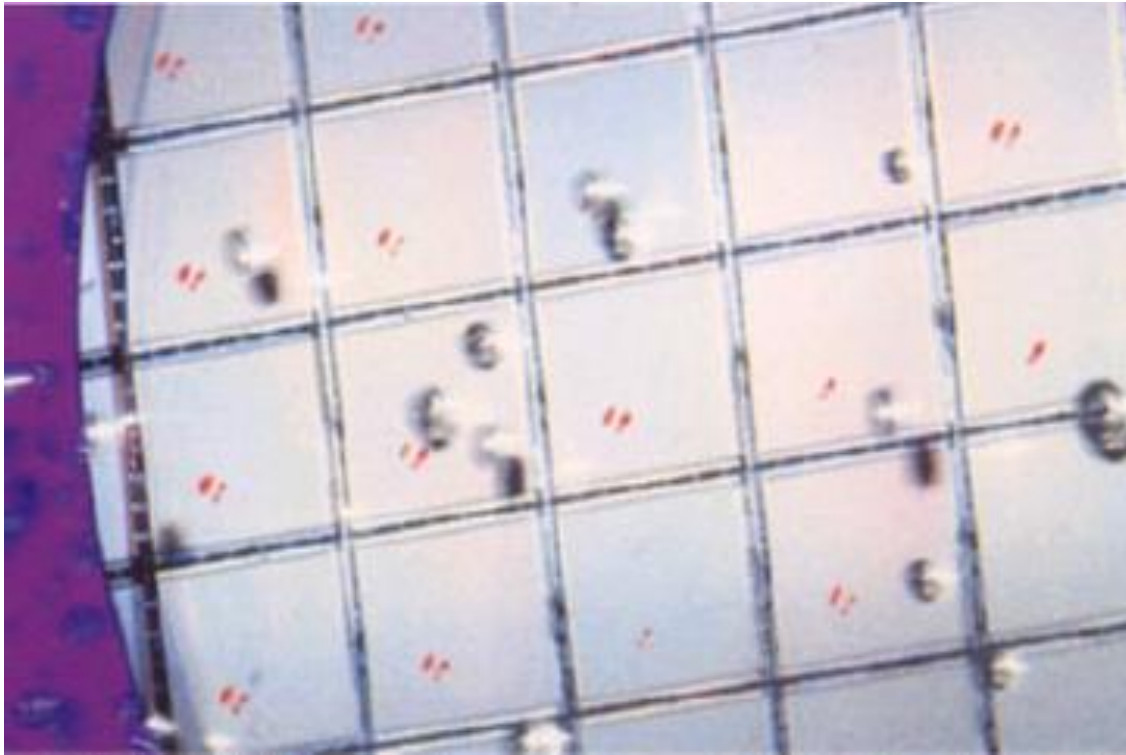


# **виробництво монокристалів**

чистота приміщень має важливе значення



розміри елементів в технології 500 нм:

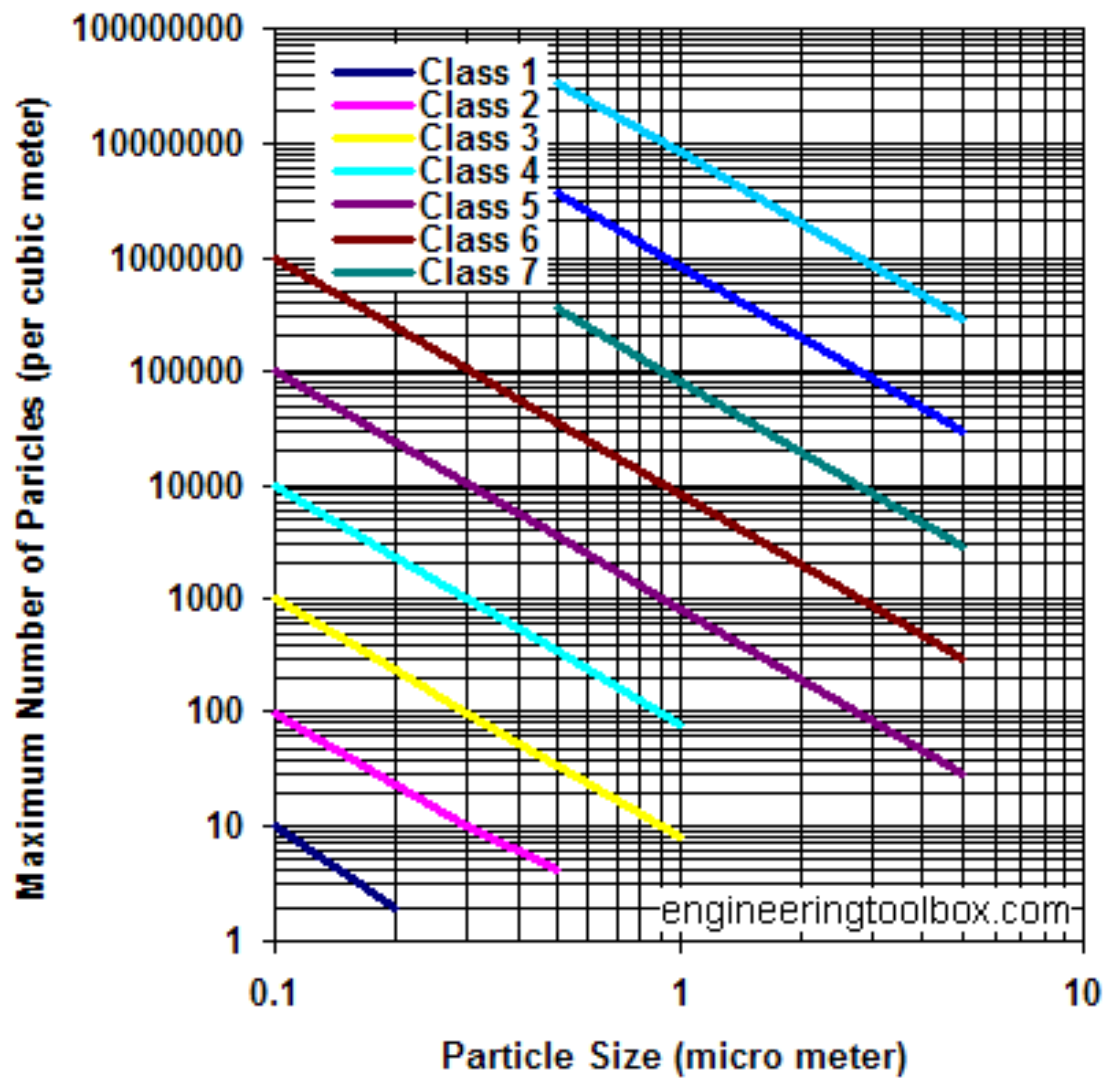
- горизонтальні елементи – 500 нм допуск  $\pm 150$  нм
- товщина оксидного шару – 10-20 нм
- ширина провідників – 150 нм

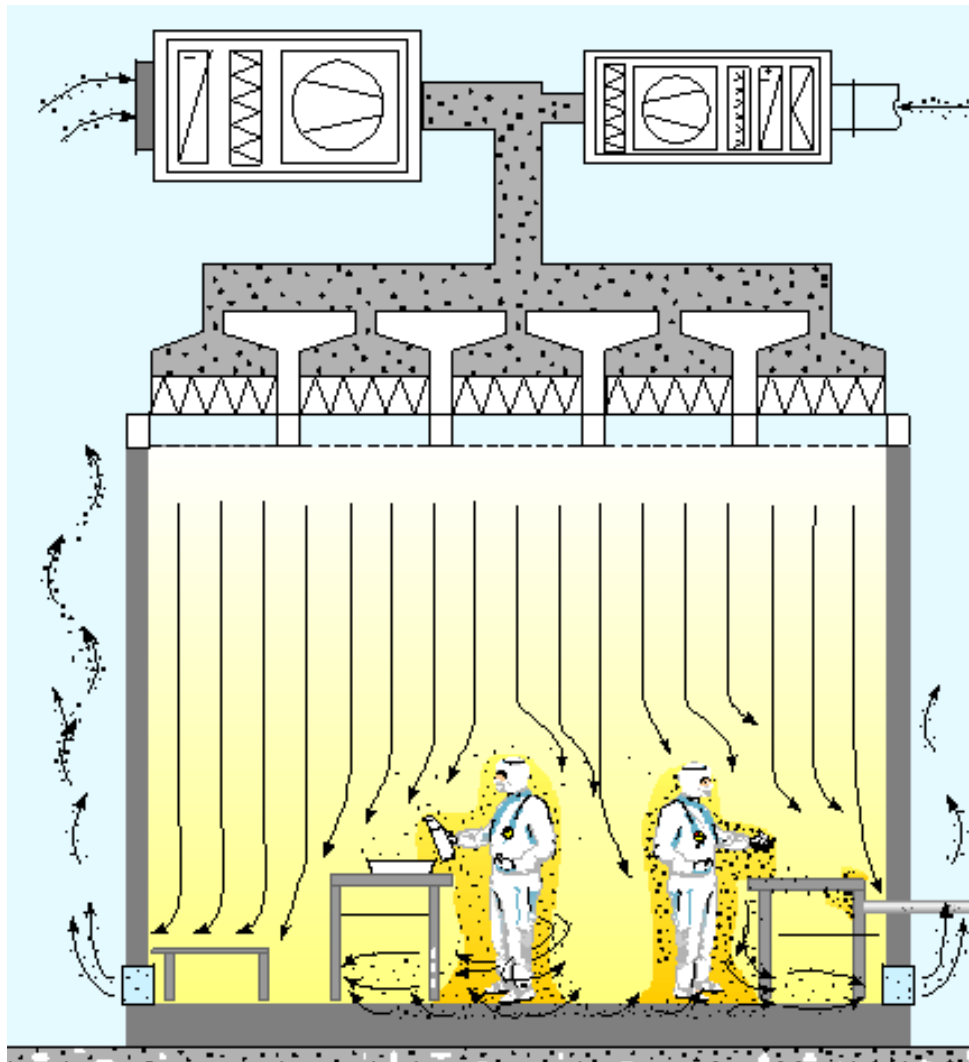
**клас приміщення: ISO 14644-1 "Classification of Air Cleanliness"**

$$C_n = 10^N (0.1 / D)^{2.08}$$

- **N** = клас (число від 0,1 до 9)
- **C<sub>n</sub>** = максимально допустима кількість частинок на м<sup>3</sup>  
розміри рівні або більші ніж D

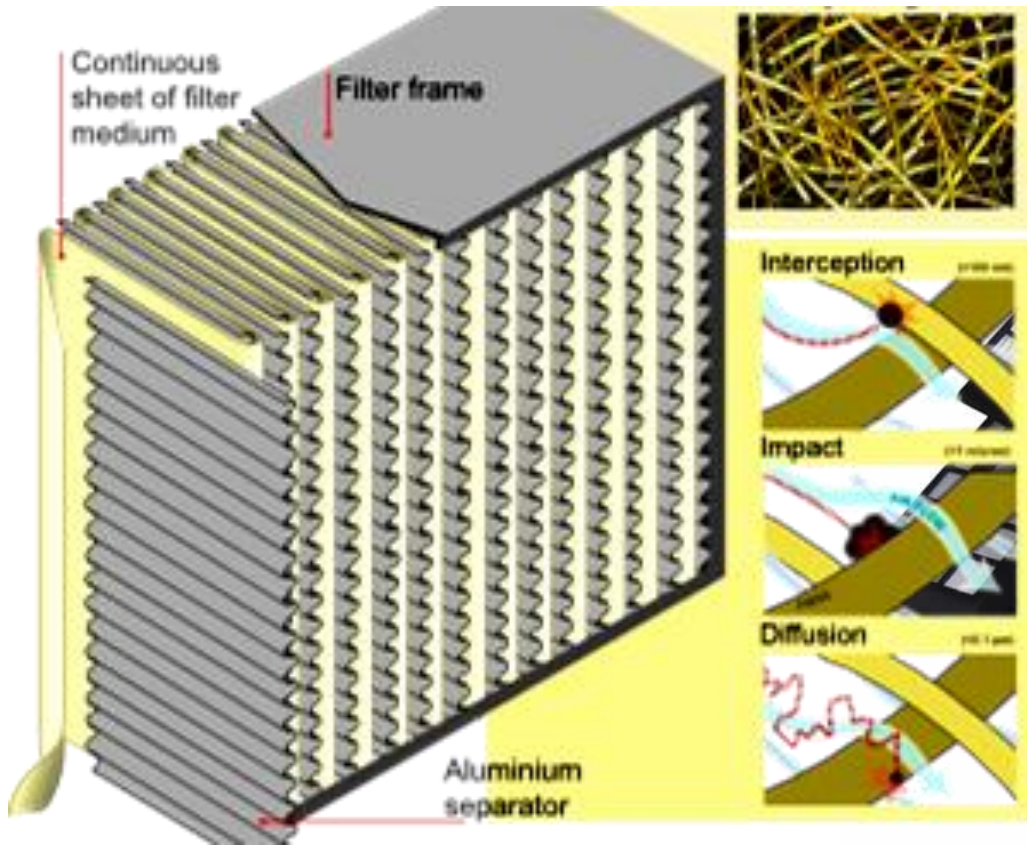
максимальна кількість частинок на кубічний метр						
клас	0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	1 μm	5 μm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1 000	237	102	35	8	
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293





повітря входить через систему фільтрів

утримується підвищений тиск – запобігає проникненню частинок пилу



**HEPA =**  
*High Efficiency Particulate Air filter*



апаратура виробнича: нержавіюча сталь, алюміній, ПТФЕ

заборонено використовувати: папір, дерево, натуральні тканини

обмежений вхід працівників  
строгі правила поведінки







вхід і вихід – через повітряний шлюз

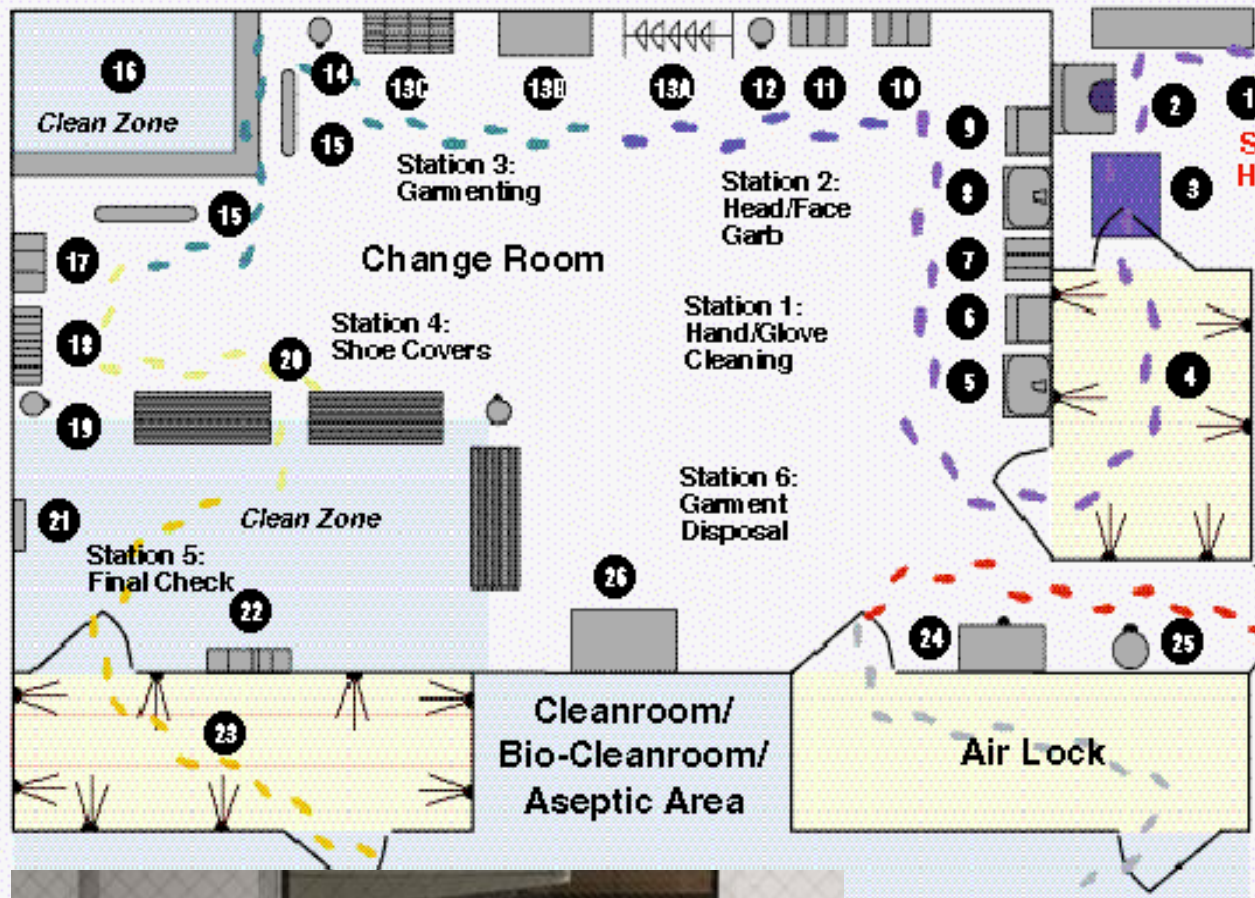




передача матеріалів  
– через шлюзи

**cleanroom'и компонують послідовно  
відповідно до класу приміщення**





1. шапка
2. щітка для взуття
3. адгезійний мат
- 4, 23. повітряний душ
5. безконтактна мийка рук
6. сушарка
7. одноразові рукавички
10. одноразові шапки
11. одноразові маски
- 12, 14, 19, 25. смітник
13. одноразові комбінезони
15. поручні
16. кімната перевдягання
17. одноразові рушники
18. одноразове взуття
20. лавка для перевзування
21. контрольне дзеркало
22. одноразові окуляри
24. використані комбінезони
26. допоміжні інструменти



**послідовність вдягання:**  
**бахили – сітка на волосся –**  
**рукавиці – комбінезон –**  
**взуття – капюшон – маска –**  
**окуляри – чисті рукавиці**

- вода: (апаратура ПВДФ) мікрофільтр ( $>0,1\text{ мкм}$ )  $\rightarrow$  ультрафільтр ( $>20\text{ \AA}$ )  $\rightarrow$  зворотній осмос ( $>1\text{ \AA}$ )  $\rightarrow$  іонний обмін
- питомий опір  $18\text{ М}\Omega\cdot\text{см}$ ;  $< 200$  частинок/л ( $0,3\text{ мкм}$ );
- органіка  $< 5\text{ ppb}$ ;
- розчинений кисень  $< 20\text{ ppm}$ ;
- важкі метали  $< 1\text{ ppb}$

**процедура RCA** (Radio Corporation of America, Werner Kern, 1965)

1. **усування органічних** (+ Cu, Ag, Cd):



2. **усування оксидного шару:**



3. **усування іонних** (+Ni, Cu, Ag, Au):



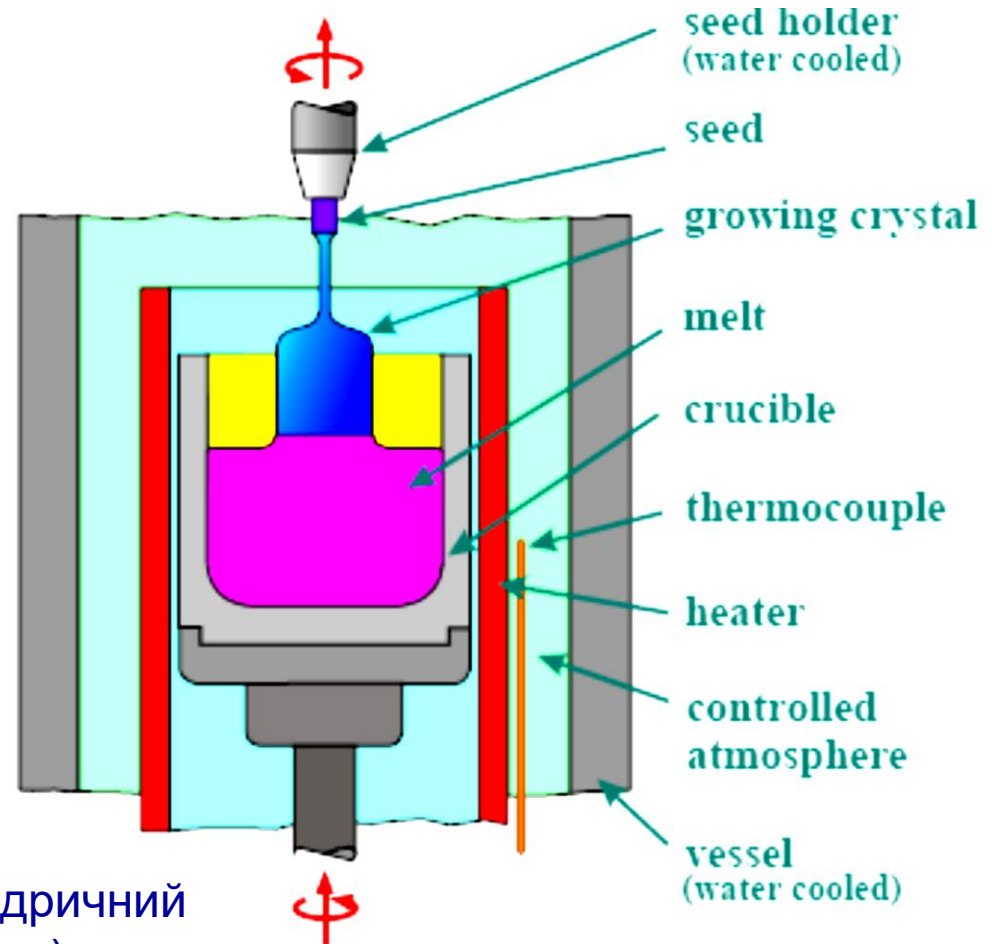
метод Чохральського = витягування кристалу з розплаву

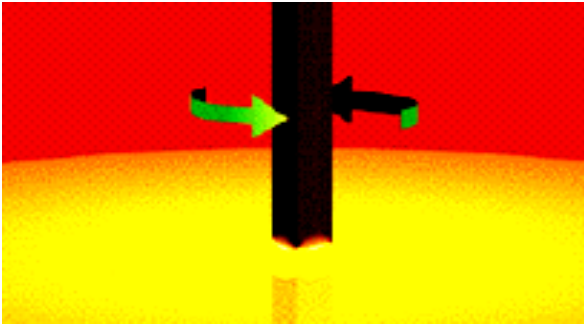
перевага:

**немає контакту з тиглем**

→ міні механічних дефектів

- температура 1412 °C
- тигель  $\text{SiO}_2$  (~ стійкий)
- продування Ar ( $\text{SiO}$ )
- обертання тигля 10-15 хв<sup>-1</sup>
- тип поверхні (100)
- обертання кристалу → циліндричний
- витягування 1-5 мм/хв (діаметр)





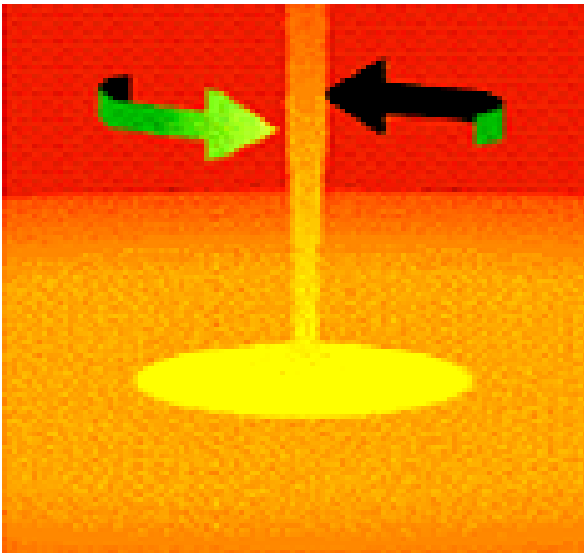
**зародковий кристал**

поверхня (100) або (111)

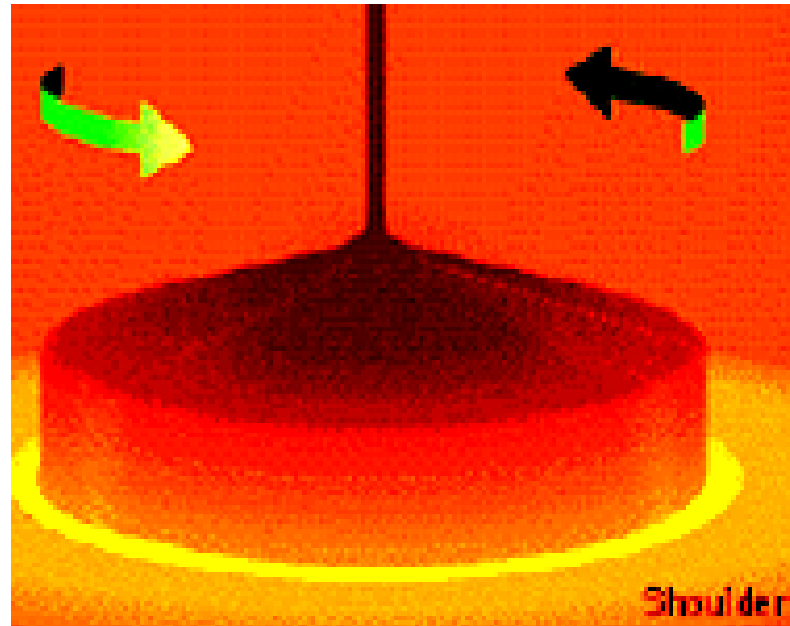
термічний шок → дефекти

**швидке витягування шийки** → мінімум дефектів  
(швидкість висока + зростає)

**швидкість зменшується** – діаметр зростає



**витягування кристалу  
сталого діаметра**



сегрегація доішок під час кристалізації:

- додаткове очищення
- **нерівномірний розподіл домішок** вздовж кристалу

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

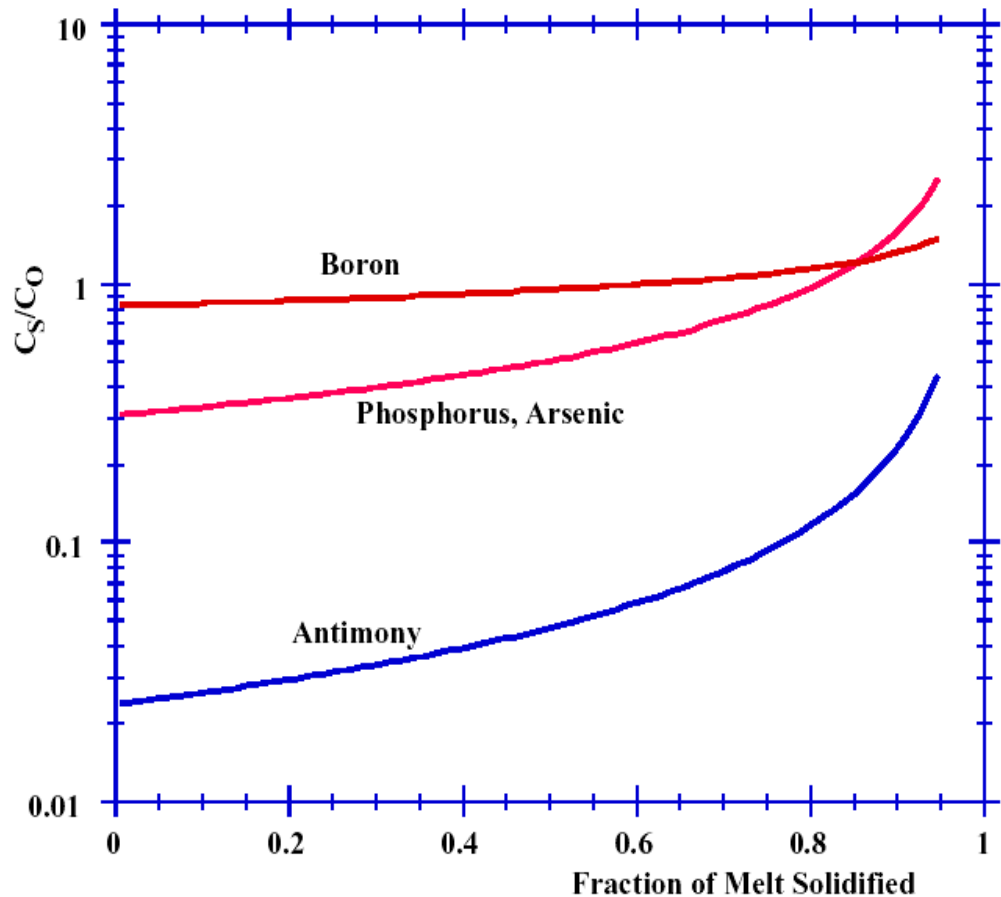
$$C_s = k \cdot C_o \cdot (1 - x)^{k-1}$$

$x$  – ступінь кристалізації

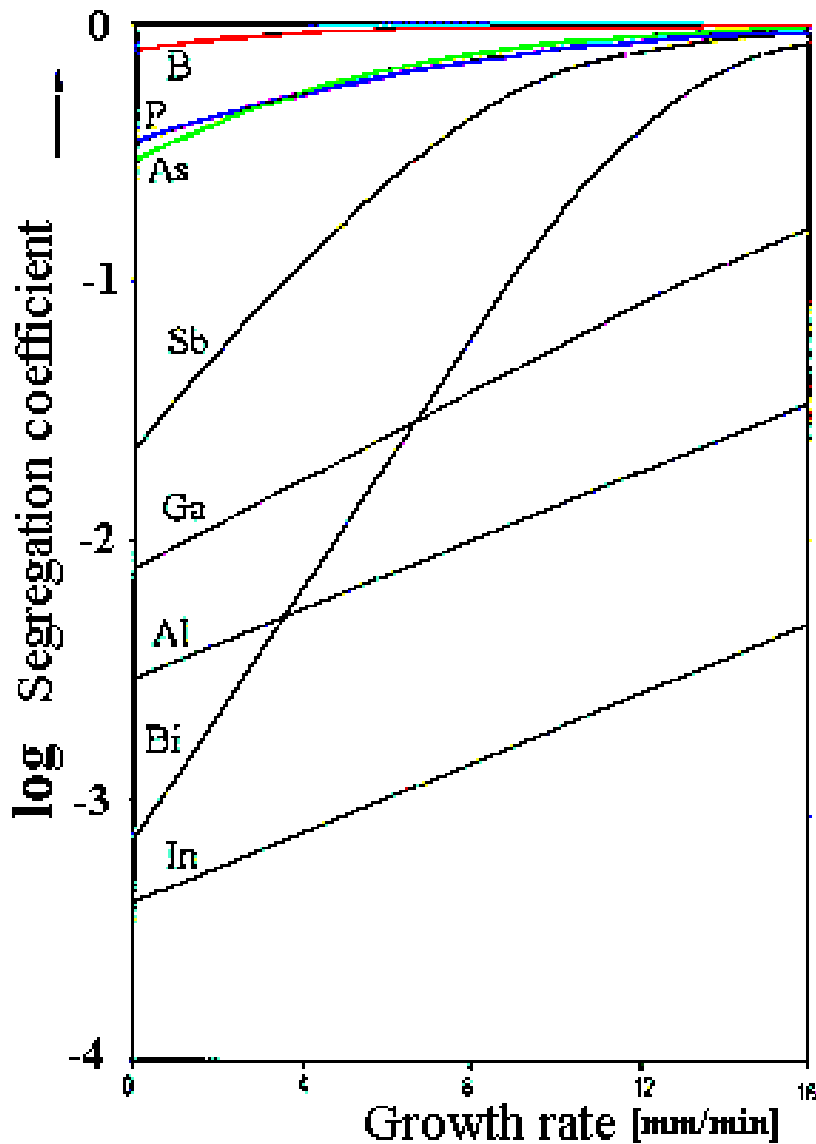
$C_o$  – початкова концентрація

$C_s$  – концентрація в кристалі

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







коєфіцієнт сегрегації  
залежить від швидкості  
витягання

мала швидкість –  
мін концентрація домішок

велика швидкість –  
мін розчиненого кисню

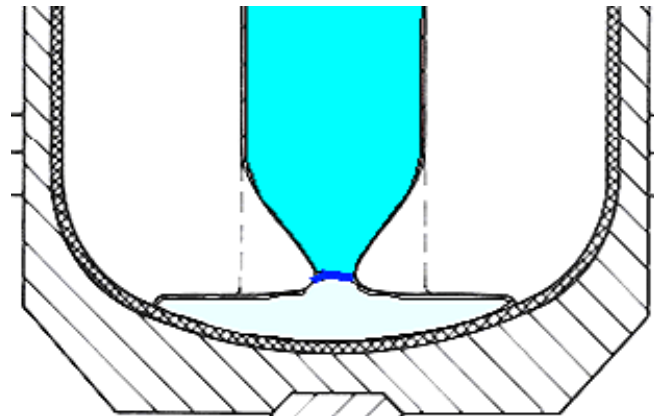


верхня частина кристалу містить мало домішок → переплавка

монокристал розрізають на плитки („wafers”)

**концентрація домішок різна** →  
відрізняється провідність →  
відрізняються параметри чипів

кінцівка кристалу CZ  
тах домішок → очищення





$\text{SiO}_2$  розчиняється в розплавленому Si →

- одноразові тиглі
- **кварц високої чистоти !**
- товщина стінки відповідна

**атомарний кисень розчинний в Si**

- зростає крихкість
- надмір кисню → оксидні кластери (gettering)

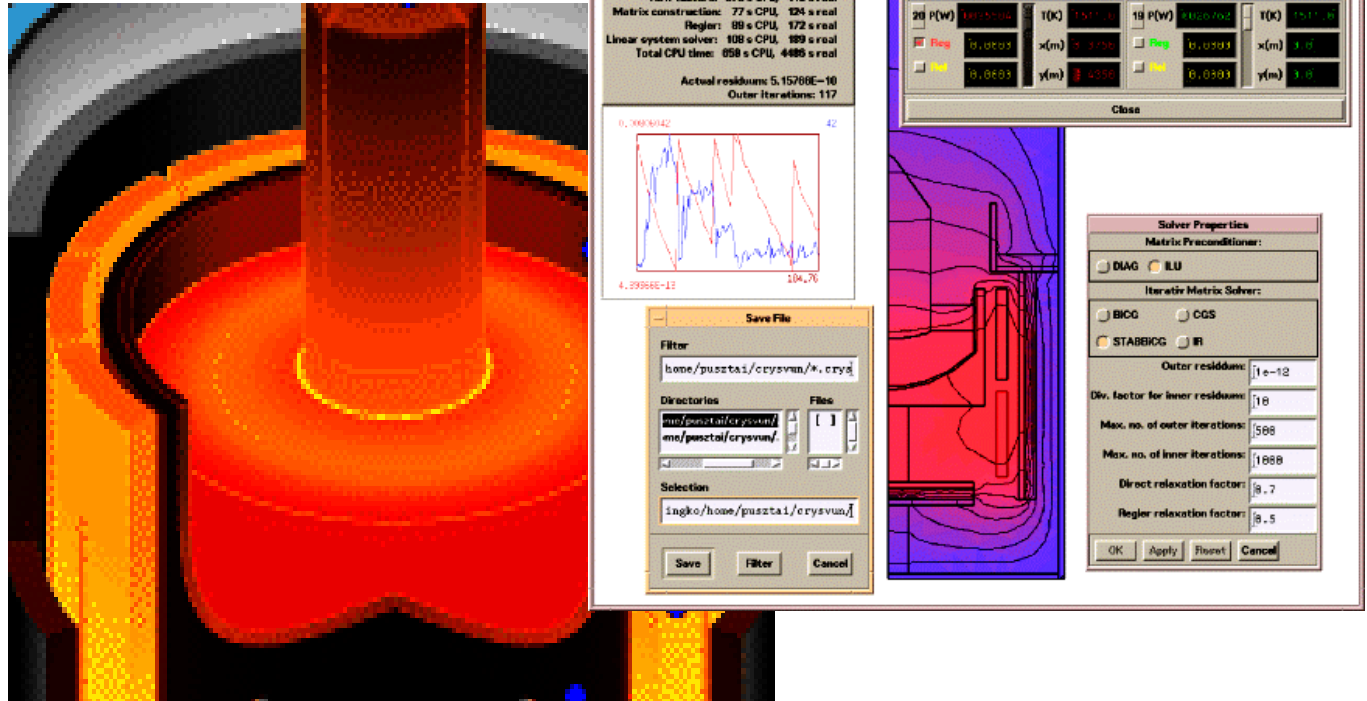
**відносно великий вміст кисню  
= вада методу CZ**

мінімалізація градієнту O → обертання тигля →  
швидше розчинення кварцу →  
**оптимальне** обертання (+ ел.магн. поле)



занурення кристалу → змінний градієнт температури  
→ постійна зміна технологічних параметрів:

- швидкість обертання
- підведення тепла
- швидкість витягання кристалу
- інтенсивність перемішування



поле високої частоти – більш точна регуляція нагрівання



пуллер промисловий

~ 90% виробництва EG-Si

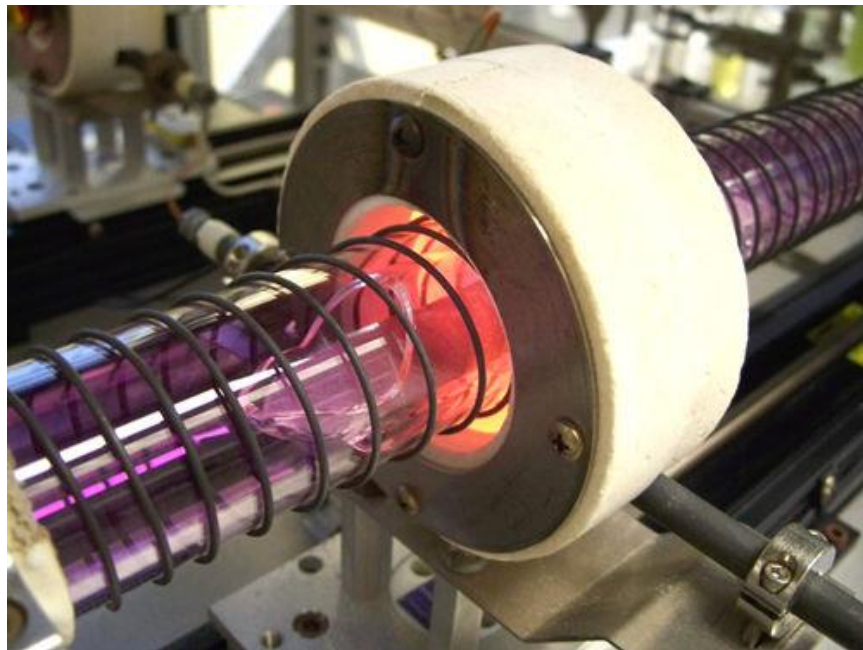
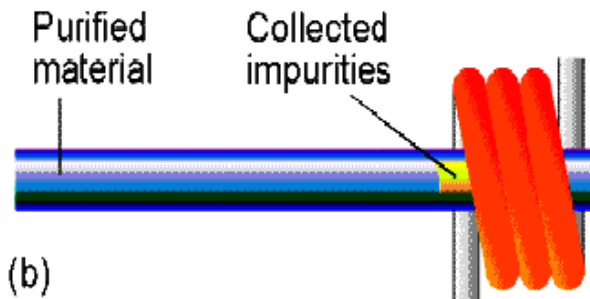
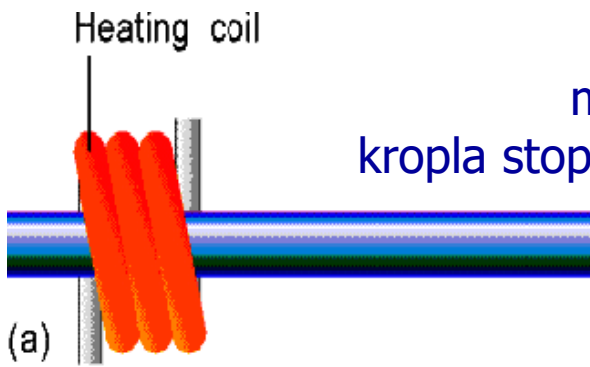
перевага методу CZ:  
діаметр кристалів = 30-40 см  
(+ довжина = 1,5-2 м)

універсальність →

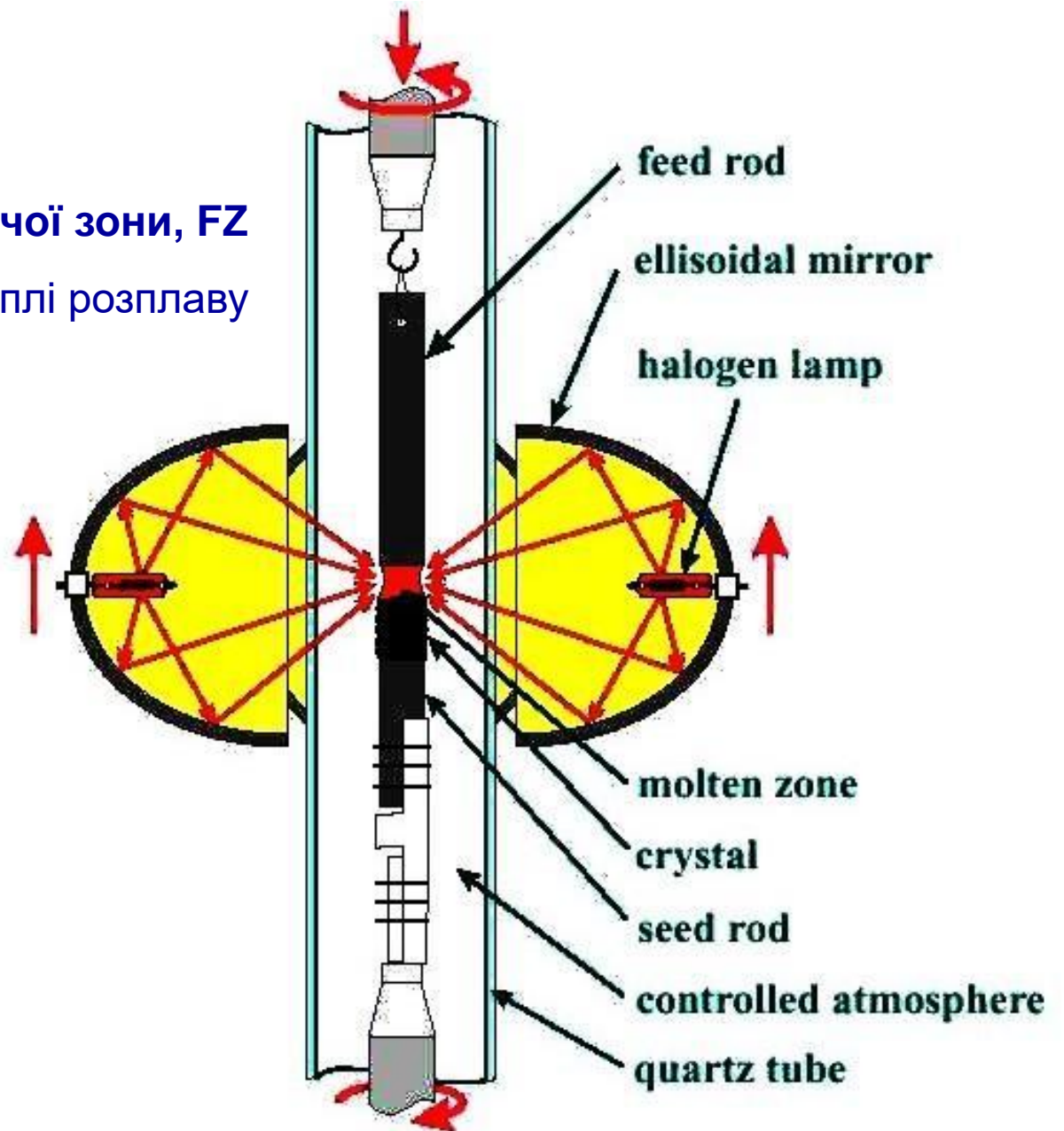
- Si, Ge, GaAs, GaN
- CsI, KBr, CaF<sub>2</sub>
- LiNbO<sub>3</sub>, YAlO<sub>3</sub>



metoda **przetapiania strefowego** (Zone Melting, ) –  
kropla stopu przesuwa się wzdłuż kryształu (W.G.Pfann, 1952 r.)

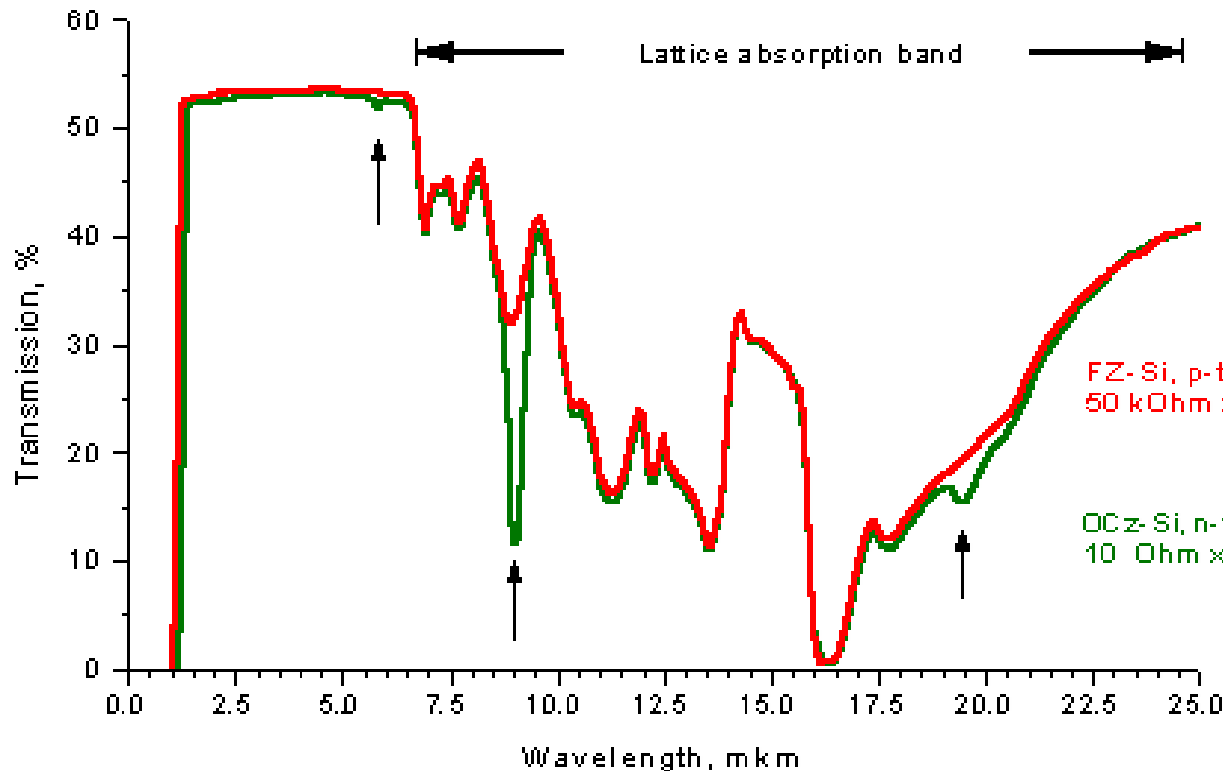


**метод плаваючої зони, FZ**  
перекристалізація в краплі розплаву



переваги методу FZ: немає тигля → краща чистота  
рівномірне розміщення легуючих домішок

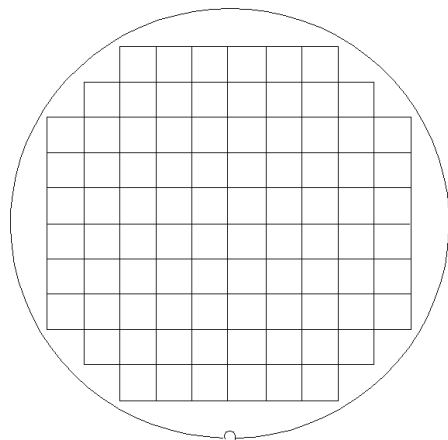
(метод CZ –  $10^{18}$  атомів/см<sup>3</sup> = 20 ppm)



max питомий опір

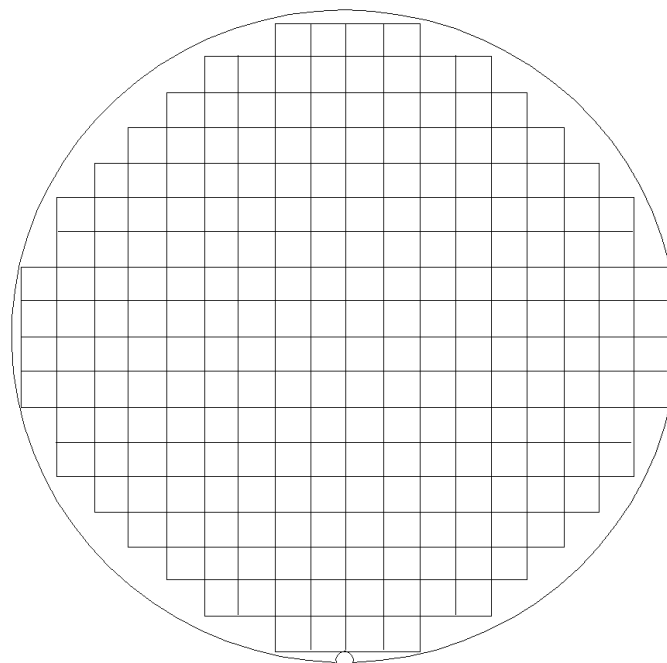
> міцність  
кластери → gettering





**88 die**

200-mm wafer



**232 die**

300-mm wafer

**більший діаметр кристалів CZ**

**більше чіпів в одному технологічному циклі**

## удосконалення методу плаваючої зони

