

Najważniejsze wymagania stawiane materiałom półprzewodnikowym:

- mała szerokość pasma zabronionego,
- łatwość wprowadzania domieszek,
- rezystywności po domieszkowaniu w zakresie  $10^{-5} \dots 10 \Omega\text{m}$ ,
- energia wzbudzenia atomów domieszek  $0,01 \dots 0,05 \text{ eV}$ ,
- duża ruchliwość i długi czas życia nośników ładunku,
- możliwość uzyskania materiału o odpowiedniej czystości,
- niski koszt uzyskiwania struktury monokrystalicznej,
- trwałość chemiczna i dobre własności mechaniczne.

W półprzewodnikach samoistnych czas życia nośników jest tym krótszy, im mniejsza jest szerokość przerwy energetycznej i im wyższa jest temperatura.

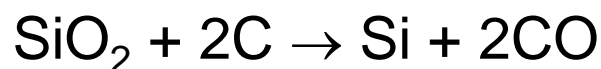
W półprzewodnikach bardzo czystych czas życia jest rzędu  $10^{-3} \text{ s}$ .

## Krzem

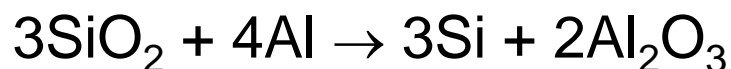
- symbol chemiczny: Si (Silicium), pierwiastek półmetaliczny,
- liczba atomowa 14, masa atomowa 28,086,
- Si krystaliczny jest szary, twardy i kruchy,
- topi się w temperaturze 1420 °C,
- 27% masy skorupy ziemskiej (drugie miejsce po tlenie),
- występuje w postaci związków, głównie glinokrzemianów, krzemianów i krzemionki SiO<sub>2</sub>,
- spełnia w znacznym stopniu wymagania stawiane materiałom półprzewodnikowym.

### Otrzymywanie krzemu

- redukcja SiO<sub>2</sub> węglem, aluminium lub magnezem,
- redukcja węglem wymaga dostarczenia dużej ilości ciepła,
- reakcja redukcji węglem:



- redukcja SiO<sub>2</sub> aluminium jest reakcją egzotermiczną:



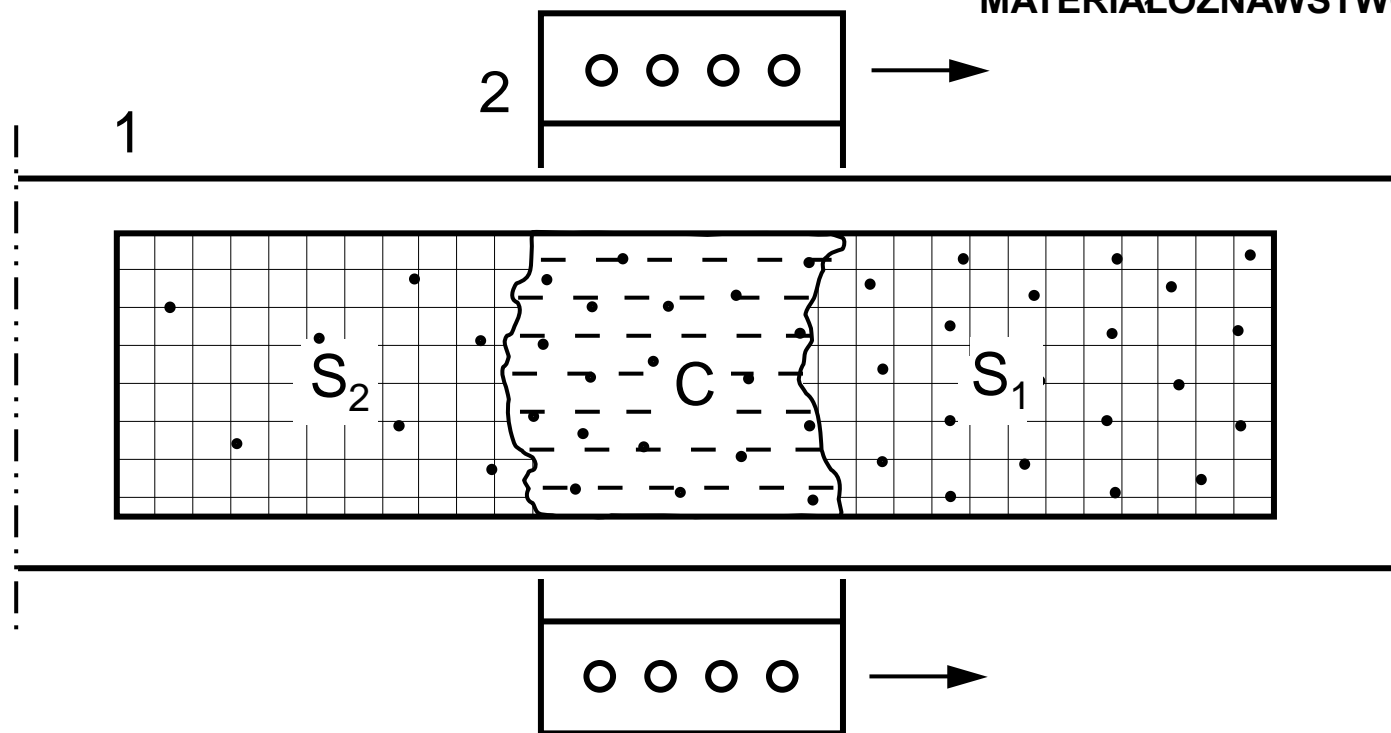
- uzyskuje się krzem o czystości zaledwie 98...99%.

## Oczyszczanie krzemu metalurgicznego

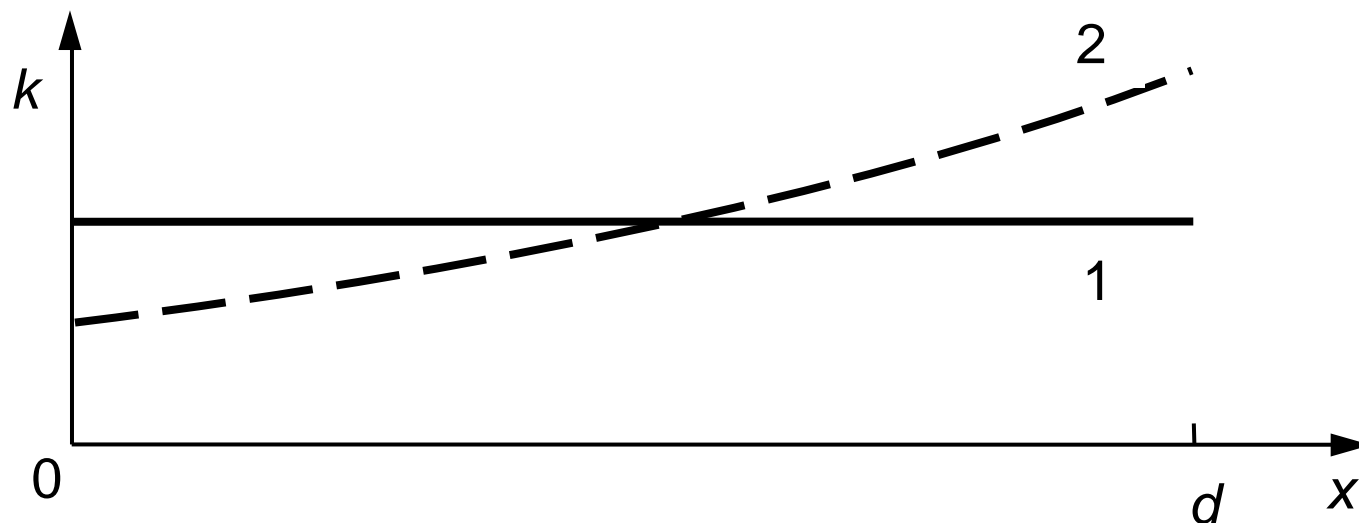
- wymaganie: nie więcej niż 1 atom zanieczyszczenia na  $10^9 \dots 10^{11}$  atomów półprzewodnika podstawowego,
- wstępne oczyszczanie metodami fizycznymi i chemicznymi.

### Oczyszczanie właściwe - technologia topienia strefowego:

- rozpuszczalność zanieczyszczeń w krzemie jest większa w stanie ciekłym niż w stanie stałym,
- stosuje się kierunkową krystalizację materiału półprzewodnikowego,
- zanieczyszczenia przemieszczane są w kierunku fazy ciekłej,
- gęstość zanieczyszczeń jest większa przed a mniejsza za granicą krystalizacji,
- zanieczyszczenia są przesuwane z jednego końca próbki materiału na drugi, zgodnie z kierunkiem krystalizacji,
- kilkakrotne powtórzenie procesu topienia strefowego powoduje przesunięcie większości zanieczyszczeń do końca próbki.



Oczyszczanie materiału półprzewodnikowego metodą topienia strefowego: 1 - rura kwarcowa, 2 - nagrzewnica indukcyjna; strefy materiału:  $S_1$  - przed stopieniem,  $C$  - stopionego,  $S_2$  - po krystalizacji kierunkowej;  $\cdot$  - cząstka zanieczyszczenia



Rozkład stężenia zanieczyszczeń  $k$  wzdłuż wałka materiału półprzewodnika o długości  $d$ : 1 - przed topieniem, 2 - po pierwszym topieniu (krystalizacji kierunkowej)

## Otrzymywanie monokryształów

### Monokrystaliczny krzem

To dominujący materiał na małogabarytowe elementy i przyrządy półprzewodnikowe (diody, tranzystory, tyrystory, układy scalone).

### Polikrystaliczne materiały elementarne i złożone

Ziarna krystaliczne o wymiarach od mikrometrów do milimetrów na elementy półprzewodnikowe:

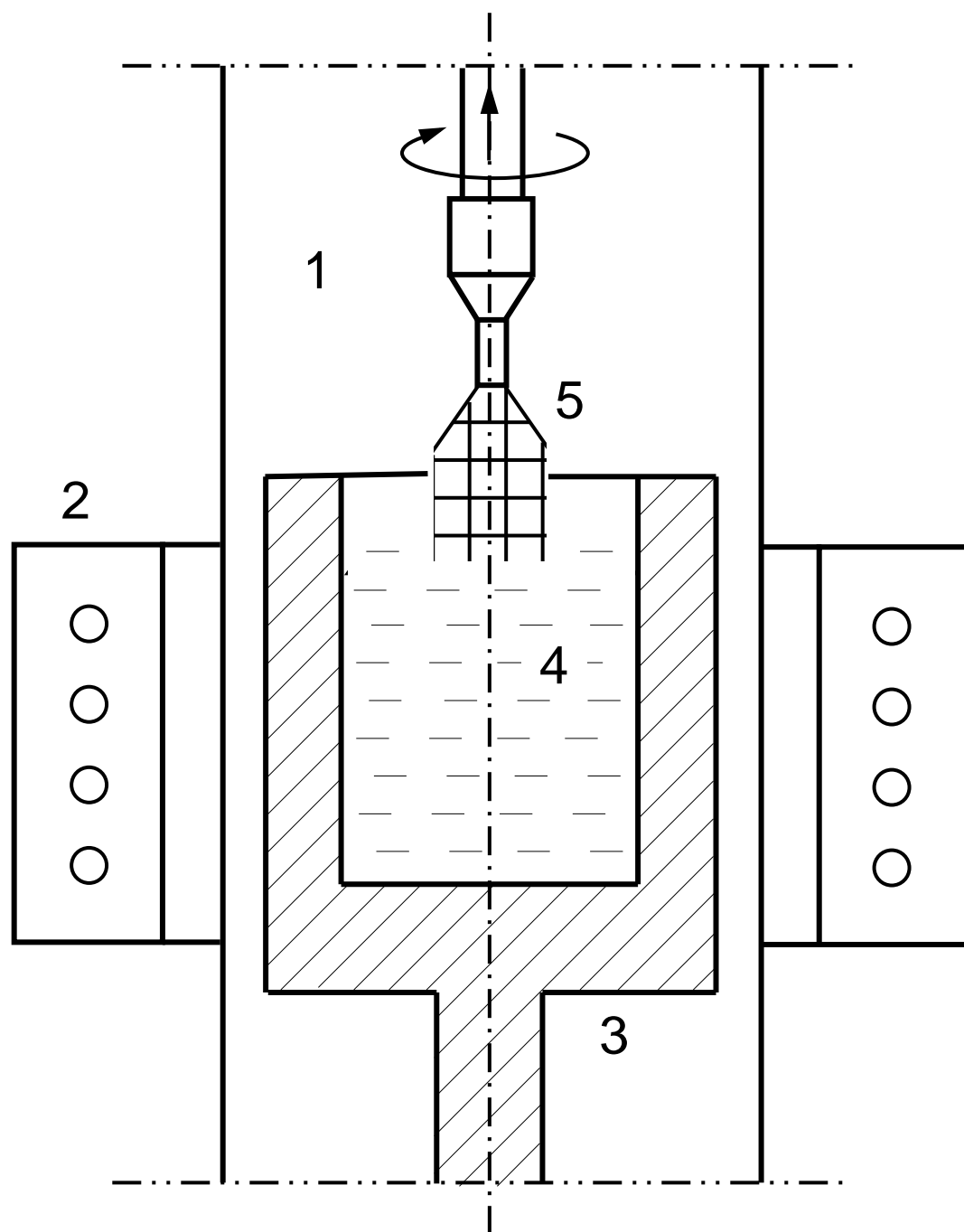
- o dużej objętości (ogniwa termoelektryczne, warystory, termistory),
- o dużej powierzchni (ogniwa fotoelektryczne, fotorezystory).

### ***Monokrysztalizacja***

- proces wzrostu kryształu począwszy od jednego zarodka,
- monokryształ cechuje się ciągłością i zachowaniem jednej orientacji sieci krystalicznej w całej objętości,
- dopuszczalne są niewielkie ilości zanieczyszczeń oraz defektów punktowych i dyslokacji.

## Wzrost kryształu półprzewodnika z jego stanu ciekłego

### Metoda Czochralskiego

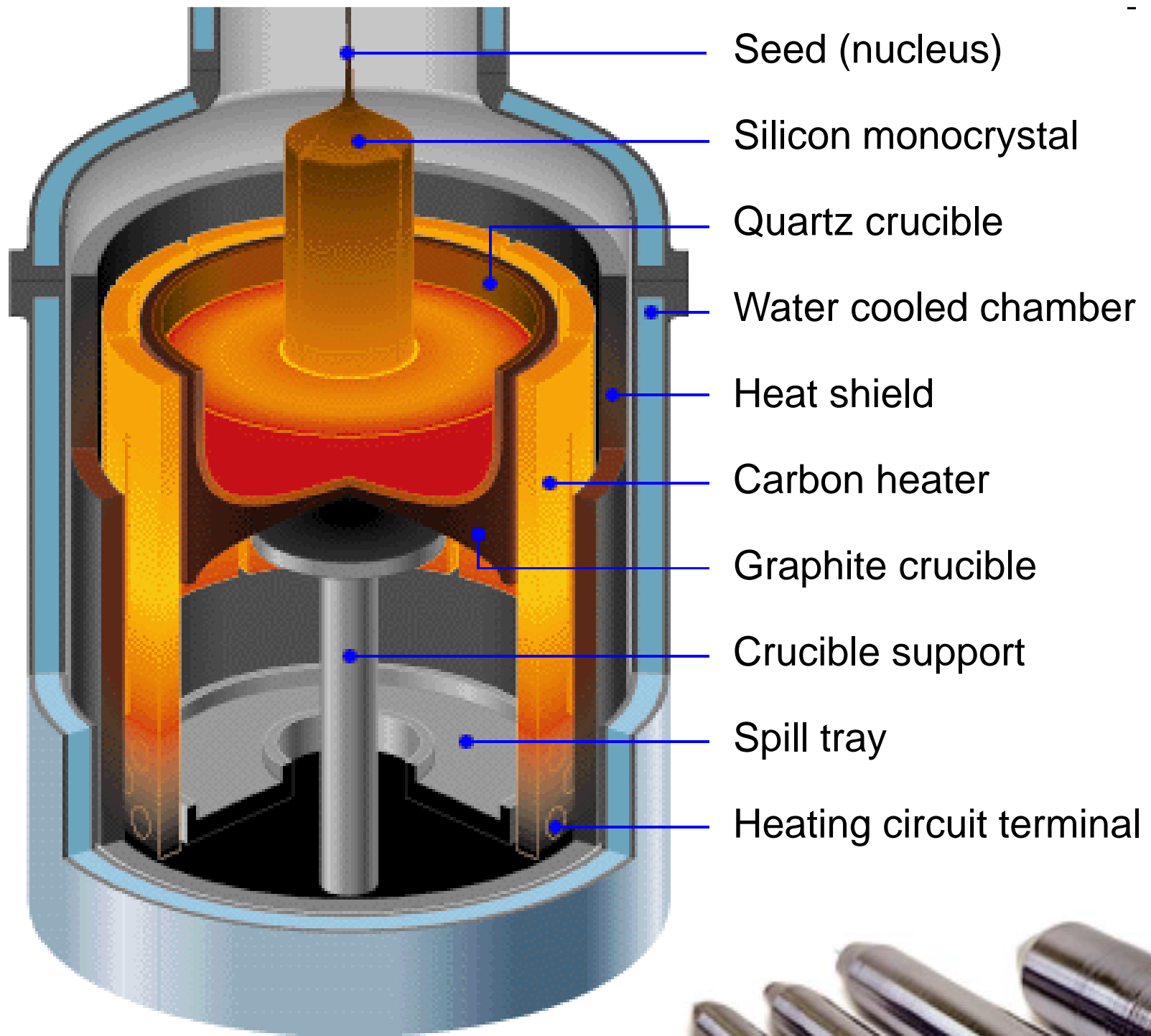


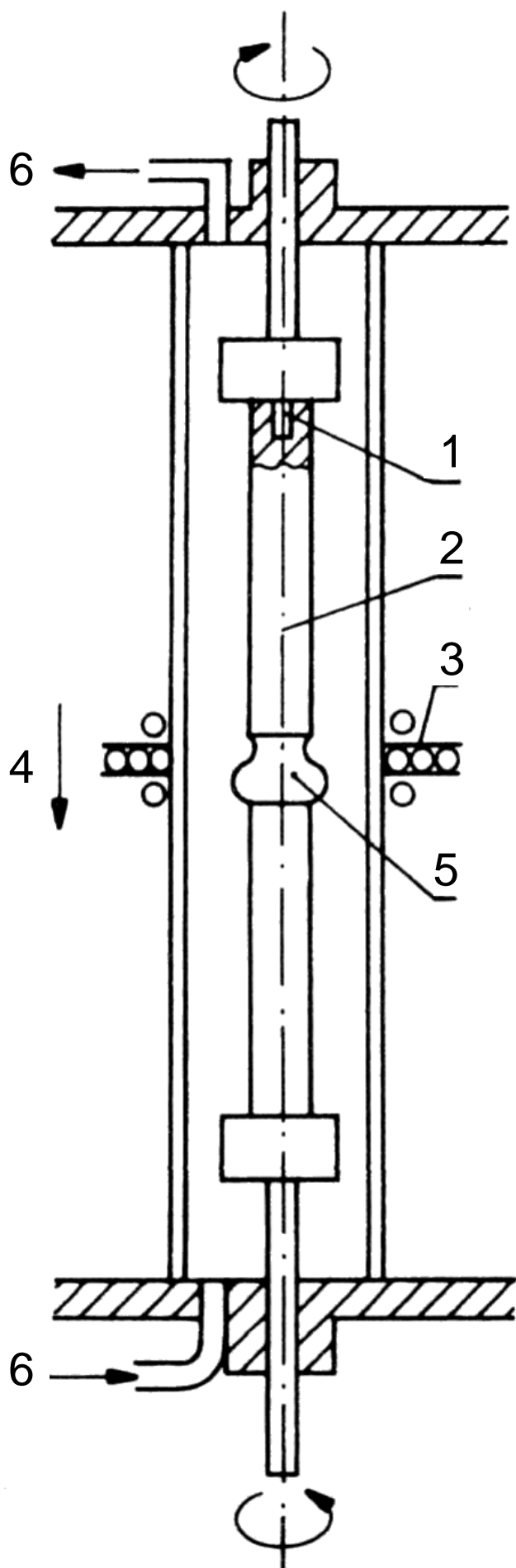
Gradient temperatury na granicy krystalizacji od 5 do 10 K·cm<sup>-1</sup>.

Prędkość wzrostu kryształu kilka lub kilkanaście centymetrów na godzinę.

Szkic fragmentu urządzenia do monokrystalizacji metodą Czochralskiego:

- 1 - komora próżniowa,
- 2 - nagrzewnica indukcyjna,
- 3 - tygiel z grafitu,
- 4 - półprzewodnik ciekły,
- 5 - narastający monokryształ.





### Metoda beztyglowa

- wałek polikrystalicznego materiału jest umocowany na obu końcach,
- w górnym końcu wałka jest zarodek krystalizacji (1),
- wałek znajduje się w osłonie, przez którą przepływa gaz obojętny (6),
- na osłonie znajduje się nagrzewnica indukcyjna (3),
- topi się cienka warstwa materiału, zaczynając od zarodka i przesuwa stopniowo w dół (5),
- nad warstwą stopioną narasta monokryształ (2).

Szkic metody beztyglowej:

- 1 - zarodek,
- 2 - krzem monokrystaliczny,
- 3 - nagrzewnica indukcyjna,
- 4 - przesuw strefy grzania,
- 5 - faza ciekła krzemu,
- 6 - wlot i wylot gazu obojętnego.



## Domieszkowanie

Najczęściej stosowane domieszki w półprzewodnikach Si:

- fosfor P - do otrzymywania warstw typu  $n$ ,
- bor B - do otrzymywania warstw typu  $p$ .

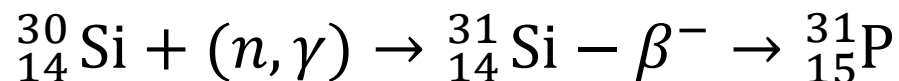
### ***Domieszkowanie całego materiału pierwszą domieszką***

Dodawanie domieszki w stanie ciekłym (metoda, prosta, nieprecyzyjna i tania):

- dodaje się domieszkę do fazy ciekłej przed monokrystalizacją,
- nie zapewnia jednorodności rozmieszczenia atomów domieszki.

Metoda transmutacji (domieszkowanie całego wałka Si):

- napromieniowanie strumieniem neutronów w reaktorze jądrowym,
- przemiana jądrowa (transmutacja) atomów izotopu krzemu o liczbie masowej 30 w stabilny fosfor o liczbie masowej 31:



- zapewnia bardzo dużą jednorodność rozmieszczenia domieszki,
- metoda droga, ale coraz częściej stosowana.

## ***Domieszkowanie cienkiej warstwy materiału drugą domieszką***

Domieszkowanie przez dyfuzję z fazy gazowej lub ciekłej (metoda prosta, nieprecyzyjna i tania):

- stosowana w czasie seryjnej produkcji złącz *p-n* na elementy półprzewodnikowe o niewysokich wymaganiach,
- przeprowadza się w temperaturze około 1000°C,
- atomy domieszki unoszone przez gaz transportujący docierają do powierzchni płytki krzemowej,
- niektóre atomy Si opuszczają węzły w sieci krystalicznej, ich miejsce zajmują atomy domieszki.

Metoda implantacji (skomplikowana, droga ale precyzyjna):

- bombardowanie powierzchni płytek strumieniem jonów domieszki,
- umożliwia kontrolowanie gęstości i głębokości domieszkowania przez dobór koncentracji i energii strumienia jonów.

Ta metoda jest stosowana do wytwarzania półprzewodników o wysokich wymaganiach.

## Konduktywność półprzewodników

Gęstość prądu w półprzewodniku:

$$j = nev \quad v = \frac{e}{m\eta} E$$

$e$  - ładunek elektronu,

$n$  - koncentracja nośników ładunku,

$v$  - średnia prędkość nośników ładunku.

$$j = \frac{ne^2}{m\eta} E$$

$m$  - masa elektronu,

$\eta$  - średnia częstość zderzeń nośników ładunku,

$E$  - natężenie pola elektrycznego.

$$v = \frac{e}{m\eta} E = uE \quad u = \frac{v}{E}$$

$u$  - ruchliwość nośników ładunku.

$$j = enuE \quad enu = \gamma \quad j = \gamma E$$

$\gamma$  - konduktywność półprzewodnika dla jednego rodzaju nośników ładunku.

Gęstość prądu elektronowego:

$$j_n = en_n u_n E = \gamma_n E$$

$n_n, u_n$  - koncentracja elektronów  
i ich ruchliwość,

$\gamma_n$  - konduktywność elektronowa.

Gęstość prądu dziurowego:

$$j_p = en_p u_p E = \gamma_p E$$

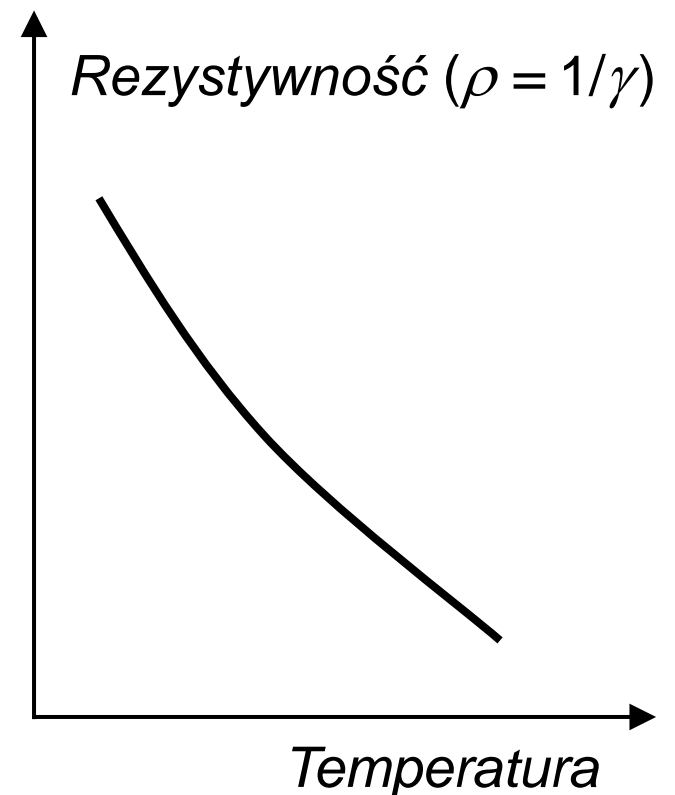
$n_p, u_p$  - koncentracja dziur i ich  
ruchliwość,

$\gamma_p$  - konduktywność dziur.

W półprzewodniku samoistnym:

$$n_n = n_p = n$$

$n$  - zależy silnie od temperatury.



Temperaturowy współczynnik rezystywności **TWR** materiałów półprzewodników samoistnych i domieszkowych **jest ujemny**.

# Wytwarzanie elementów półprzewodnikowych i obwodów scalonych

## Proces wytwarzania płytek krzemowych

