



# WZROST KRYSZTAŁÓW OBJĘTOŚCIOWYCH Z FAZY ROZTOPIONEJ (ROZTOPU)

**Tomasz Słupiński**  
Uniwersytet Warszawski,  
Wydział Fizyki,  
Zakład Fizyki Ciała Stałego  
(Pracownia Fizyki Wzrostu Kryształów)  
tomslu@fuw.edu.pl

Wykład w PTWK, 22 lutego 2008

# PLAN

1. Wykres fazowy – punkt kongruentny
2. Metoda Czochralskiego
3. Inne metody:
  - topienia strefowego (Float Zone): Si
  - Bridgmana i podobne (HB, VB, VGF)
  - Kyropulosa:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - szafir
4. Transport ciepła i prędkość wzrostu kryształu
5. Kontrola wzrostu kryształu, modelowanie
6. Domieszkowanie, prążki wzrostu  
(ale o tym już w przyszłym tygodniu jako wstęp do metod wzrostu z roztworów)

Wzrost kryształu – często nazywany jest hodowlą kryształu - nazwa ma zapewne sugerować, że otrzymanie kryształu wymaga sporo cierpliwości i zadbania o szczegóły.

# Podstawy termodynamiczne

**Faza roztopiona (pot. zwana roztopem, ang. "melt")**

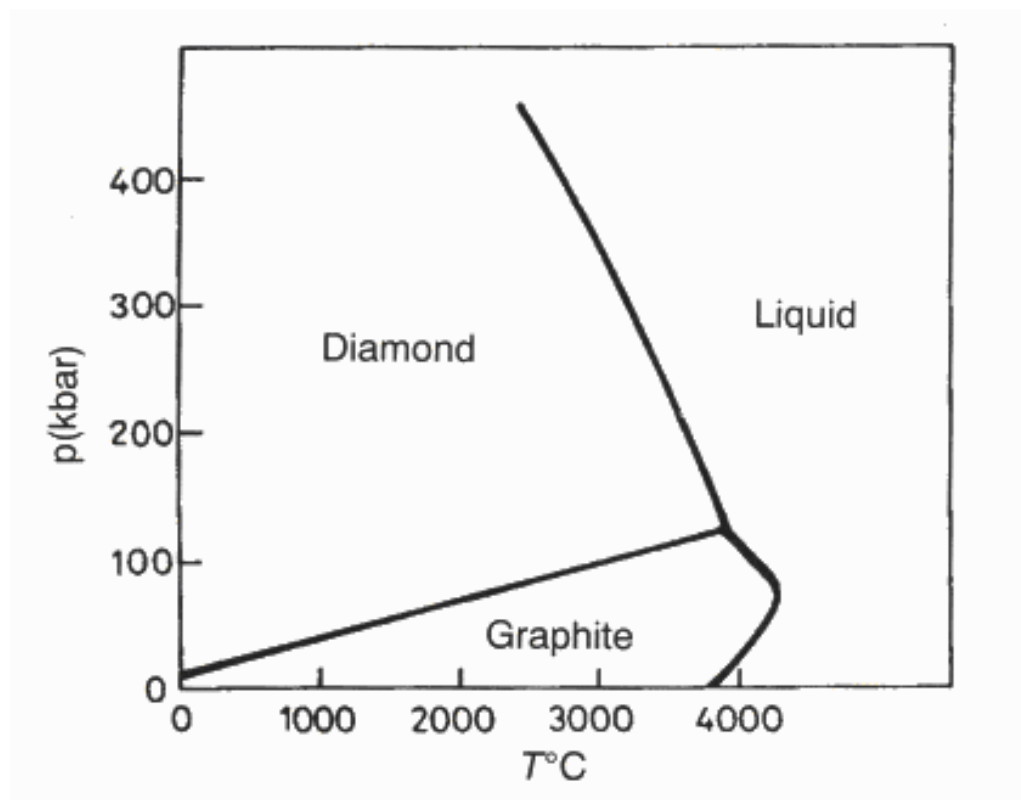
- ciecz o tym samym składzie chemicznym, co kryształ

**Wzrost kryształu z roztopu** – realizacja przemiany fazowej ciecz-ciało stałe zachodzącej bez zmiany składu chemicznego (nie licząc domieszek  $< \sim 0.1$  % at.)

Równowagi fazowe rozstrzygają o możliwości wzrostu kryształu z roztopu (**wykresy fazowe**)

# Przykład: diamenty

Wykres fazowy p-T węgla



- nie można hodować diamentów z roztopu (niestety)

# Przykład: $\text{SiO}_2$ o strukturze $\alpha$ -kwarcu

Wykres fazowy p-T  
jednoskładnikowy dla  
kwarcu,  $\text{SiO}_2$

**War. konieczny dla wzrostu  
z roztopu:**

- **brak przejść fazowych  
1-go rodzaju** poniżej  
temperatury topnienia

Kryształy  $\alpha$ - $\text{SiO}_2$  (wł. piezoelektryczne)  
można otrzymywać z roztworu  
- więcej na wykładzie za tydzień

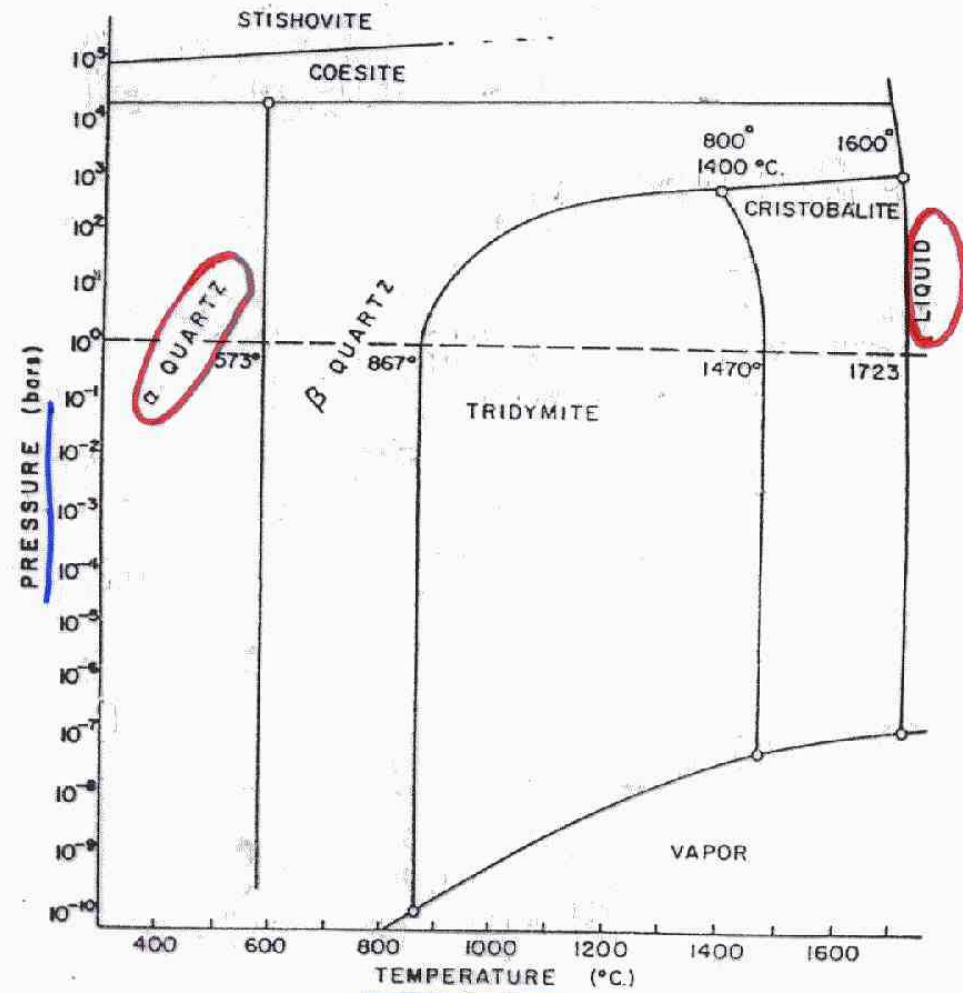
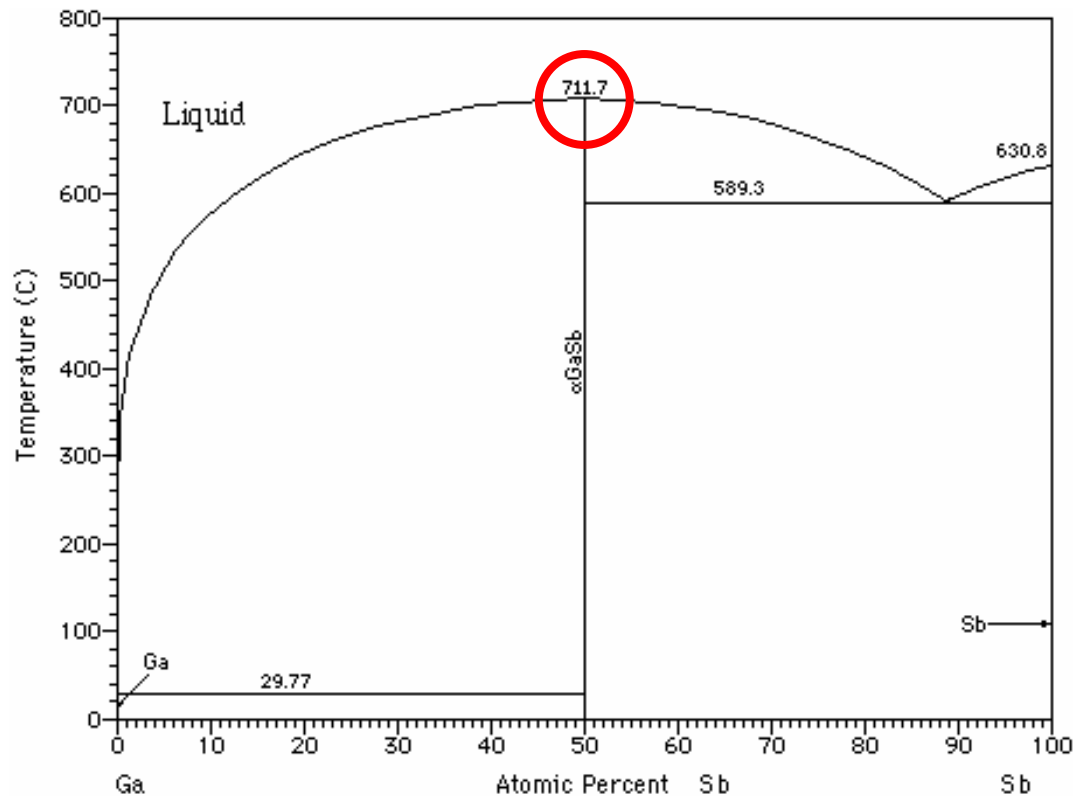


Figure 27. P-T diagram for system  $\text{SiO}_2$  drawn to scale.  
From Roy and White (1975).

# Warunek konieczny, aby można było hodować kryształ z roztopu dwuskładnikowego:

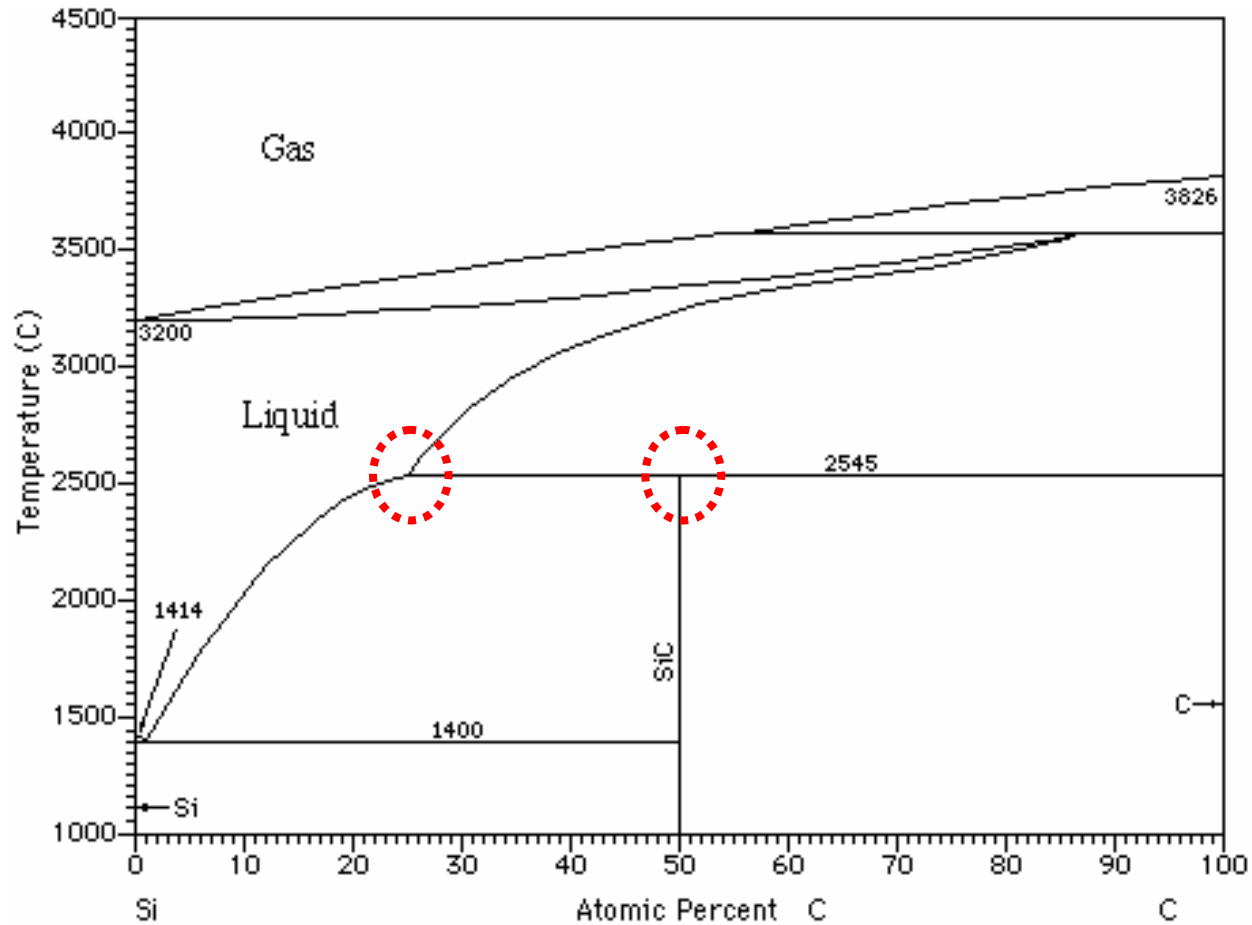
Występowanie punktu **równowagi termodynamicznej** pomiędzy fazą ciekłą i fazą stałą **przy tych samych składach chemicznych obu faz** =

= istnienie tzw. **punktu kongruentnego** na wykresie fazowym T-x (temperatura – skład, przy ustalonym ciśnieniu)



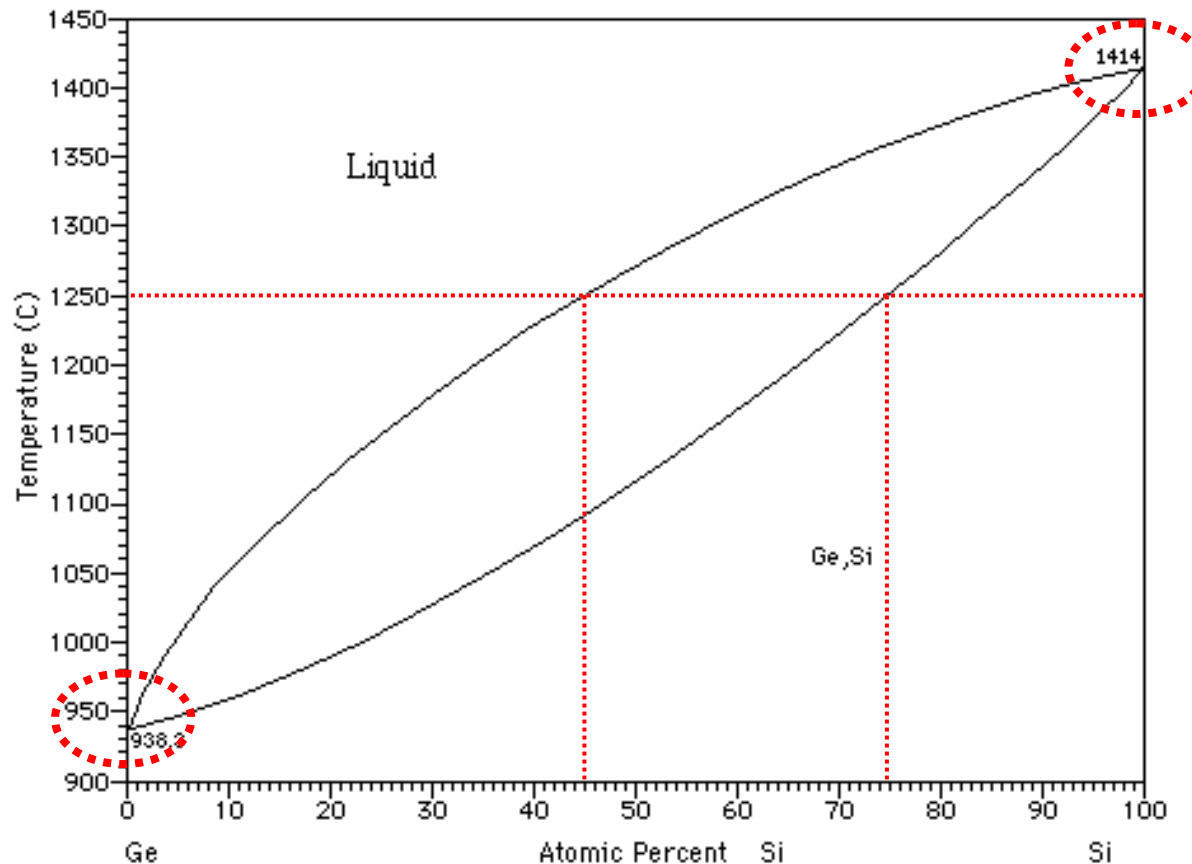
# Kontr-przykład: SiC

- brak punktu kongruentnego



Kryształy objętościowe SiC mogą być otrzymane w przemianie fazowej para – c. stałe

# Kontr-przykład: $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$



Metodami z roztopu można tu hodować tylko **Ge** oraz **Si**,  
Krystalizacja roztworów stałych  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ma cechy wzrostu z roztworów  
- więcej za tydzień.





# Pytanie przy okazji:

jaka jest szerokość linii fazy stałej GaAs ?

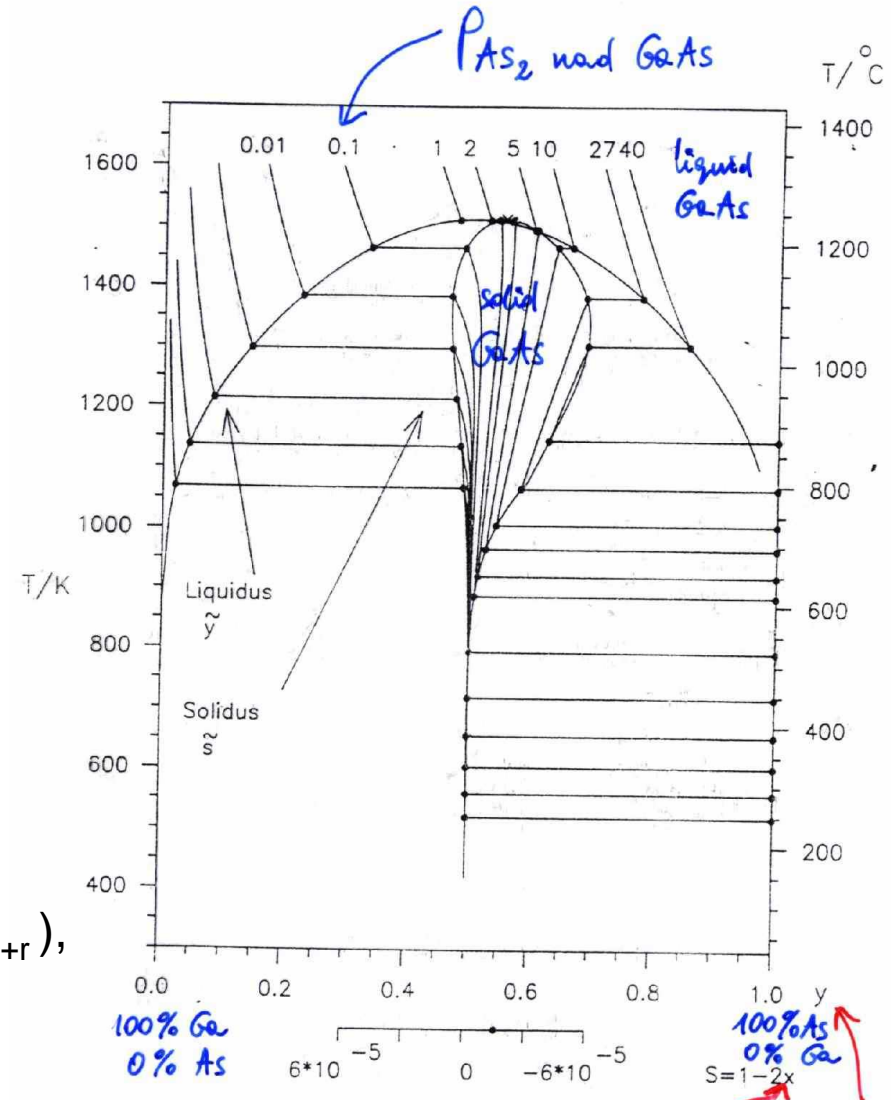
jakie efekty określają tę szerokość ?

Odp:

**Defekty niestechiometryczne w kryształach,**

np. w GaAs typu  $As_{Ga}$  lub klastry As, równowagowo może ich być rzędu  $r \sim 10^{-6}$ , (skład kryształu  $Ga_{1-r}As_{1+r}$ ), także wakansje, atomy międzywęzłowe

**W technologii kryształów chcemy kontrolować ilość tych defektów (a także ilość domieszek innych pierwiastków)**



uzg. H. WENZL (1990)  $(Ga_{1-y}As_y)_{liq}$   
 $(Ga_{1-x}As_x)_{sol}$

# Jakie monokryształy i po co ?

- ELEKTRONIKA i OPTOELEKTRONIKA : **Si**,  
(długo, długo nic innego niż Si)  
**GaAs, InP,**  
**Ge** (renesans Ge !!!),  
**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, GaSb, InSb, [GaN], [ SiC ]**
- DETEKTORY promieniowania: **Si, Ge, CdTe, metale** (det. cząstek)
- przyrządy z falą powierzchniową: **LiNbO<sub>3</sub>** - piezoelektryk,
- rezonatory: **[SiO<sub>2</sub>]**
- materiały do laserów: **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, YAG ...**
- elementy optyczne: **CaF<sub>2</sub>, LiNbO<sub>3</sub> [ADP, KDP], ...**
- materiały twarde: **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, [ C ]**
- itd.. (nawias [...] ozn. wzrost metodami **innymi, niż z roztopu**)

**Table 1.1** Estimated annual production rates<sup>a</sup>

Crystal	Rate (tonnes/year) <sup>c</sup>	Growth methods <sup>b</sup>
→ Silicon	4000	Czochralski, floating zone (VPE)
→ Metals	4000	Bridgman, strain anneal
→ Quartz	800	Hydrothermal
→ III-V compounds <sup>d</sup>	600	Czochralski, Bridgman (VPE, LPE)
Alkali halides	500	Bridgman, Kyropoulos
Ruby	500	Verneuil
Germanium	400	Czochralski, Bridgman
Garnets	200	Czochralski
Lithium niobate	100	Czochralski
Phosphates	50	Low-temperature solution
Lithium tantalate	20	Czochralski
Cubic zirconia	15	Skull melting
TGS	10	Low-temperature solution
→ Diamond	10	High-temperature solution
→ II-VI compounds	5	Vapour, Bridgman

<sup>a</sup>The data are for the whole world.

- rok 1986

źródło: C. Brice (1986)

## CRYSTAL GROWTH PROCESSES

**Table 1.4** Methods ranked by various criteria\*

By mass		By value		By number of materials	
<u>Melt</u>	(60)	<u>Melt</u>	(40)	Melt	(70)
Solid	(20)	<u>Vapour</u>	(20)	Solution	(25)
Solution	(9)	<u>Solid</u>	(20)	Vapour	(20)
Hydrothermal	(7)	Solution	(10)	Solid	(3)
<u>Vapour</u>	(4)	Hydrothermal	(10)	Hydrothermal	(2)

\*The figures in parenthesis are percentages of the total population. In the ranking by number of materials, the total exceeds 100% because some materials are grown by more than one method: roughly 15% are grown by two methods and 5% by three methods. If the entries for solution growth are divided between low-temperature and high-temperature methods, the entries for low temperature growth are about 6, 6 and 12. Note that the data relate to materials grown commercially of which there are about 200. For research purposes crystals of several thousand materials have been grown mostly from solution.

źródło: C. Brice (1986)

## Ważne:

1. Metody z roztopu pozwalają otrzymać „szybko” duże objętości monokryształów w relatywnie niskiej cenie por. do innych metod
2. Podłoża (ang. substrates) wycinane z kryształów służą w elektronice/optoelektronice jako „wzorce struktury krystalicznej” do osadzania warstw epitaksjalnych (warstwy epi. dają funkcjonalność przyrządu półprzewodnikowego)
3. W elektronice niezbędne są monokryształy, bo w polikryształach nie udaje się dostatecznie kontrolować np. przepływu prądu elektrycznego (Shockley, ~1948)

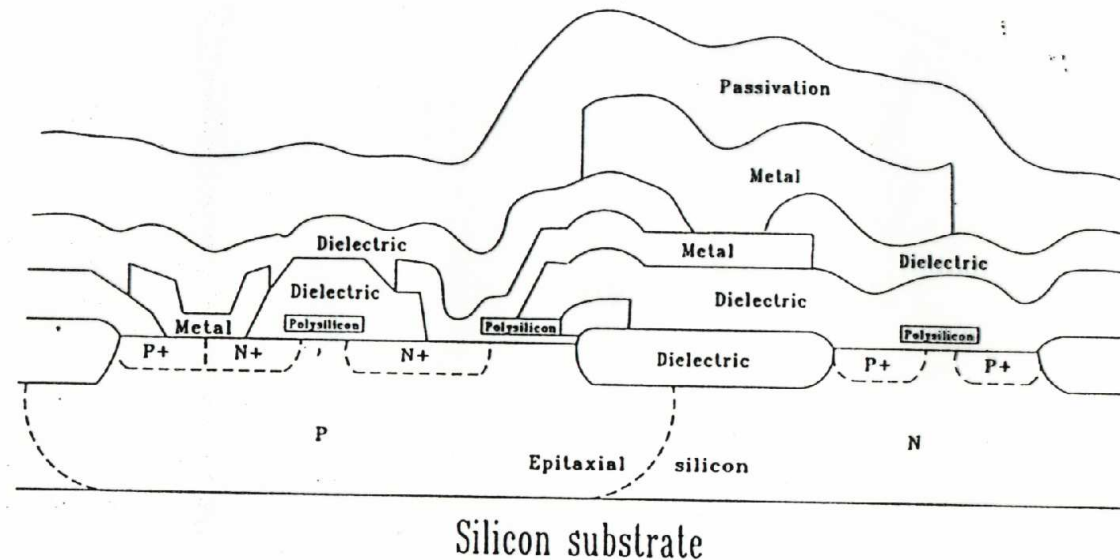


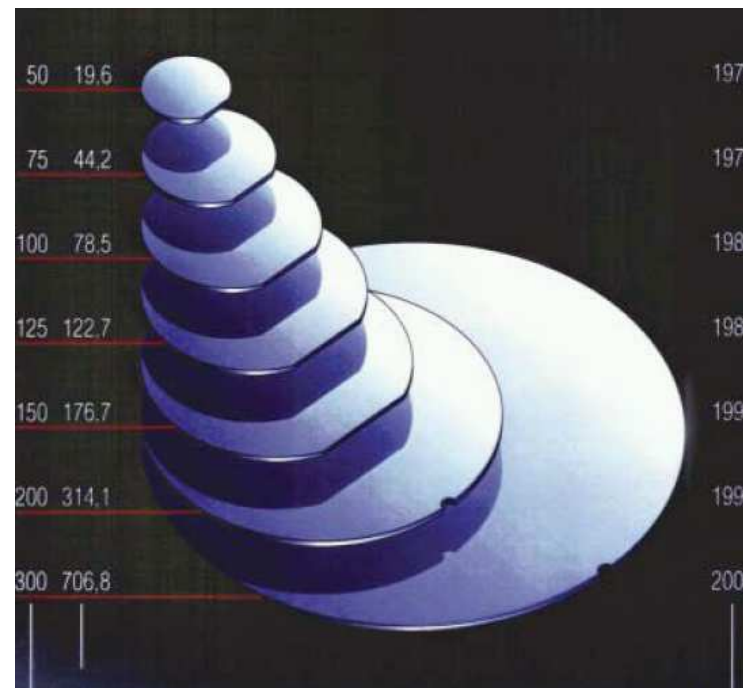
Figure 2. Sketch of cross section of a typical CMOS structure (circa 1984).

MRS BULLETIN/DECEMBER 1993

# Si dla elektroniki



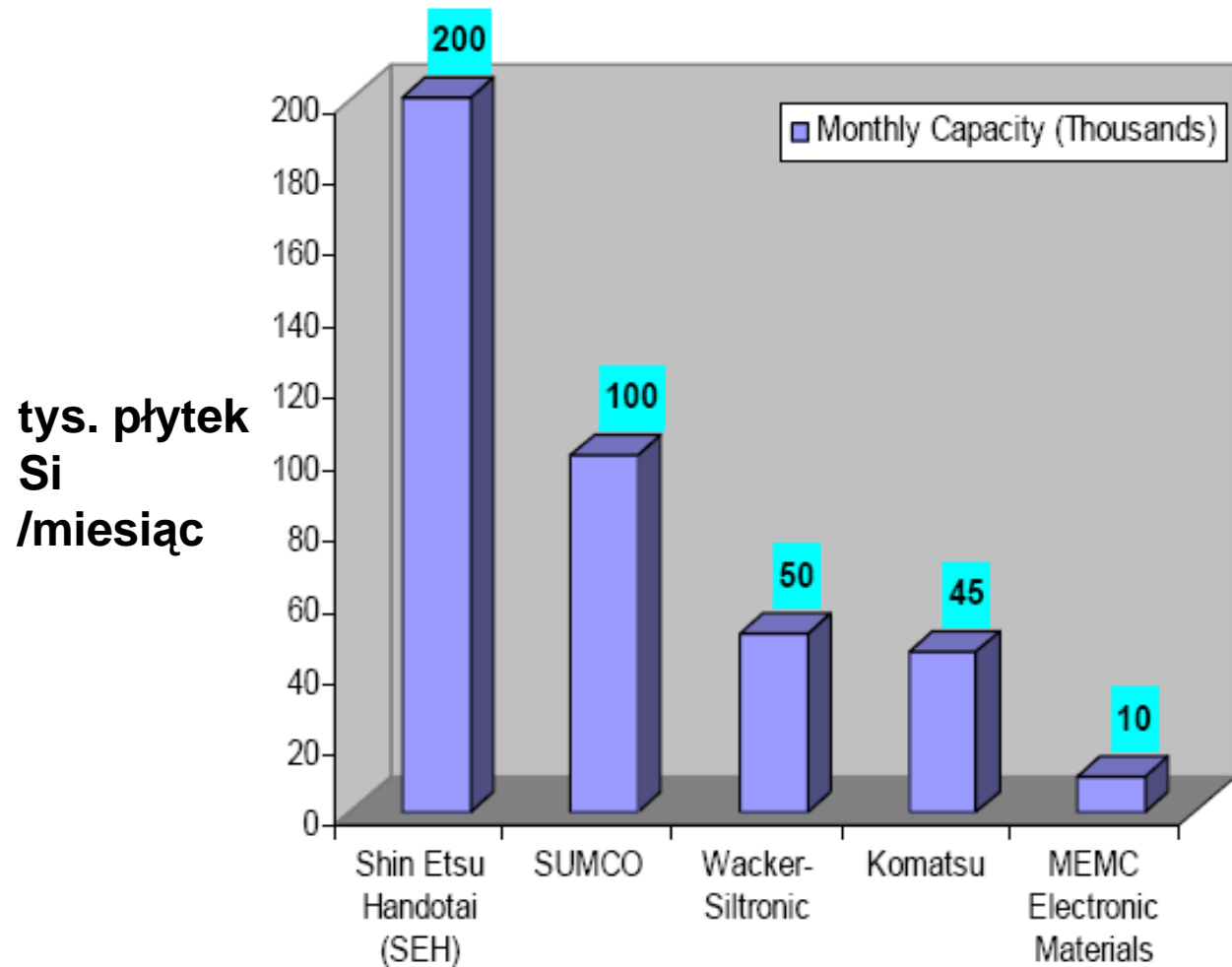
Roczna światowa produkcja monokrystalicznych płytek krzemowych o łącznej powierzchni ok. 5 km<sup>2</sup> (wg. SEMI, 2007)



Średnica wafla [mm]

Źródło obrazków: PVA TePla, Dania

# 90% światowej produkcji Si w 5 firmach



Źródło: Cusack i in.; Penn St. U.



Inne niż Si **podłoża krystaliczne** stosowane dla epitaksji związków III-V  
 (także często dla epitaksji związków II-VI)  
 GaAs, Ge, InP, GaP, InAs, GaSb, InSb (oraz GaN – nie pokazany na rysunku)

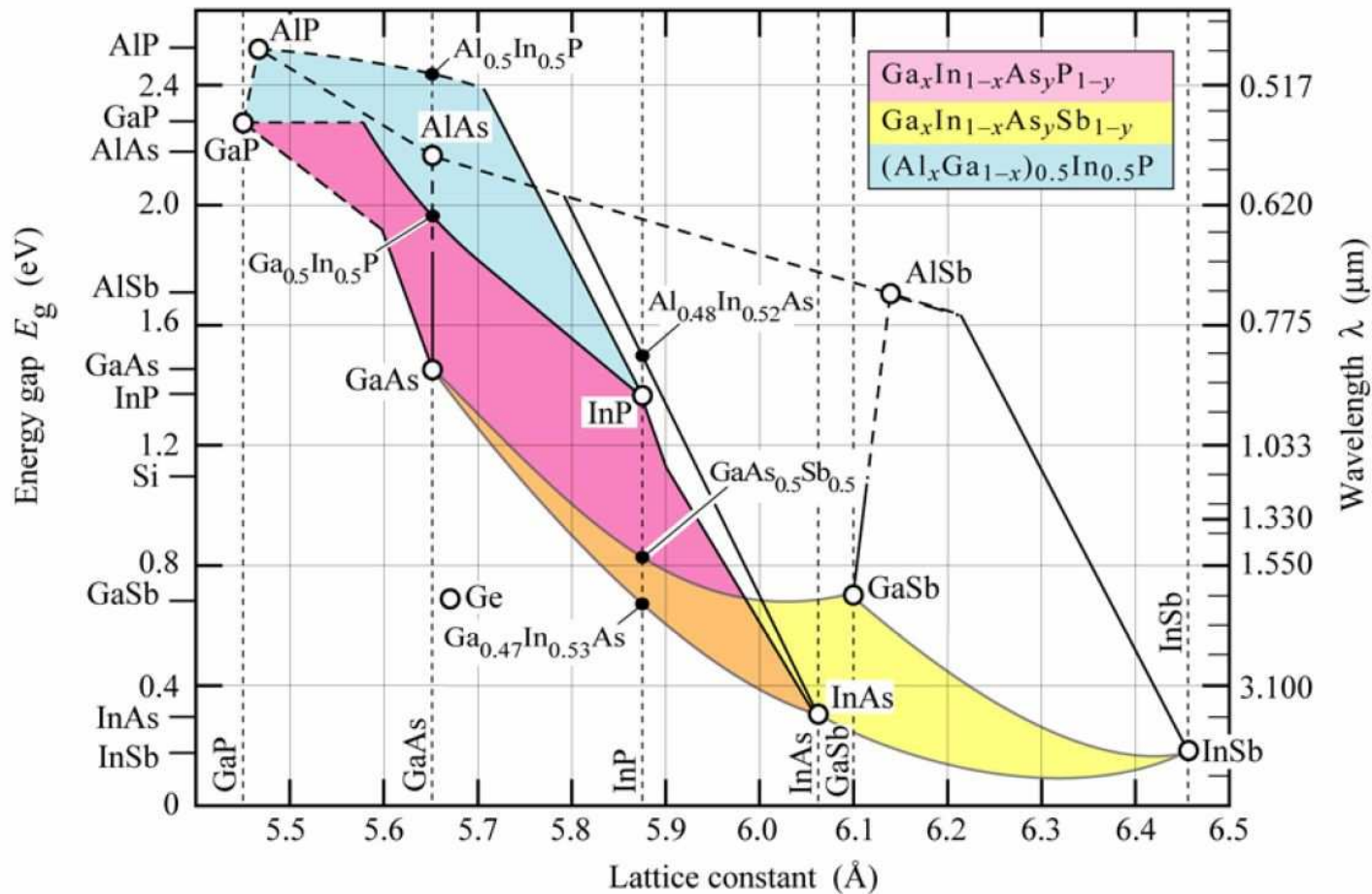


Fig. 17.9 Lattice constant versus energy gap at room temperature for various III-V semiconductors and their alloys (after Tien, 1985).

# Przykład struktury epitaksjalnej

3-złączowe monolityczne ogniwo słoneczne,  
max. sprawność ~36% (a.d. 2005),  
Warstwy osadzone epitaksjalnie na podłożu  
z kryształu Ge

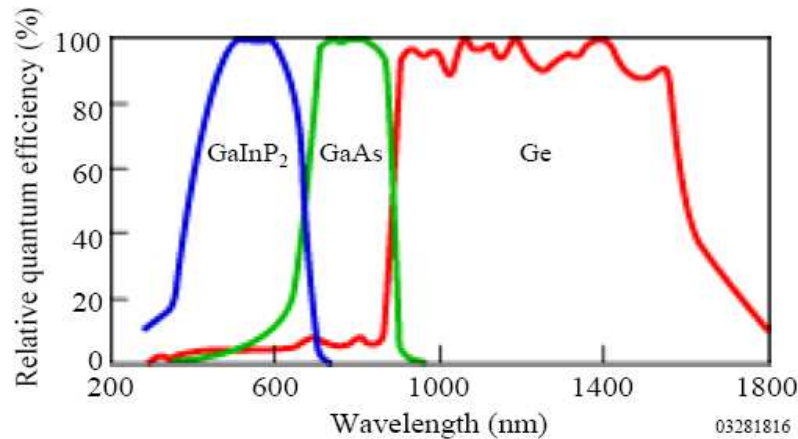
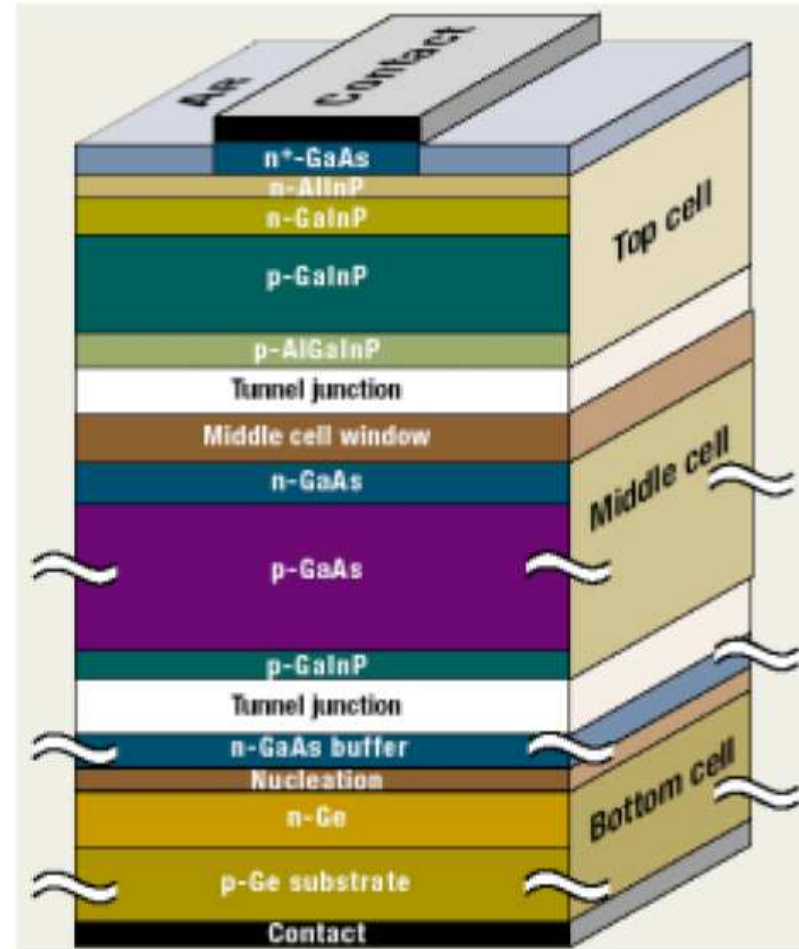
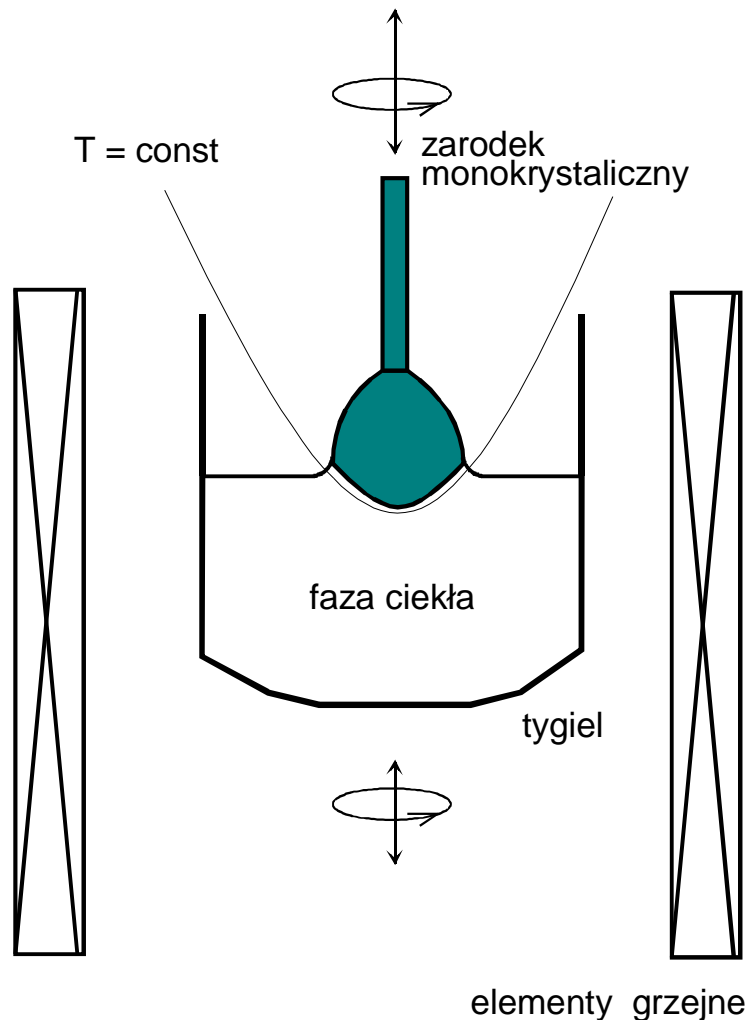


Figure 19. Quantum efficiency of each layer of the GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell.



źródło: Spectrolab Inc.

# Metoda Czochralskiego



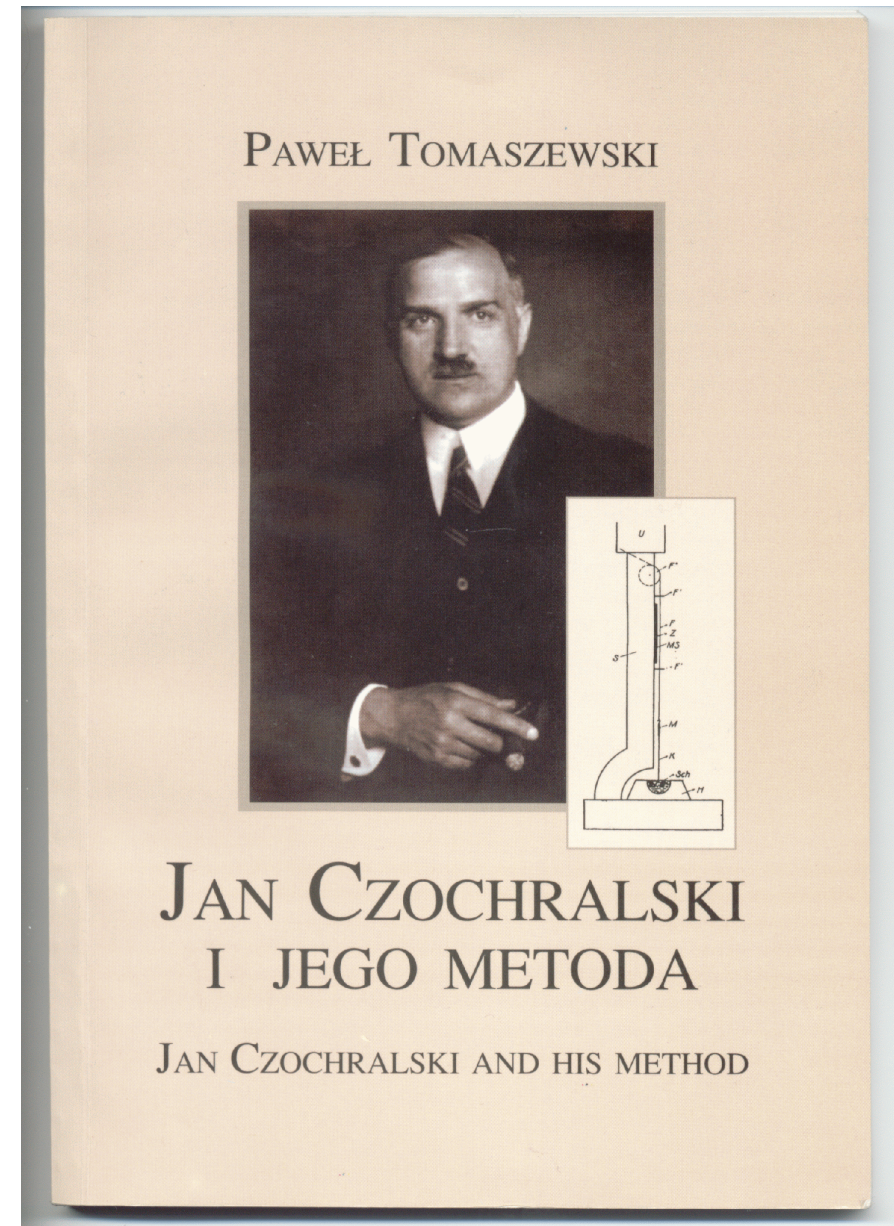
- wzrost kryształu bez kontaktu z tygłem (= mniej defektów struktury krystalicznej)
- wiele parametrów technologicznych możliwych do kontroli (uniwersalność, ale wymagany dobór tych parametrów)
- wzrost i własności kryształu zależą od **rozkładu temperatury** w strefie wzrostu i chłodzenia kryształu
- kontrola średnicy kryształu możliwa poprzez zmiany mocy grzania, ale trudny **nieliniowy** proces regulacji średnicy (pożądanym jest kształt walcowy kryształu)
- prędkości liniowe wzrostu ~1 - ~100 mm/h zależnie od materiału

Propozycja idei wyciągania kryształu z fazy roztopionej: Jan Czochralski (prace w latach 1916-8 w Berlinie, badania monokryształów metali np. Sn, Zn, Cu w postaci drutów „wyciągniętych” z fazy roztopionej).

J. Czochralski zauważył możliwość otrzymania monokryształu jeśli używać monokrystalicznego zarodka.

Metoda znacznie rozwinęła przy pracach nad wynalezieniem i rozwojem tranzystora (Bell Laboratories, 1946-51, pierwsze monokryształy Ge i Si: Teal, Little, Buehler)

**Wiele informacji o pracach i osobie J. Czochralskiego można znaleźć na stronach PTWK.**



of condensers charged slowly to about 100 volts and discharged rapidly through two ignitron tubes in series with a small coil. The field thus produced in its interior remains above 70 percent of its peak value for about 400  $\mu$ sec. A voltage proportional to the magnetic field is displayed as  $X$  deflection on an oscilloscope. This voltage is obtained from an integrating circuit fed from a probe coupled into the main coil. The  $X$  deflection is then calibrated in terms of field by means of a second probe coil of known characteristics situated within the main coil. The second probe coil is then removed and replaced by the germanium sample. This is supplied with a fixed current and the voltage drop across it (which is proportional to its resistance) is displayed as  $Y$  deflection. The oscilloscope therefore plots the resistance *vs.* magnetic field, and the trace is photographed.

**115. Growth of Germanium Single Crystals.** G. K. TEAL AND J. B. LITTLE, *Bell Telephone Laboratories (To be read by title)*.—The growth in the number of ideas of possible conduction mechanisms of practical value that might be realized in germanium has emphasized the importance of developing spe-

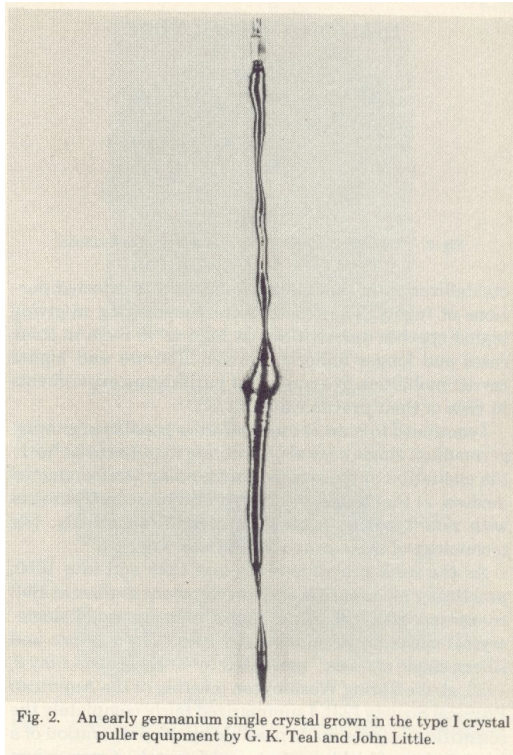
cific methods of producing germanium single crystals in which the relevant properties of the material are controlled. In the present study germanium single crystals of a variety of shapes, sizes, and electrical properties have been produced by means of a pulling technique distinguished from that of Czochralski and others in improvements necessary to produce controlled semiconducting properties. Germanium is a solid that expands markedly on solidifying and is very sensitive to factors, such as physical strain, which give rise to twinning. The method of pulling the germanium single crystal progressively from the melt at such a rate as to have a stationary interface between the solid and the liquid only slightly above the liquid surface is very well suited to the material since it avoids the constraints inherent in solidifying the germanium within inflexible walls and provides a simple planar thermal gradient in the neighborhood of the interface thereby minimizing thermally induced strains. Single crystal rods up to 8 inches in length and  $\frac{3}{4}$  inch in diameter and having a high degree of crystalline lattice perfection have been produced. Measurements in these Laboratories have shown the bulk lifetimes of injected carriers in these materials to be greater than 200 microseconds.

Phys. Rev. 78 (1950) 637

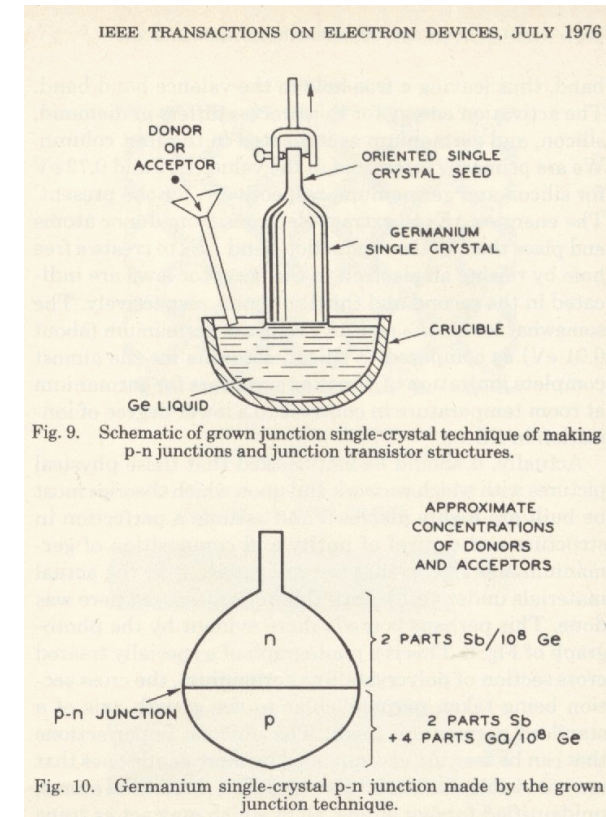
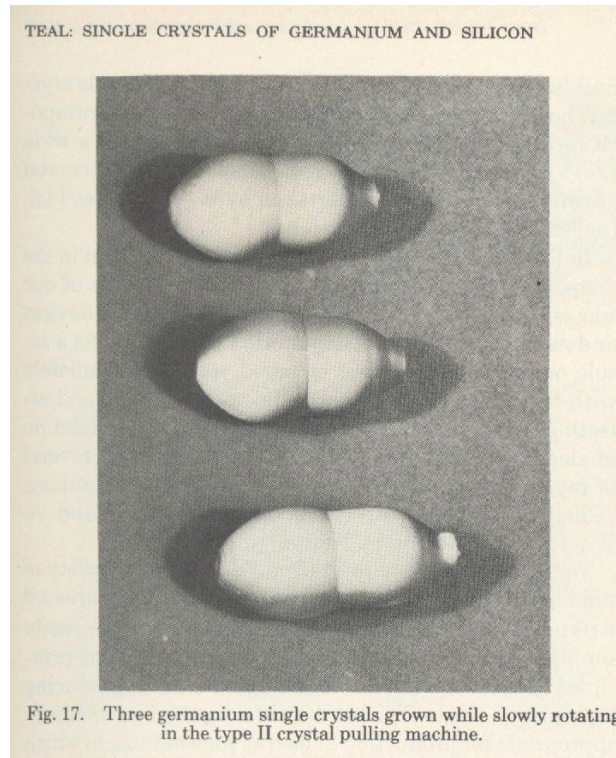
Pierwsze doniesienie z Bell Labs dot. otrzymania monokryształów Ge użytych do konstrukcji pierwszego tranzystora. Teal i Little odwołują się do idei Czochralskiego wyciągania monokryształów, do której dodali ulepszenia konieczne dla kontrolowania własności półprzewodnikowych Ge.

# Pierwsze kryształy „wyciąganego” Ge (Bell Labs)

- raport historyczny w IEEE Trans. on Electr. Dev. ED-23 (1976) 621

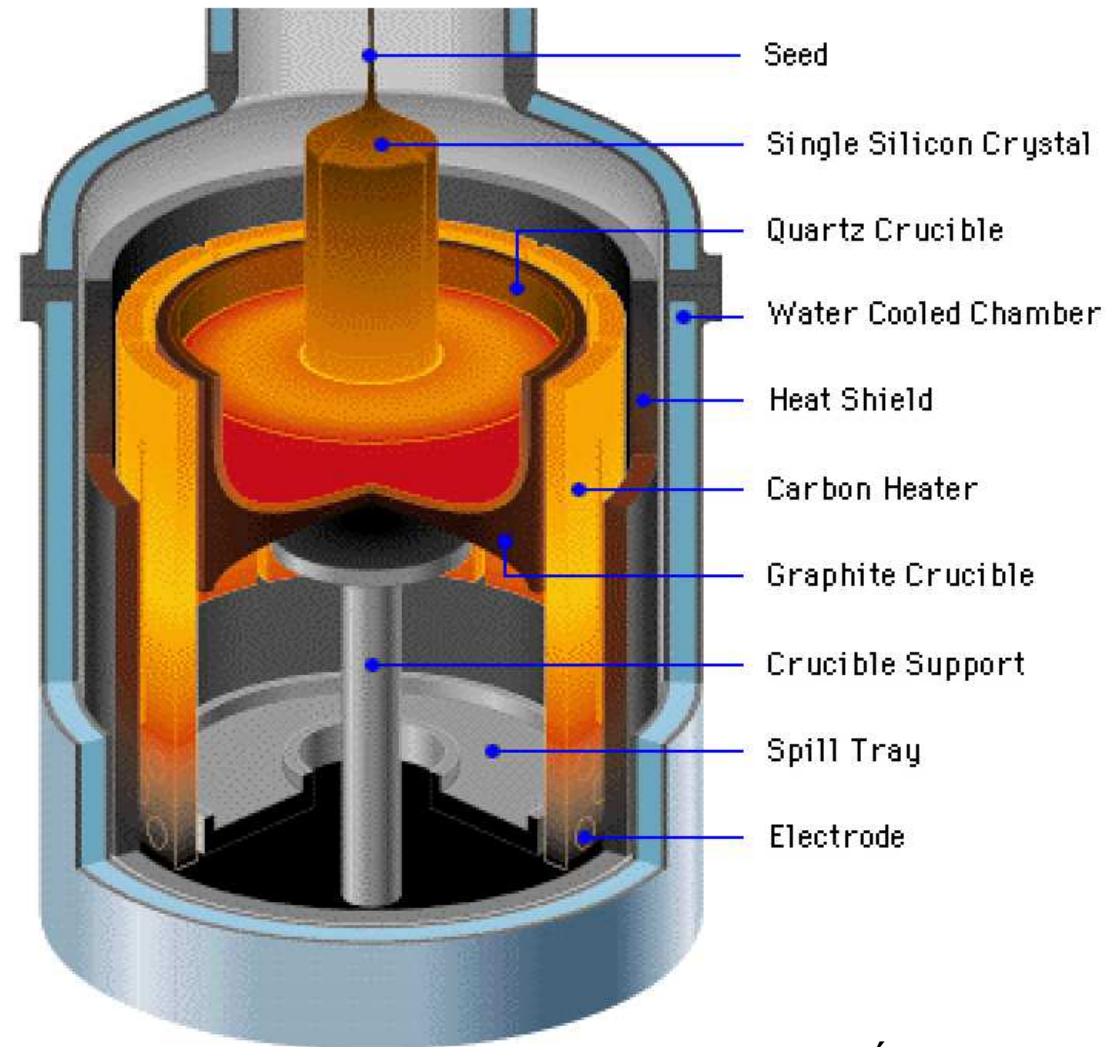


Wyciągane monokrystaliczne „druty” Ge



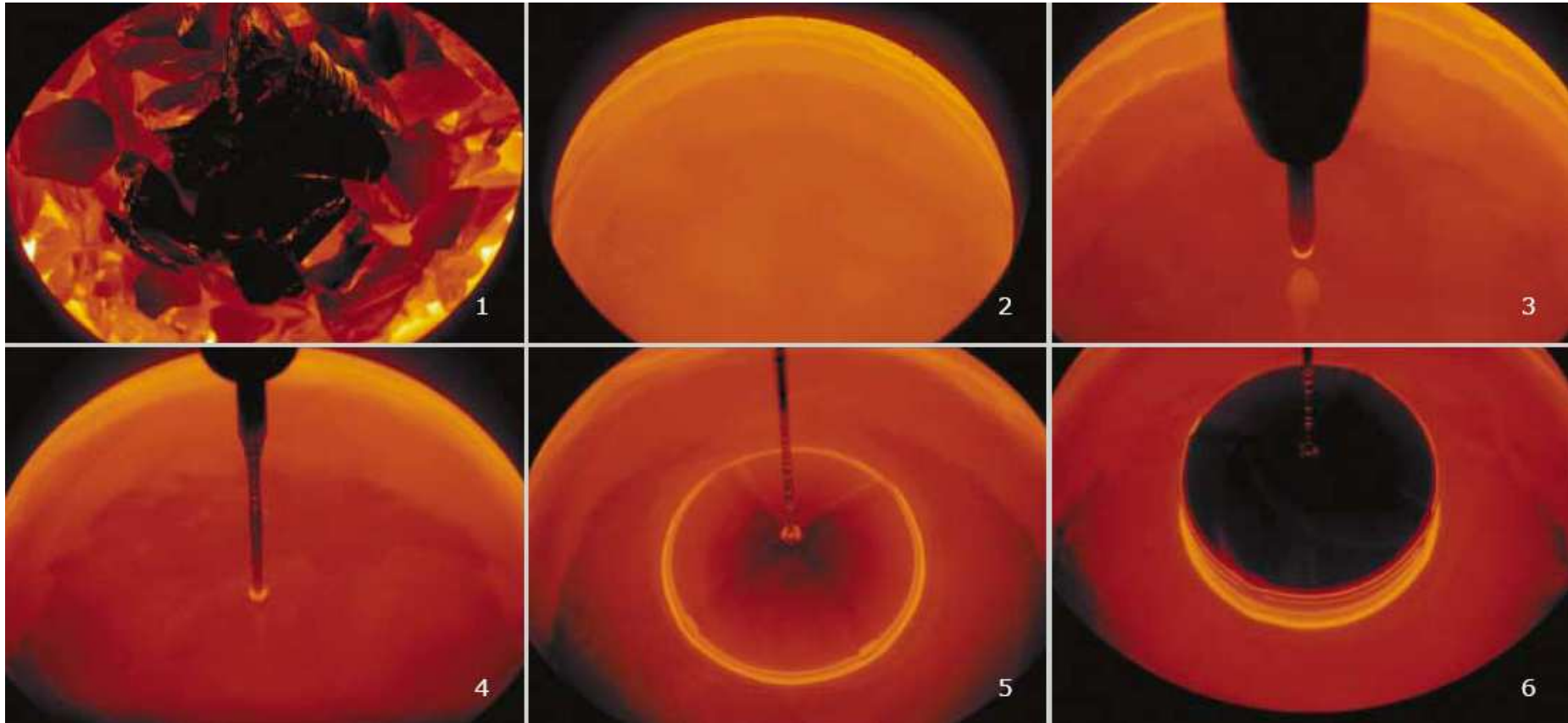
Jedne z pierwszych „modelowych” złączy p-n zostały otrzymane wykorzystując domieszkowanie przy wyciąganiu Ge

# Przekrój urządzenia do metody Czochralskiego dla Si



Źródło obrazków: SUMCO

# Etapy metody Cz.

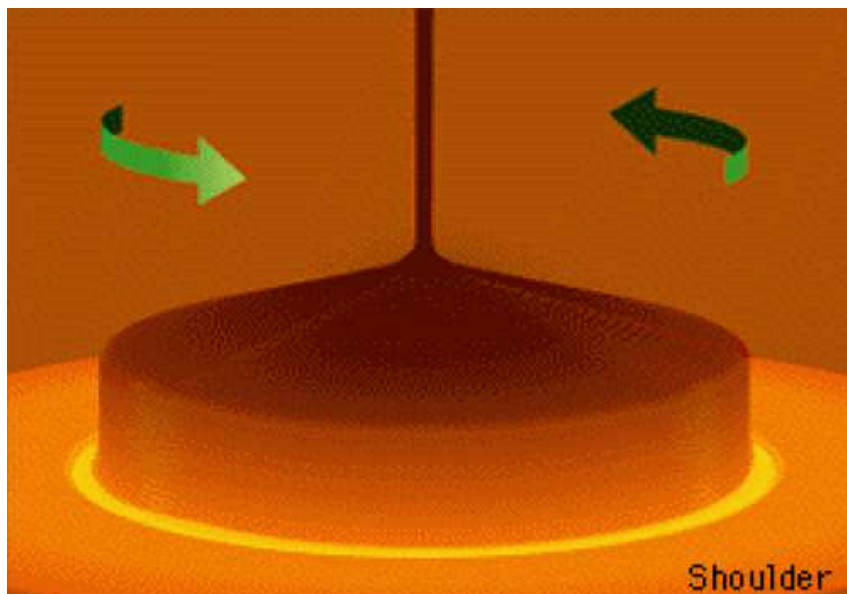


(1) Topienie materiału, (2) stabilizacja temperatury, (3) Kontakt zarodek-roztop, (4) krystalizacja przedłużenia zarodka, (5) powiększenie średnicy (stożek początkowy), (6) wzrost części walcowej.

Źródło obrazków: materiały firmy PVA TePla



# Sterowanie zmianami średnicy kryształu



**- widoczna krzywizna menisku  
(jasny pierścień)**

Źródło obrazka: SUMCO

Średnica jest określona przez położenie izotermy temperatury topnienia – przecięcie z powierzchnią cieczy w tyglu.

Metody sterowania średnicą kryształu:

- dobór doświadczalny profilu zmian temperatury w czasie
- sterowanie w pętli regulacyjnej na podstawie zmierzonej aktualnej średnicy kryształu. Ale bardzo trudne zagadnienie regulacji. Średnica może być wyznaczana met. optycznymi przez obserwację menisku (metody analizy obrazu) lub techniką ważenia ciężaru kryształu (ale trudności matematyczne zw. z siłami kapilarnymi w menisku).

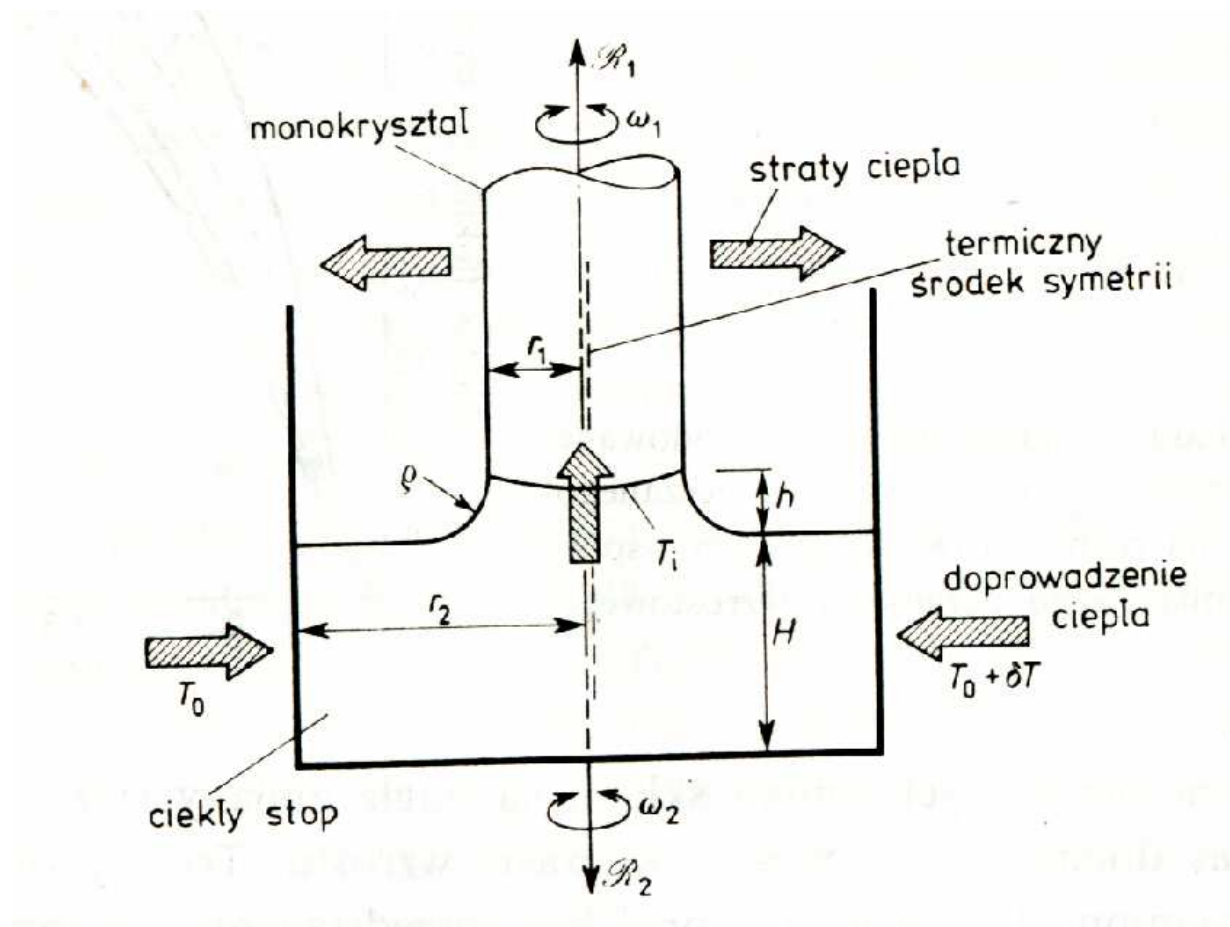
# Menisk w met. Czochralskiego



- Promienisty transport ciepła zależy od „kąta patrzenia” menisku, związanego z kątem nachylenia powierzchni kryształu.  
Niestabilność – jeśli kryształ zawęży się, to menisk „patrzy” na gorętsze obszary grzejnika i kryształ zyskuje tendencję do dalszego zawężania się.
- menisk ułatwia metody optycznej kontroli średnicy rosnącego kryształu
- menisk daje siły kapilarne utrudniające wyznaczenie średnicy z pomiarów *on-line* wagi rosnącego kryształu

Źródło obrazka: mat. firmy MaTeC GmbH

## Transport ciepła przy powierzchni granicznej ciecz – kryształ (froncie krystalizacji) w met. Cz.



Źródło rysunku: prof. J. Żmija, „Otrzymywanie monokryształów”

## Związek między prędkością wzrostu i transportem ciepła (gradientami temperatury)

$$-K_{sol} \frac{\partial T_{sol}}{\partial z} + K_{liq} \frac{\partial T_{liq}}{\partial z} = L \cdot \rho_{sol} \cdot V_{growth}$$

$K$  – przewodnictwo cieplne  
 $L$  – ciepło przemiany (krystalizacji)  
 $V_{growth}$  – predkość wzrostu  
 $\frac{\partial T}{\partial z}$  - gradient temperatury

- zwiększenie prędkości wzrostu wymaga zwiększenia gradientów temperatury (ale rośnie wtedy ilość defektów struktury w kryształach)
- istnieje możliwość regulacji średnicy przez zmiany prędkości wzrostu (ciepło krystalizacji),

Maksymalna możliwa prędkość wzrostu dla danego kryształu:

- w kryształach wieloskładnikowych (także jednoskładnikowych domieszkowanych) zwykle jest ograniczona efektami transportu składnika, a nie transportu ciepła (wykład za tydzień)
- w kryształach jednoskładnikowych ograniczona efektami powstawania naprężeń termicznych (rozszerzalność termiczna kryształu), powstawanie dyslokacji lub spękań

# Wpływ konwekcji na rozkład temperatury

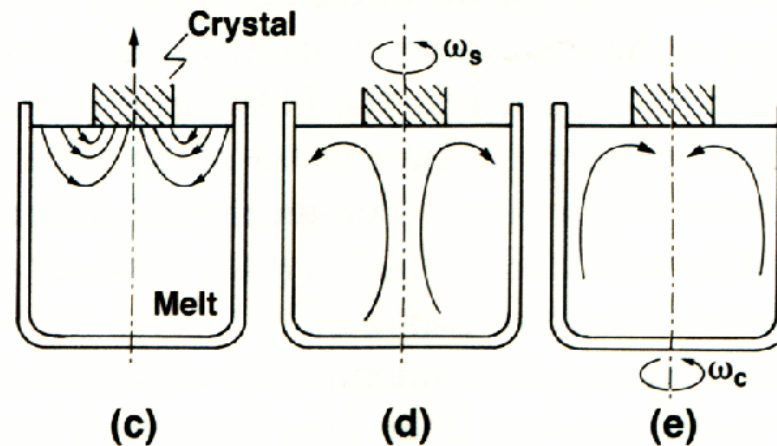


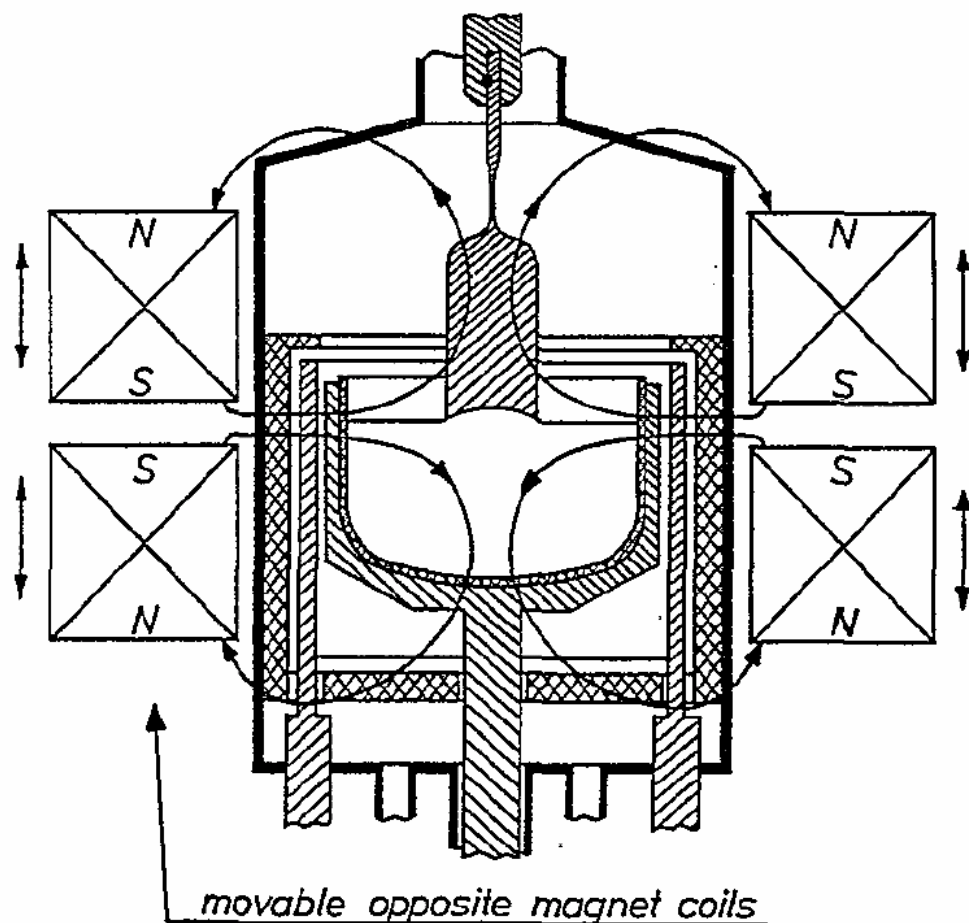
Fig. 5.17. Basic convection patterns of melt in Czochralski crucible. (After Kobayashi.<sup>78</sup>)

Wpływ konwekcji na rozkład temperatur w roztopie silny dla:  
materiałów o dużej lepkości i małym przewodnictwie cieplnym  
(np. mat. tlenkowe, **Pr - duże**)  
słaby dla:  
mat. o dużym przewodnictwie cieplnym i małej lepkości  
(np. ciekłe metale; Si, **Pr - małe**)

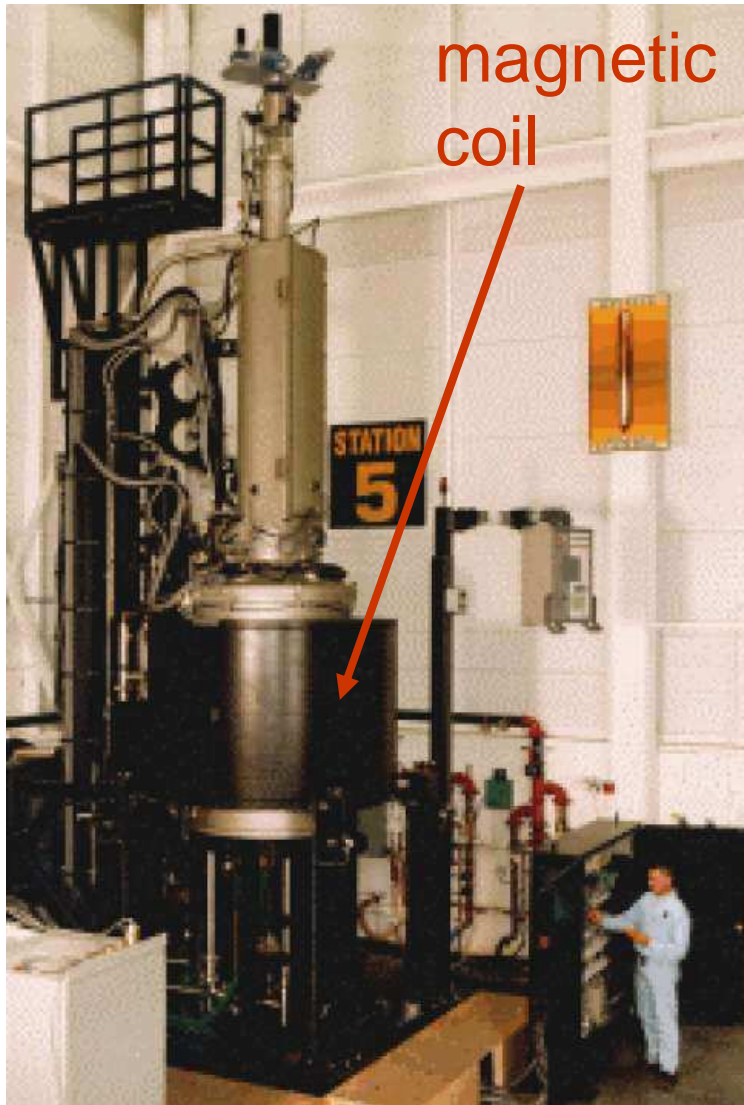
**Liczba bezwymiarowa Prandtla:** 
$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\kappa}$$

$\kappa$  – przewodn. cieplne  
 $c_p$  – ciepło właściwe  
 $\mu$  - lepkość

# Zastosowanie pola magnetycznego w met. Cz dla Si



- zmniejszenie oscylacji temperatury przy powierzchni ciecz - kryształ (zmniejszenie turbulentnego charakteru przepływów cieczy Si w tyglu poprzez wzrost efektywnej lepkości cieczy w polu magnetycznym)
- w efekcie możliwe zmniejszenie koncentracje defektów (np. dyslokacji) i bardziej równomierny rozkład defektów w kryształe



"Puller" do Si firmy Kayex



(Google Grafika: Czochralski)

Monokrystal Si

# Controlling oxygen concentration and distribution in 200 mm diameter Si crystals using the electromagnetic Czochralski (EMCZ) method

Masahito Watanabe<sup>a,\*</sup>, Minoru Eguchi<sup>a</sup>, Wei Wang<sup>a</sup>, Taketoshi Hibiya<sup>a</sup>, Shunji Kuragaki<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Fundamental Research Laboratories, NEC Corporation, 34 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki 305-8501, Japan

<sup>b</sup> Sitix Division, Sumitomo Metal Industries Ltd., 2201 Oza-Kamioda, Kohoku-cho, Kishima-gun, Saga 849-0597, Japan

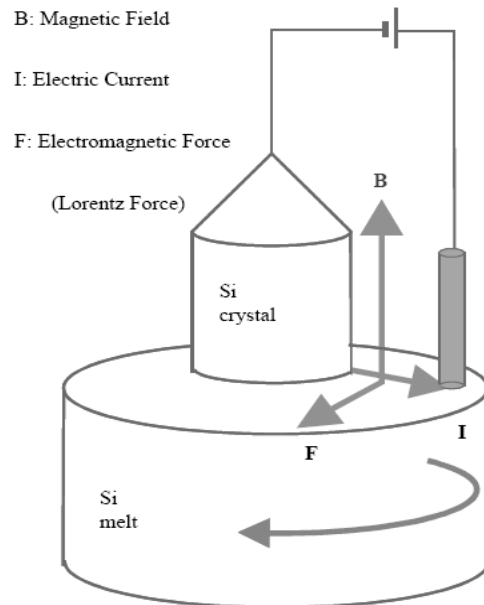


Fig. 1. The principle of the EMCZ method.

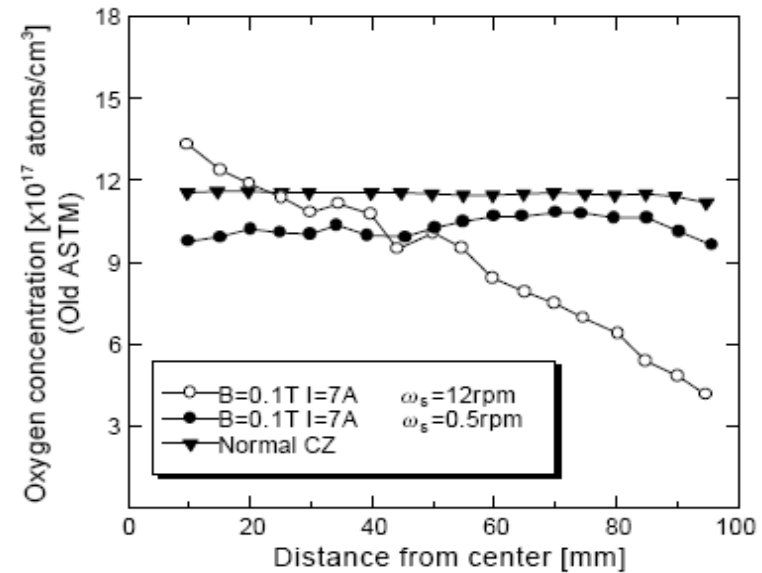


Fig. 5. Oxygen concentration distribution in the radial direction in the V-EMCZ crystals and the normal CZ crystals.



# Wzrost kryształu $^{29}\text{Si}$ met. Cz.

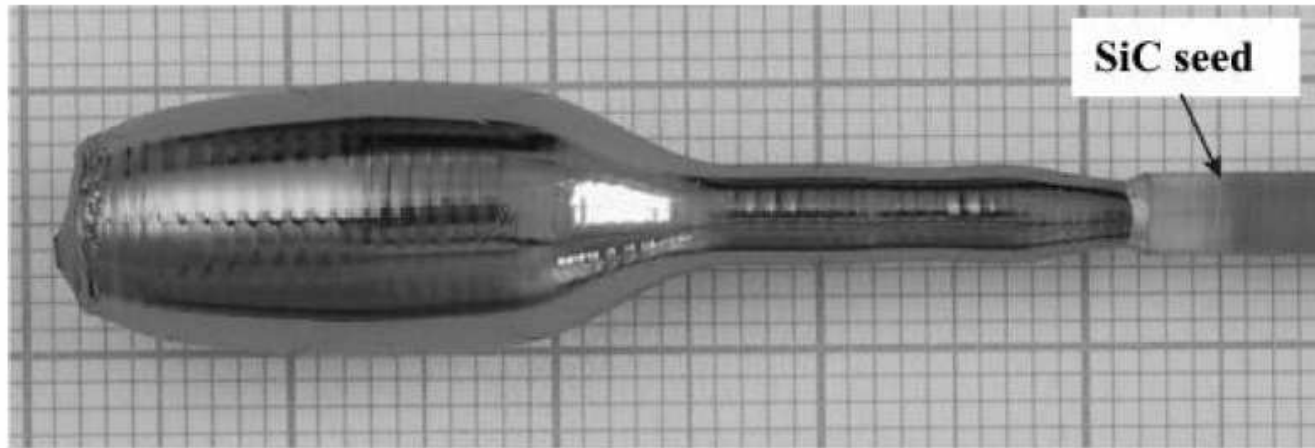


Fig. 2  $^{29}\text{Si}$  crystal grown by mini-CZ technique from the 4g charge using SiC seed.

Table 1 Isotopic composition and chemical purity of  $^{29}\text{Si}$  and  $^{30}\text{Si}$  before (granulate) and after (crystal) growth process measured by spark-mass-spectral-method

Content of Si isotope, at%	natural Si	$^{29}\text{Si}$		$^{30}\text{Si}$	
		granulate	crystal	granulate	crystal
$^{28}\text{Si}$	92,23	2,15	$2,5\pm 0,9$	0,2	$0,7\pm 0,11$
$^{29}\text{Si}$	4,67	97,58	$97,2\pm 1,0$	0,7	$0,62\pm 0,14$
$^{30}\text{Si}$	3,10	0,27	$0,32\pm 0,14$	99,1	$98,68\pm 0,21$
Chemical purity, not less wt%		99,9970	99,99934	99,9918	99,9992

Źródło: Abrosimov i in., Inst. of Crystal Growth, Berlin  
Cryst. Res Technol. 38, 654 (2003)

# Szafir $\text{Al}_2\text{O}_3$ met. Czochralskiego

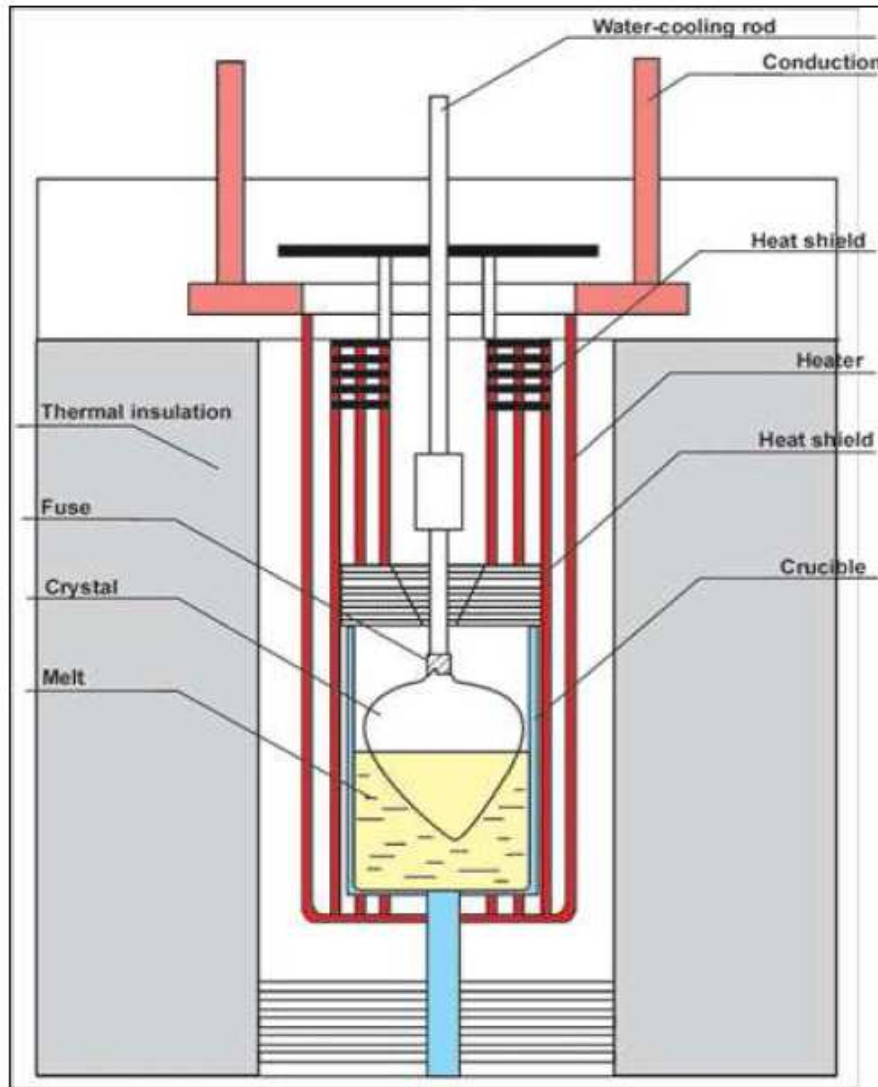


ITME, Warszawa

Wysoka temp. topnienia: 2050 °C  
grzanie indukcyjne  
tygiel: Ir, W, Mo  
atmosfera: Ar, N<sub>2</sub>, próżnia  
prędkość liniowa wzrostu: 1-3 cm/h



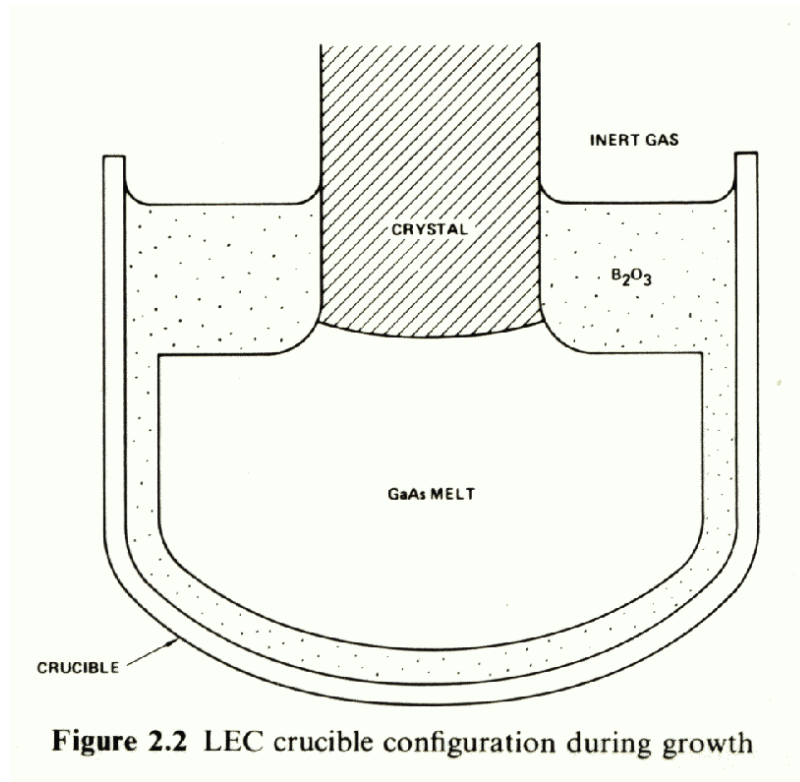
# Metoda Kyropoulosa



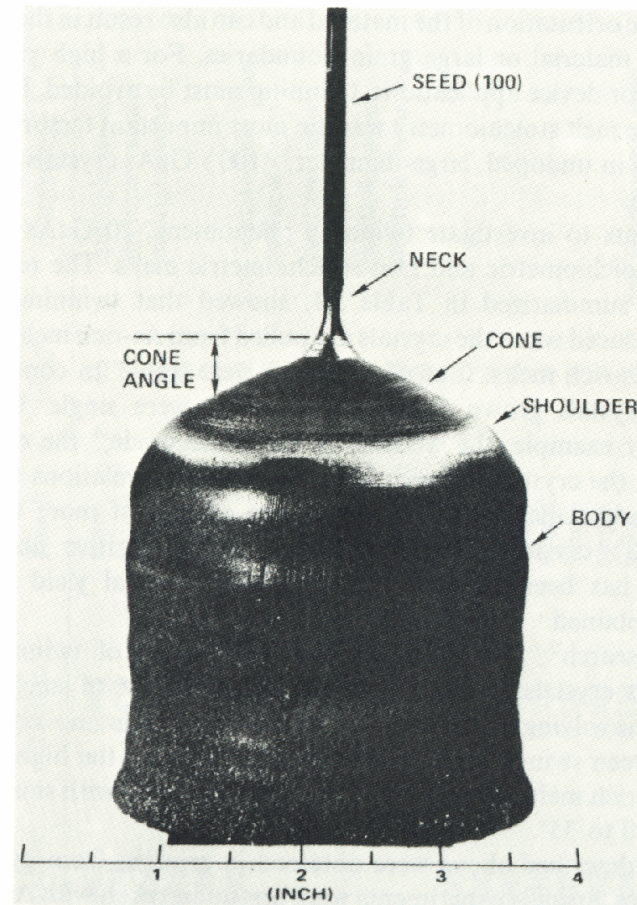
- konfiguracja podobna do met. Cz.
- krystalizacja cieczy jedynie przez obniżanie temperatury cieczy
- tansza metoda por. do met. Cz.
- wystarczająco dobra do produkcji monokryształów szafiru  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Rys. z materiałów firmy:  
Monocrystal PLC, Rosja

# Metoda LEC do związków III-V rozkładających się poniżej temp. topnienia (GaAs, InAs, InP, GaP)



metoda Liquid Encapsulated Czochralski (LEC); Metz, Miller, Mazelski (1962)



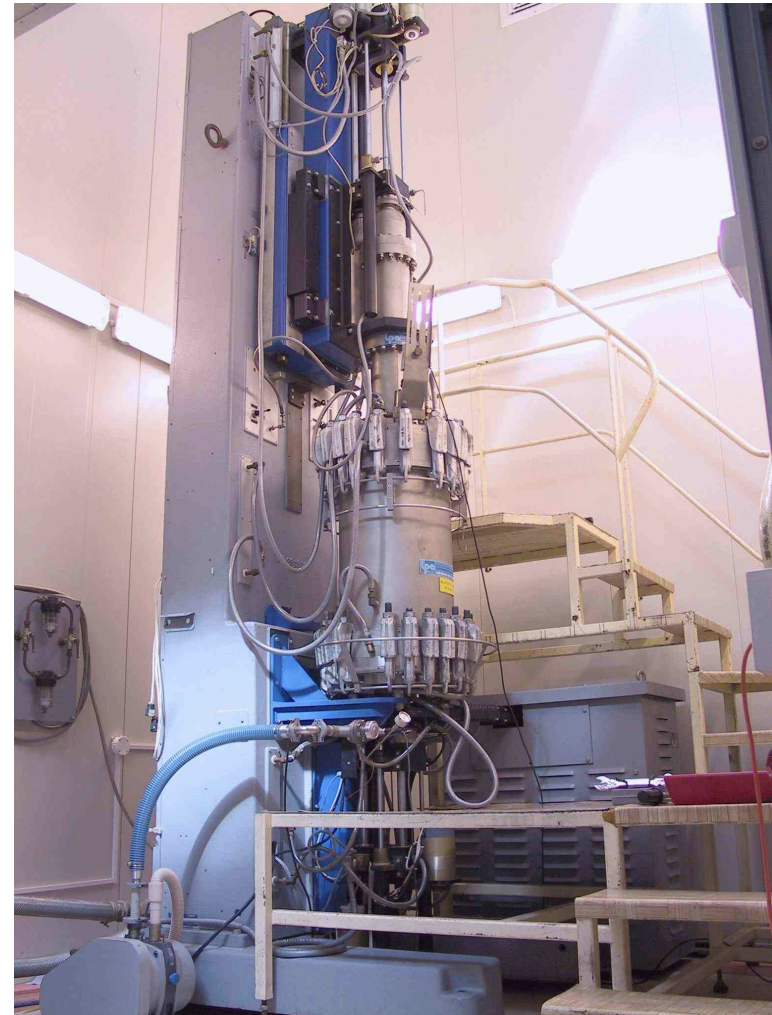
## Urządzenie ciśnieniowe do techniki LEC

W Warszawie laboratoria:  
ITME, ul. Wólczyńska 133,  
Wydz. Fizyki UW, ul. Pasteura 7.

Firma produkcyjna InP: ComSeCore  
(belgijsko – polska, Umicore, ITME)

### **zainteresowania badawcze w pracowni techniki Czochralskiego na Wydziale Fizyki UW:**

- efekty silnego domieszkowania półprzewodnika, porządek atomowy w kryształach z domieszkami
- natura przejść fazowych określających granicę domieszkowania półprzewodnika
- specjalne domieszkowanie kryształów III-V



Wydział Fizyki UW

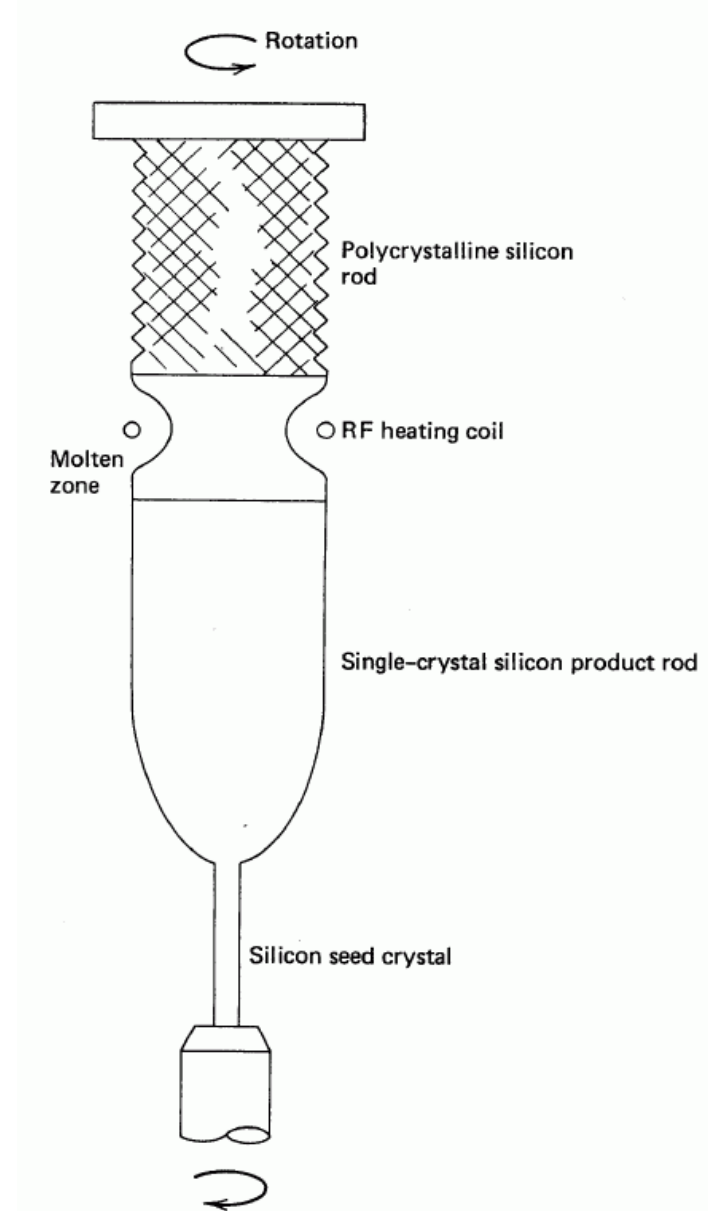
# Technika wędrującej strefy (Float Zone) dla Si

zalety dla Si:

- niska zawartość tlenu jako nieintencjonalnej domieszki

FZ Si:

- większa jednorodność niż Cz. Si oraz niższy poziom niepożądanego tlenu (zastosowania w przyrządach elektronicznych wysokoprądowych: tyrystory, triaki, tranzystory mocy IGBT,...)
- wyższa czystość chemiczna, większa elektryczna oporność właściwa  $\rho \sim 10^4 \Omega\text{cm}$  (zastosowania w przyrządach RF mocy)
- dłuższy czas życia nośników mniejszościowych (zastosowania w ogniwach słonecznych Si o sprawności energetycznej do 20%)



# Technika Float Zone



Fig. 1a. FZ set-up



Fig. 1b. FZ growth



Fig. 1c. Finished FZ ingot



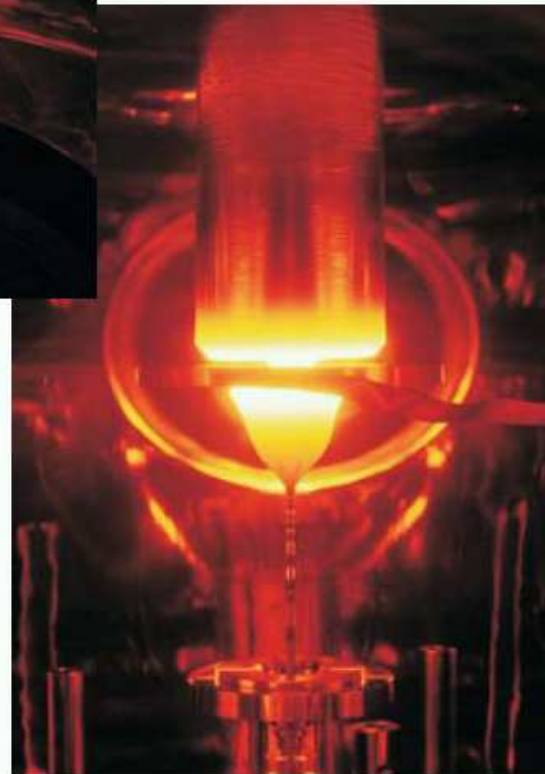
Fig. 1d. Frozen particula

źródło obrazków. T.F. Cizek i in., NREL

# Technika Float Zone



*6" crystal growth*



*Initial melt zone*

źródło obrazków:  
mat. firmy PVA TePla

- łatwiejsza regulacja średnicy, niż w technice Czochralskiego
- trudniejsze skalowanie metody FZ powyżej średnicy kryształu Si ~15 cm w por. do met. Cz.
- około 3.5% światowej produkcji monokryształów Si odbywa się metodą FZ, reszta metodą Cz. (źródło: TopSil, Annual Rep. 2007)



# Porównanie własności Si

Growth method	Czochralski	Float Zone
Diameter	50-150 mm	
Crystal Orientation	<100>, <111>	
Orientation Accuracy	< 0.5°	
Type and Dopant	undoped, n and p-type	
Dopant	Phosphorous, Boron	
Bulk resistivity	1-100	1-30000
Oxygen concentration (new ASTM)	< 18 ppma	< 0.02 ppma
Bulk lifetime	> 20 $\mu$ s	> 1000 $\mu$ s
Wafer thickness	200-1300 $\mu$ m	

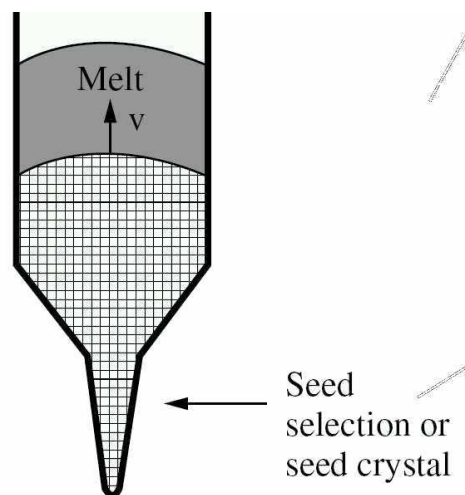
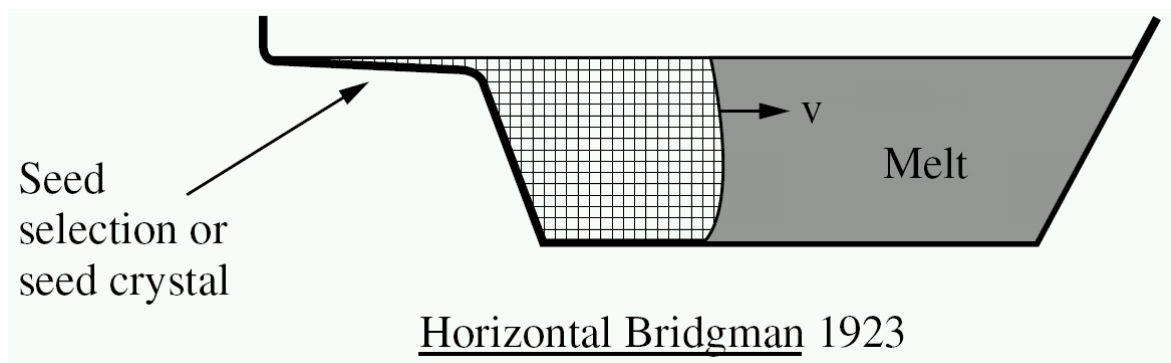
Źródło: materiały firmy Topsil, Dania

## Urządzenie do FZ Si



Silicon. S.A.  
Warszawa

# Techniki Bridgmana HB, VB i technika VGF



Tammann 1914 / Stöber 1925  
Bridgman 1923 / Stockbarger 1936  
Vertical Gradient Freeze VGF

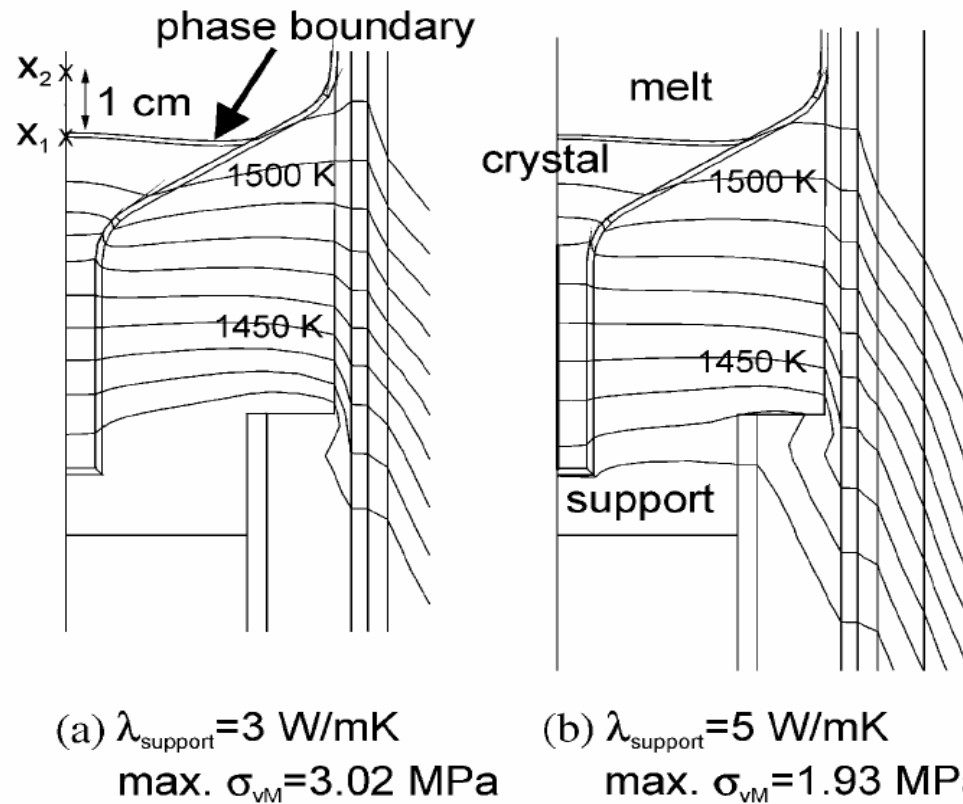
Kryształ styka się z materiałem tygla lub łódki

Łatwa automatyzacja procesu wzrostu

Niewielkie możliwości kontroli parametrów wzrostu

Metoda tańsza niż Cz lub FZ, ale pogorszone parametry materiałowe kryształów

# Technika VGF (Vertical Gradient Freezing)



Układ grzewczy o wielu niezależnie sterowanych grzejnikach pozwala precyzyjnie dobrać profil temperatury w tyglu.

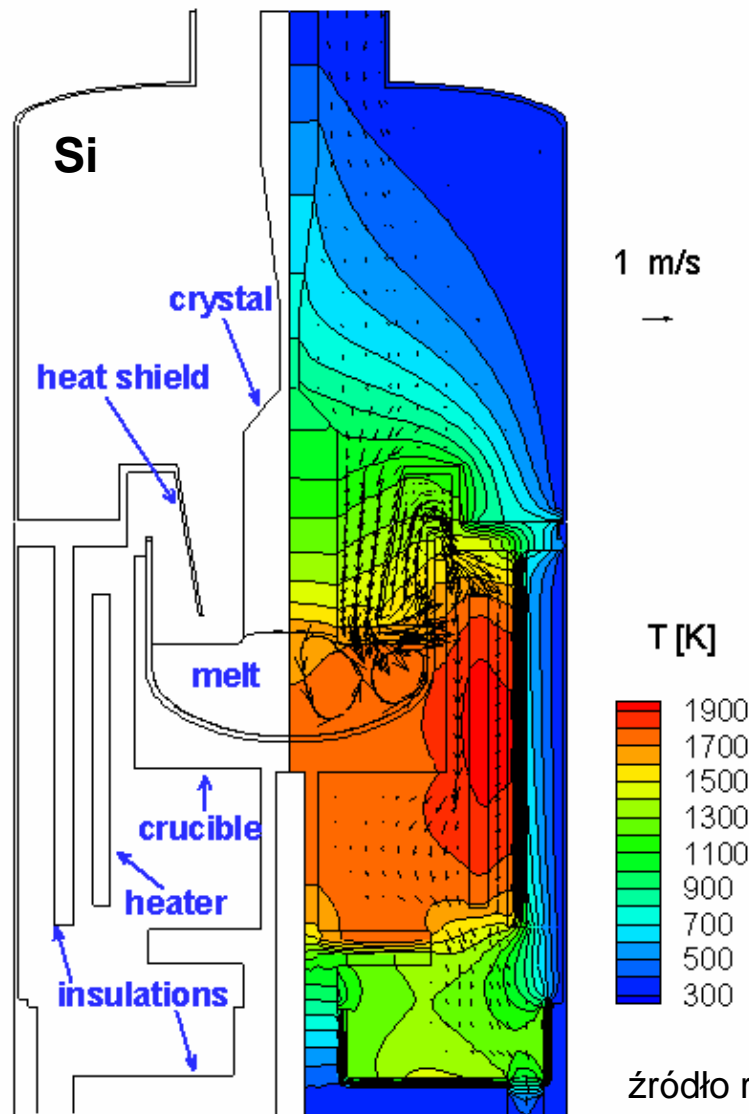
Niewielkie gradienty  $T$ , małe naprężenia termiczne w kryształach.

Wysoki stopień automatyzacji procesu.

Calculated temperature distributions in the grown crystal

źródło: Muller, Birkman; JCG (2002)

# Modelowanie numeryczne warunków wzrostu



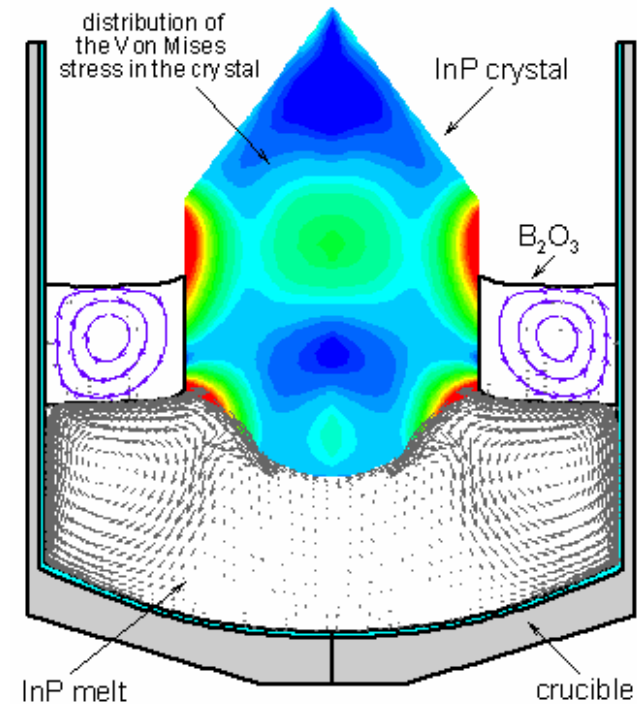
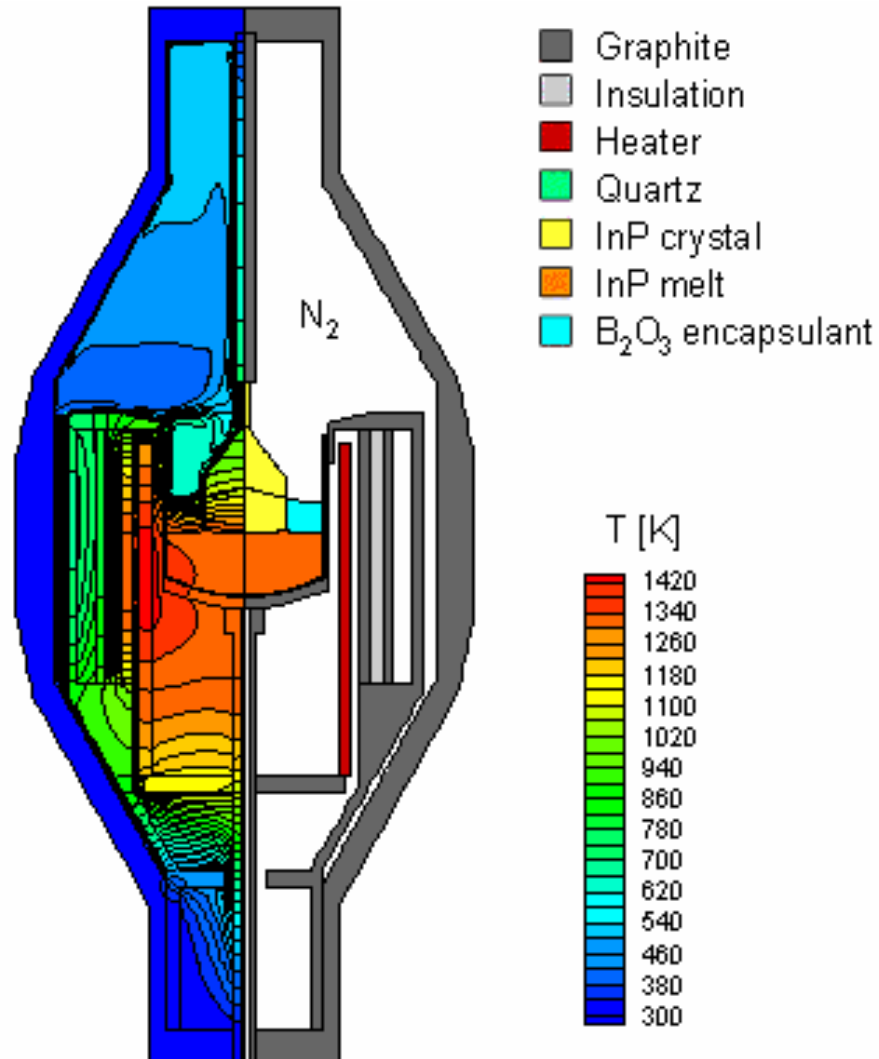
- rozkład temperatur
- rozkład naprężeń termicznych w krysztale
- optymalizacja konstrukcji cieplnej strefy wzrostu
- badanie kształtu granicy fazowej roztop-kryształ (frontu krystalizacji)
- badania przepływów cieczy w tyglu

Wzrost kryształów jest opisywany przez współzależne równania transportu ciepła, masy i składnika oraz przez równania przepływów cieczy i gazów.

Złożone modele są rozwiązywane met. FEM, duża rola wyznaczenia parametrów materiałowych.

źródło rysunków:  
Semiconductor Technology Research, Inc.

# Modelowanie LEC



źródło rysunków:  
 Semiconductor Technology Research, Inc.

# Zakończenie

Przedstawiony przegląd niektórych metod wzrostu kryształów (gł. półprzewodników) z fazy roztopionej jest bardzo ogólny.

**Każda z technik wymaga wiele wiedzy i długiego gromadzenia doświadczeń przez zespoły technologiczne.**

Za tydzień:

- podstawy wzrostu domieszkowanych kryształów
- wybrane metody wzrostu kryształów z roztworów

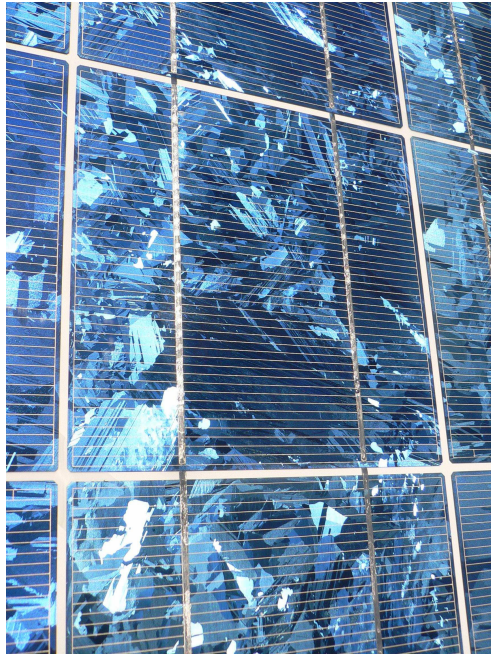
# Fotowoltaika – to pole szybko rośnie !

Baneixama, Hiszpania (uruchomiona w sierpniu 2007)  
– jedna z największych światowych farm fotowoltaicznych (20 MW)



In an area of 500,000 m<sup>2</sup>, 30 million kilowatt hours of clean energy are produced annually.





Multikrystaliczne ogniwo krzemowe,  
- sprawność ok. 10%  
(niska, ale niezbyt drogie,  
obecnie ok. 2 USD / 1 Wat),  
Si otrzymywany „metodami hutniczymi”

monokrystaliczne Si:  
- sprawność do 13-20%

monokrystaliczne Ge/GaAs/GaInP  
wytwarzane epitaksjalnie:  
- sprawność do 40% (2007)  
- zasilają stacje kosmiczne,  
- najwydajniejsze ogniwa naziemne  
wykorzystujące ogniskowanie  
promieniowania słonecznego  
~100-500-krotne  
(CPV- concentrated photovoltaics)