


## Wykład 1 - Wprowadzenie pojęć mikroelektronika, mikrostruktura, podstawowe typy struktur mikroelektronicznych. Wytwarzanie układów mikroelektronicznych. Podstawowe operacje technologiczne w elektronice półprzewodnikowej.

Na podstawie: Waczyński K., Wróbel E., Technologie mikroelektroniczne – metody wytwarzania materiałów i struktur półprzewodnikowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006

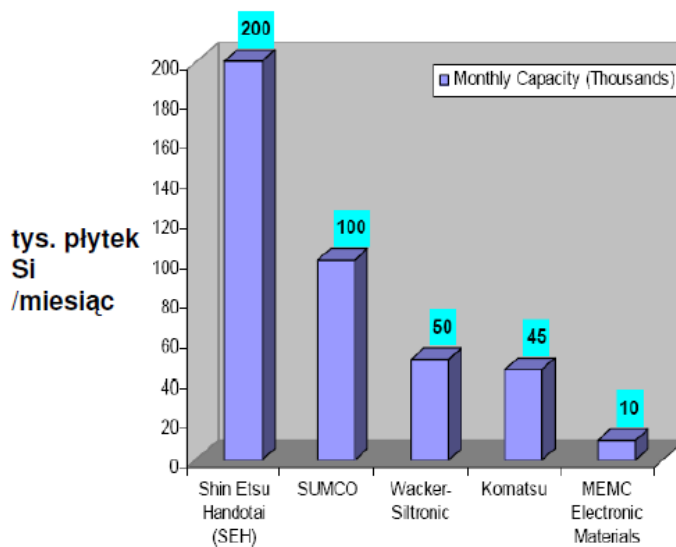

**Mikroelektronika** – dziedzina elektroniki, która zajmuje się procesami produkcji układów scalonych oraz komponentów elektronicznych o bardzo małych rozmiarach. Urządzenia te są produkowane głównie z półprzewodników w technologii krzemowej.

- Wafer Diameters: 200mm or 300mm
- Wafer Thickness: ~650 $\mu$ m
- Wafer Purity: 150 parts/trillion impurities (99.9999999% Si)
- Single Crystal



Sean Cusack  
Eiji Takizawa  
Joyce Tam

Czocharalski Growth of Silicon Wafers  
Slide 3



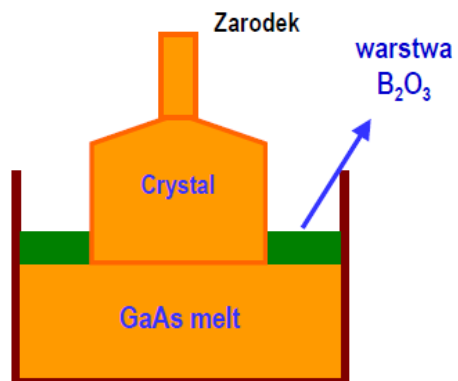
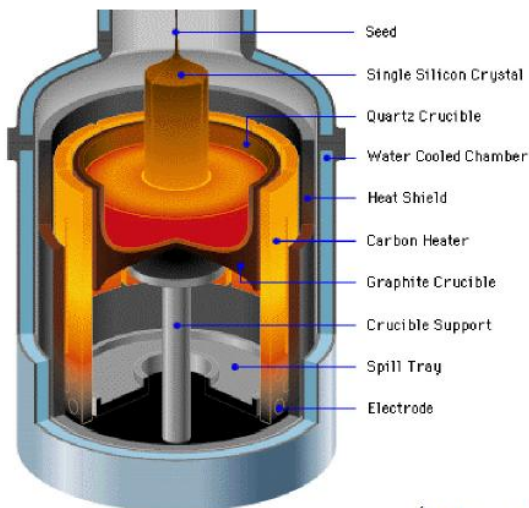
### Cele mikroelektroniki:

- poprawa niezawodności i jakości
- integracja funkcji
- obniżenie kosztów produkcji
- zmniejszenie ciężaru i wymiarów
- miniaturyzacja (rozumiana jako stopień scalenia)

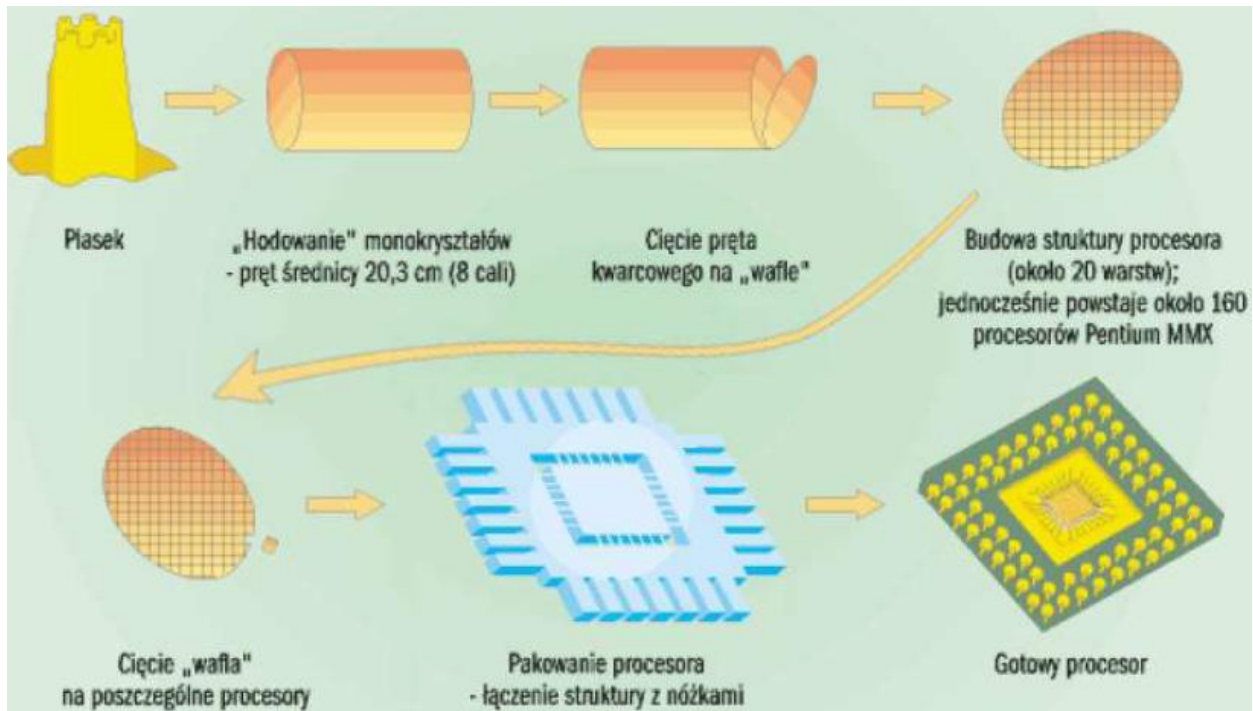
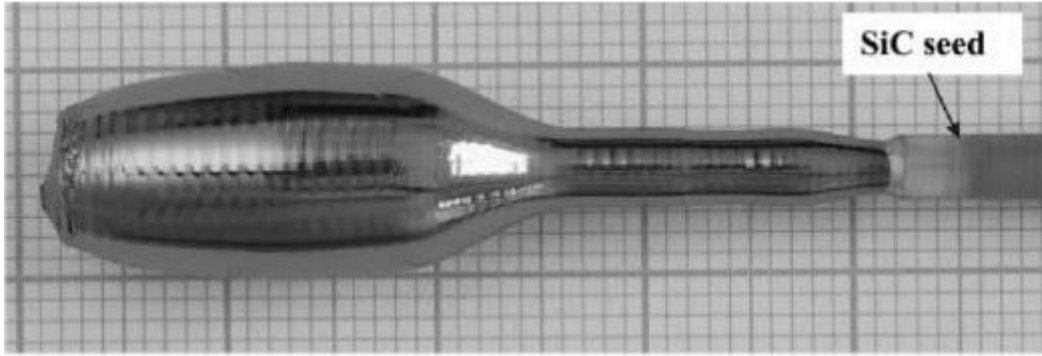


W miarę postępu techniki, rozmiary komponentów mikroelektronicznych ciągle maleją, zaś **ilość tranzystorów podwaja się co około 18 miesięcy (prawo Moore'a)**. W tak małej skali znaczne rozmiary przybierają **zjawiska pasożytnicze**, zaniedbywalne dla większych wymiarów urządzeń. Celem inżynierów mikroelektroników jest znaleźć sposoby na minimalizację lub zniesienie tych negatywnych efektów, przy ciągłej miniaturyzacji i zwiększaniu wydajności układów elektronicznych.

### Fazy produkcji elementów mikroelektronicznych:



Źródło obrazków: SUMCO



- fotolitografia

**Fotolitografia** – proces pochodzący z technologii półprzewodnikowej polegający na odtworzeniu wzorów fotomasek na podłożu np. półprzewodnikowym. Celem wykonywania fotolitografii jest uzyskanie pożądanego kształtu powierzchni. Zasada działania fotolitografii jest podobna do litografii w poligrafii.

Proces fotolitografii jest zazwyczaj wieloetapowy i składa się kolejno z

1. przygotowania powierzchni (odtłuszczenie i wygrzanie),
2. nałożenia emulsji światłoczułej (najczęściej polega to na pokryciu całej powierzchni nierównomierną warstwą emulsji, a następnie poprzez odwirowanie następuje wyrównanie grubości emulsji na całej powierzchni płytki)
3. wygrzewania emulsji (płytkę z nałożoną emulsją wygrzewa się przez pewien czas w suszarce lub na płycie grzewczej)
4. naświetlenia (do płytki z emulsją przykładana jest fotomaska, przez którą naświetla się promieniowaniem ultrafioletowym emulsję światłoczułą). Jako źródła światła używa się zazwyczaj lampy rtęciowej (linia I – 365 nm), bądź lasera ekscymerowego.
5. wywołania (w tym etapie następuje usunięcie części emulsji, w przypadku emulsji pozytywowej następuje usunięcie naświetlonej emulsji w przypadku emulsji negatywowej – nienaświetlonej części, producenci emulsji dostarczają zazwyczaj wywoływacze, których pełny skład jest tajemnicą firmy często jednak zawierają one NaOH)
6. trawienie podłoża lub tworzenie dodatkowych warstw np. metalicznych czy tlenkowych (w miejscach gdzie nie ma emulsji podłoże zostaje wytrawione, lub powstaje dodatkowa warstwa)
7. usunięcie pozostałej emulsji z powierzchni płytki

#### **Metody konkurencyjne:**

- Elektronolitografia
- **Elektronolitografia** - jest obok fotolitografii i rentgenolitografii techniką wykorzystywaną do produkcji zminiaturyzowanych układów elektronicznych na podłożach półprzewodnikowych.
- W tej metodzie zamiast fotonów do uczulania rezystu wykorzystuje się wiązkę elektronów o energii rzędu 20 keV charakteryzującą się znacznie mniejszą długością fali. Główną zaletą tej techniki jest więc wysoka rozdzielczość sięgająca 0,1 nm. Dodatkowo nie trzeba stosować maski, gdyż wiązką elektronów można sterować bezpośrednio za pomocą pola elektrycznego lub pola magnetycznego. Odwzorowanie następuje przez przemiatanie wiązką po określonych rejonach zaprogramowanych w komputerze sterującym. Korekcja elektrostatyczna działa szybciej niż magnetyczna, jest jednak mniej precyzyjna. Wysoka energia elektronów oprócz klasycznych

wzbudzeń prowadzi do rozrywania wiązań C-C, co powoduje zwiększenie rozpuszczalności rezystu. Otrzymanie tak wysokiej precyzji wymaga wprowadzenia dodatkowych elementów kontrolujących centrowanie maski i podłoża. Płytki umieszczane są na stolikach, których położenie kontrolowane jest z dokładnością do ułamków nanometrów za pomocą interferometrów laserowych.

- Ograniczeniem rozdzielczości elektronolitografii są przekrój wiązki elektronowej, rozpraszanie elektronów w podłożu i rezyście oraz wtórne odbicie od warstw rezystu. W zderzeniach generowane są również wtórne elektrony, które penetrują materiał daleko poza naświetlanym obszarem. Ekspozycji towarzyszy również silne rozpraszanie energii mogące częściowo rozkładać rezyst. Problemy te ujawniają się szczególnie przy produkcji struktur periodycznych i naświetlaniu blisko leżących elementów, Wtedy to sumują się bocznie rozproszone elektrony mogące powodować wywołanie rezystu w niechcianych obszarach. Jednym z rozwiązań jest stosowanie elektronów o niskiej energii, jednak wtedy pojawiają się problemy z silnym odpychaniem Coulombowskim elektronów i kolimacją wiązki. Użycie wysokoenergetycznych, głęboko penetrujących elektronów powoduje z kolei znaczne wydłużenie czasów naświetlania. Poważnym ograniczeniem elektronolitografii jest jej szybkość ograniczona prędkością skanowania wiązki. Choć powszechnie stosuje się ją w laboratoriach badawczych w przemyśle elektronicznym wciąż bezkonkurencyjna pod względem szybkości (100 razy szybsza) jest fotolitografia. Ważnym zastosowaniem elektronolitografii jest produkcja masek wykorzystywanych w fotolitografii.
- Rentgenolitografia  
**Rentgenolitografia** jest odmianą procesu litografii wykorzystywanej w technice mikroelektronicznej np. przy produkcji procesorów. Polega ona na użyciu fal o długości od 0,4 do 1 nm czyli promieni rentgenowskich. Jako podłoża masek do rentgenolitografii stosowane są cienkie membrany krzemowe, oraz takie materiały jak tytan, SiC, mylar, poliamidy czy inne, natomiast jako materiał pochłaniający promieniowanie złoto. Podstawową zaletą zastosowania promieni rentgenowskich o długości fali około 800 razy krótszej od fal stosowanych w klasycznej fotoligrafii jest uzyskanie większej rozdzielczości, a co za tym idzie – mniejszego wymiaru charakterystycznego przygotowywanego układu mikroelektronicznego. Zaletami są też stosunkowo krótki czas naświetlania oraz mała wrażliwość na ewentualne pyłki pomiędzy emulsjami maski i płytki. Wady: wytwarzanie masek do rentgenolitografii jest skomplikowanym i wieloetapowym procesem. Poza tym maski są wykonywane ze pomocą innej metody litografii – najczęściej elektronolitografii.
- epitaksja
  - **Epitaksja** (gr. *epi* + *taxis* = na uporządkowanym) – technika półprzewodnikowa wzrostu nowych warstw monokryształu na

istniejącym podłożu krystalicznym, która powiela układ istniejącej sieci krystalicznej podłoża. Opracował ją w 1957 roku N. N. Sheftal z zespołem. Epitaksja pozwala kontrolować domieszkowanie warstwy epitaksjalnej, zarówno typu p jak i n, i jest to niezależne od domieszkowania podłoża.

- Odmianą epitaksji jest **epitaksja z wiązek molekularnych** – technika ta pozwala na nanoszenie warstw krystalicznych o grubości pojedynczej warstwy atomowej. Technika ta jest wykorzystywana w produkcji kropek kwantowych oraz tzw. cienkich warstw.
- Zjawisko epitaksjalnej krystalizacji lodu na jodkach metali jest używane do rozpraszania mgły i wywoływania opadów.

### Rodzaje epitaksji:

- MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) epitaksja z wiązek molekularnych
- MOCVD (*Metal-Organic Chemical Vapour Deposition*) epitaksja ze związków metaloorganicznych
- LPE (*Liquid Phase Epitaxy*) epitaksja z fazy ciekłej
- VPE (*Vapour Phase Epitaxy*) epitaksja z fazy gazowej
- CBE (*Chemical Beam Epitaxy*) epitaksja z wiązki chemicznej

- domieszkowanie

**Domieszkowanie** – wprowadzanie obcych jonów/atomów do sieci krystalicznej metalu, półprzewodnika lub materiału ceramicznego tworzących roztwory stałe. Domieszkowanie stosowane jest w celu modyfikacji wybranych właściwości materiału np.: optyczne, elektryczne, magnetyczne czy mechaniczne. Ilość wprowadzanej domieszki nie przekracza zazwyczaj kilku procent atomowych (kilka atomów domieszki na 100 atomów sieci macierzystej).

### Rodzaje domieszkowania:

W zależności od stosunku ilości elektronów walencyjnych domieszki do ilości elektronów walencyjnych podstawianego jonu/atomu rozróżnia się domieszkowanie:

- donorowe – jony/atomy wprowadzanej domieszki charakteryzują się wyższą wartościowością niż jon/atom podstawiany; w ten sposób w paśmie energii wzbronionej powstaje pasmo donorowe położone poniżej dna pasma przewodnictwa;
- akceptorowe – jony/atomy wprowadzanej domieszki charakteryzują się niższą wartościowością niż jon/atom podstawiany; w ten sposób w paśmie energii wzbronionej powstaje pasmo akceptorowe położone powyżej krawędzi pasma walencyjnego,

- jonami o tej samej wartościowości.
- wytrawianie

**Nanoelektronika** – termin odnoszący się do komponentów elektronicznych (zwykle tranzystorów) opartych na strukturach nanometrowych. Przy tak małych rozmiarach ogromne znaczenie mają efekty kwantowe takie jak zjawiska spinowe, tunelowanie kwantowe oraz niepodzielność i dyskretność stanów elektronowych.

Obecnie dostępne mikroprocesory mają tranzystory rozmiaru 22 nm. Postęp w produkcji może zostać zahamowany z powodu fundamentalnych ograniczeń fizyki. Poniżej 10 nm zjawiska kwantowe oraz niemożliwość stosowania fotolitografii w procesie produkcji powodują konieczność użycia technik nanoelektroniki. Problemy te można zaobserwować w harmonogramie wprowadzania nowych procesów technologicznych. Przez ostatnie dekady średnio co 3 lata zmniejszono proces technologiczny dwukrotnie (patrz prawo Moore'a). Szacuje się, że przejście do 11 nm zajmie następne 4 lata.

**Spintronika, (elektronika spinowa, magnetronika)** jest odmianą elektroniki. Podczas gdy w tradycyjnych układach scalonych nośnikiem informacji są zmiany w przepływie prądu, w spintronice brany jest pod uwagę również spin elektronu.

W konwencjonalnych układach elektronicznych elementem aktywnym (czynnym) jest na ogół ładunek elektronu, chociaż w niektórych przypadkach spin elektronu odgrywa pewną rolę jako źródło ferromagnetyzmu, to jednak rola ta jest drugorzędna. Spintronika stwarza nowe perspektywy pojawienia się możliwości konstrukcji elementów elektronicznych z zaplanowaną strukturą spinową (np. tzw. komputerów kwantowych).

W spintronice spin elektronu jest aktywnym elementem na równi z jego ładunkiem elektrycznym. W szerszym znaczeniu spintronika obejmuje także również dziedzinę informatyki kwantowej oraz problemy związane z kwantowymi obliczeniami wykorzystującymi spin elektronu. Spintronika jest to nowa gałąź tzw. elektroniki mezoskopowej, która wyłoniła się stosunkowo niedawno i jest w początkowej fazie swojego rozwoju.

**Mikrostruktura** - subtelna, nadcząsteczkowa struktura materii, występująca w wielu ciałach stałych, mieszaninach i ciekłych kryształach.

Mikrostruktura przejawia się w istnieniu domen różnych faz fizycznych, które mogą posiadać najróżniejsze kształty i między którymi występują wyraźne granice fazowe. Często rozmiary domen są na tyle małe, że na pierwszy rzut oka substancje posiadające mikrostrukturę wydają się zupełnie "lite". Domeny te tworzą rodzaj "mozaiki", którą można obserwować i analizować przy pomocy np.

metod mikroskopowych. Mikrostruktura ma bardzo silny wpływ na rozmaite własności fizyczne materiałów (mechaniczne, elektryczne, optyczne, reologiczne), które mają decydujący wpływ na ich praktyczną zastosowalność i dlatego stanowi przedmiot intensywnych badań.

Olbrzymia większość materiałów z jakimi ma się do czynienia na co dzień posiada mniej lub bardziej złożoną mikrostrukturę. Np. w metalach występują domeny krystaliczne poprzedzielane domenami amorficznymi. Podobna sytuacja ma też miejsce w przypadku wielu tworzyw sztucznych, szkła i wielu minerałów. Szczególnie złożone i bardzo regularne mikrostruktury są obecne w wielu materiałach naturalnych takich jak drewno czy włókna naturalne.

Mikrostruktura tworzy się z trzech zasadniczych powodów:

- niemieszalności składników tworzących materiał,
- "zablokowania" przemian fazowych, w wyniku czego w tym samym materiale, nawet jednorodnym chemicznie, występują na raz dwie fazy fizyczne,
- powstawania wiązań chemicznych (np. wiązanie wodorowe) między powierzchniami różnych składników

przy czym wszystkie te czynniki mogą mieć miejsce jednocześnie, w tym samym materiale.

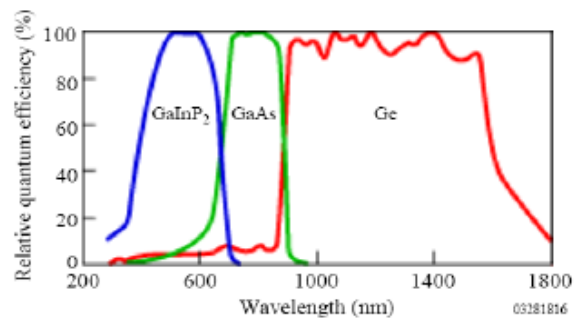
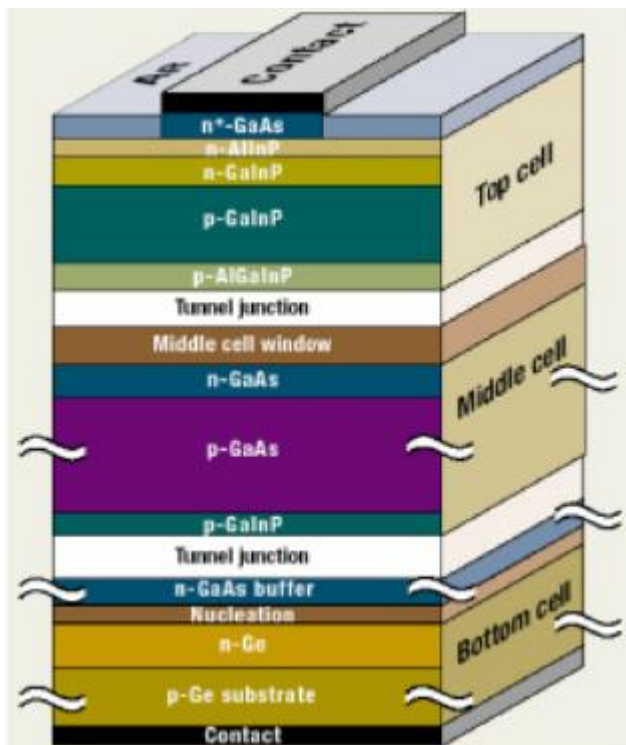


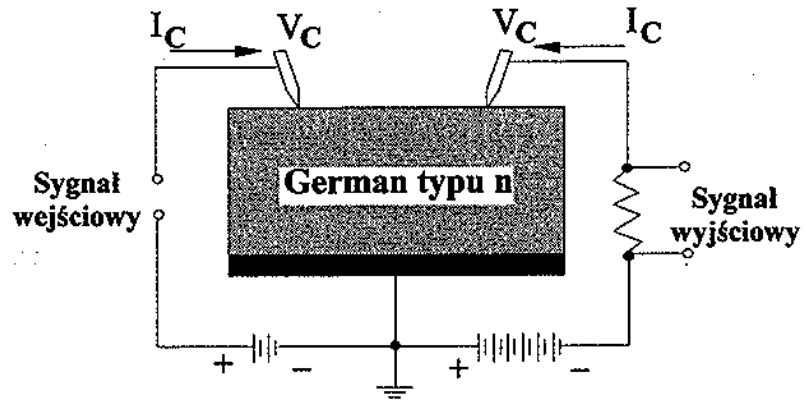
Figure 19. Quantum efficiency of each layer of the GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell.



1823 – Berzelius – odkrycie krzemu, 1853 – Deville – hodowla pierwszych kryształów  
1886 – Winkler - odkrycie germanu, 1895 – Lorentz – pojęcie elektronu swobodnego  
1897 – Thomson – doświadczalne potwierdzenie, 1904 – Fleming – dioda próżniowa,  
1911 – Rutherford – model atomu, 1912 – Millikan – pomiar ładunku elektronu, 1913 –  
model atomu wodoru, 1925-1933 – pierwsze patenty nt. wykorzystania materiałów  
półprzewodnikowych, 1948 – Bardeen, Brattain – tranzystor typu A (ostrzowy, MESA),  
1950 – Shockley – konstrukcja tranzystora złączonego bipolarnego, 1952 – teoria  
tranzystora unipolarnego, 1956 – Tannanbaum i Thomas – opis podwójnej dyfuzji  
domieszek donorowych i akceptorowych do krzemu, 1957 – Frosh i Derick – tlenek  
krzemu do maskowania – fotolitografia, 1959 – konstrukcja tranzystora planarnego,  
1960 – tranzystor epitaksjalno-planarny (epiplanarny) – cienkie monokrystaliczne  
warstwy osadzone na monokrystalicznym podłożu – znaczne obniżenie rezystancji  
szeregowej kolektora. Dalej lepsza kontrola grubości warstwy SiO<sub>2</sub> i bardziej  
precyzyjne sterowanie profilem koncentracji domieszek – wytwarzanie tranzystorów  
w.cz., 1959-1961 – Kilby, Noyce – układy scalone – dyskretne struktury  
półprzewodnikowe, wytworzone w jednej płytce krzemowej, łączy się siecią cienkich,  
metalowych ścieżek poprowadzonych na powierzchni krzemu, 1960 – tranzystor MOS  
(niestabilność napięcia progowego – jony Na, Li, K), 1963 – pierwsz układy CMOS –  
bardzo niski statyczny pobór mocy, duża odporność na zakłócenia, duża szybkość  
przełączania, wysoka gęstość upakowania, 1964 – wytworzenie układów scalonych  
PMOS, 1967 – układy scalone CMOS, 1968 – układy scalone NMOS. 1967 – tranzystor  
NMOS – metal, azotek krzemu, tlenek krzemu, półprzewodnik – struktury  
wykorzystujące zjawisko trwałego magazynowania ładunku, zmagazynowana  
informacja nie jest tracona po wyłączeniu zasilania, 1971 – tranzystor z bramką  
krzemową (Floating Gate Memory Transistor). 1969-1970 – przyrządy ze sprzężeniem  
ładunkowym CCD (Charge-Coupled Devices) – magazynowanie ładunków w studniach  
potencjału, tranzystor DMOS – Double Diffused MOS Transistor – 10GHz, tranzystor  
VMOS – specyficzny kształt wyżłobienia wytrawionego anizotropowo w krzemie o  
orientacji <111>. 1964 – technologia SOS (Silicon on Sapphire) – doskonale  
odizolowane wysepki krzemowe, technologia SOI (Silicon on Insulator) – struktura  
zrealizowana w monokrystalicznej warstwie krzemu (wzrost szybkości działania).

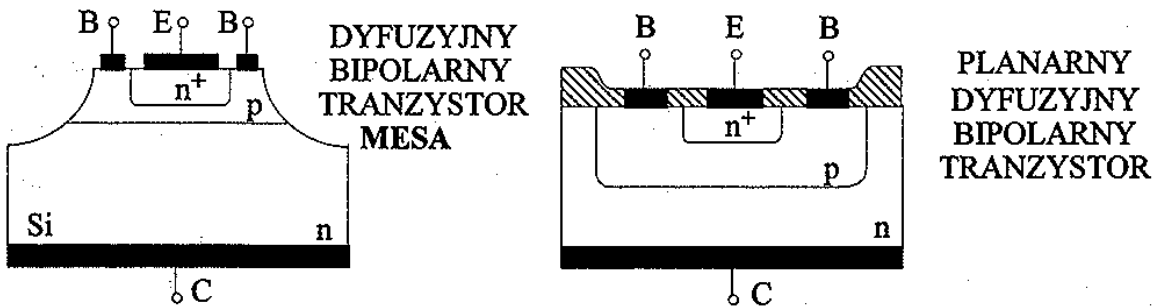
I tu pojawiają się ograniczenia w stosunku do krzemu: nowe materiały z grupy A<sub>III</sub>B<sub>V</sub> –  
GaAs oraz InP, stop Si-Ge (lepsze własności elektryczne)

Rysunki struktur...



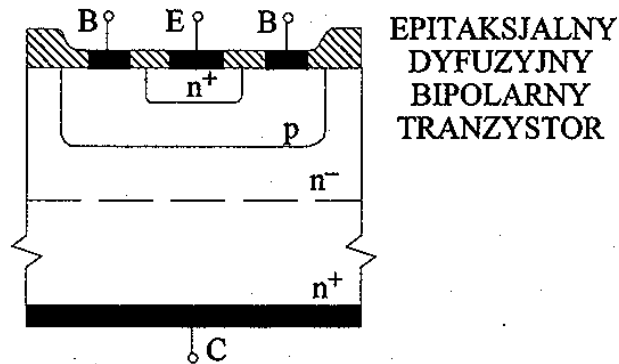
*Struktura pierwszego tranzystora*

Rys. 1



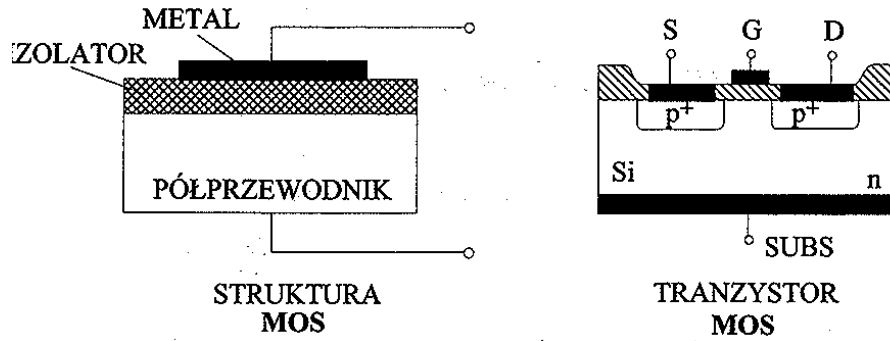
*Rys. 1.2. Porównanie konstrukcji dyfuzyjnego tranzystora MESA oraz planarnego dyfuzyjnego tranzystora bipolarnego*

Rys. 2



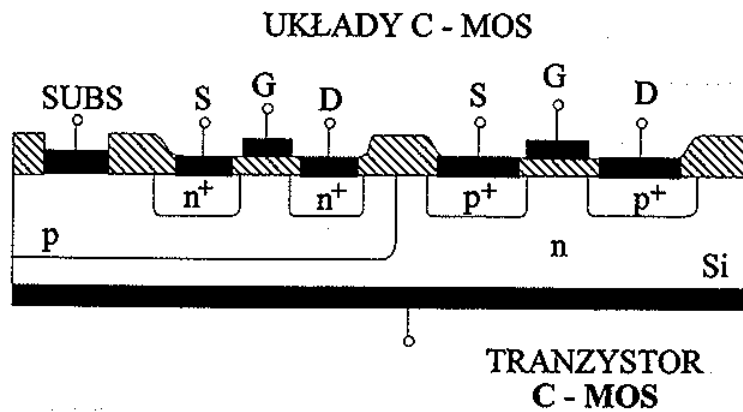
*Epitaksjalny dyfuzyjny bipolarny tranzystor*

Rys. 3



Struktura MOS - podstawowy element konstrukcyjny tranzystora MOS. Wzorowano na [Piotr.85, Run.98, Pr.zb.80]

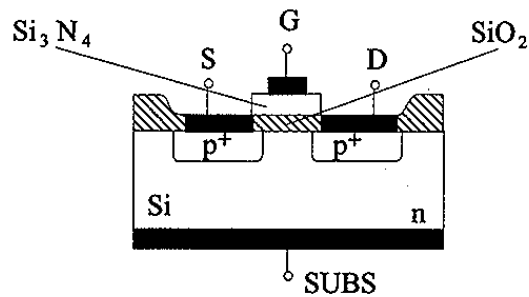
Rys. 4



Układ C - MOS: S (source) - źródło, D (drain) - dren, G (gate) - bramka

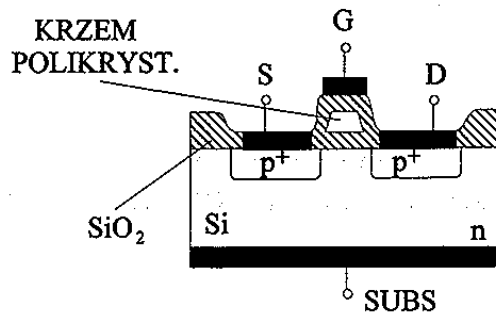
Rys. 5

**TRANZYSTOR MNOS**  
(METAL - AZOTEK - TLENEK - PÓLPRZEWODNIK)



Rys. 6

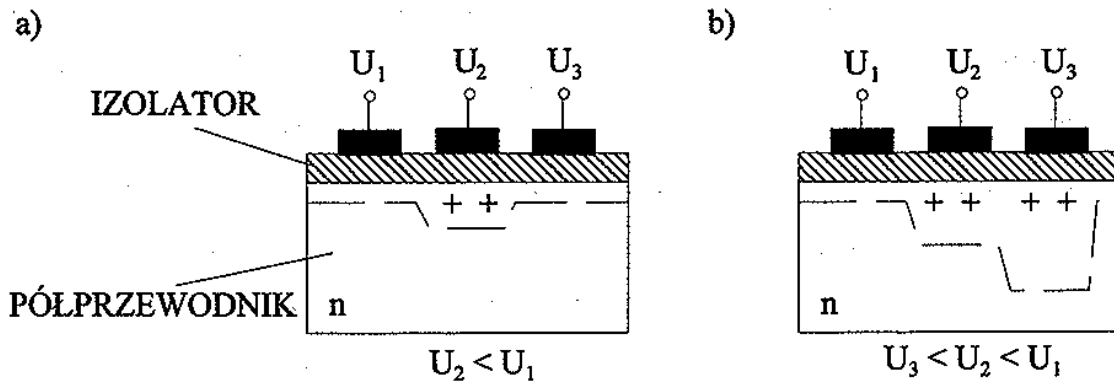
TRANZYSTOR MOS Z BRAMKĄ KRZEMOWĄ



Tranzystor z bramką krzemową

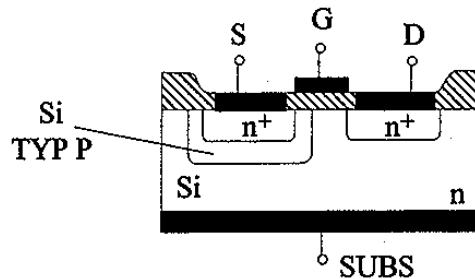
Rys. 7

PRZYRZĄDY ZE SPRZĘŻENIEM ŁADUNKOWYM



Rys. 8

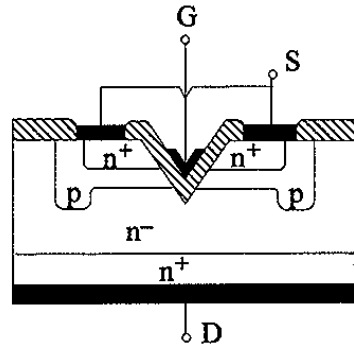
TRANZYSTOR D - MOS  
(DOUBLE DIFFUSED MOS TRANSISTOR)



Tranzystor D - MOS

Rys. 9

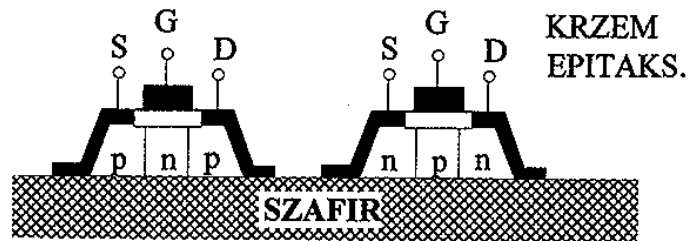
## TRANZYSTOR VMOS



Tranzystor V-MOS

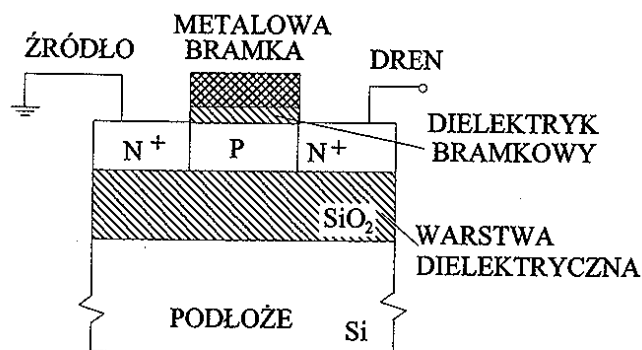
Rys. 10

## TRANZYSTORY SOS (SILICON ON SHAPHIRE)



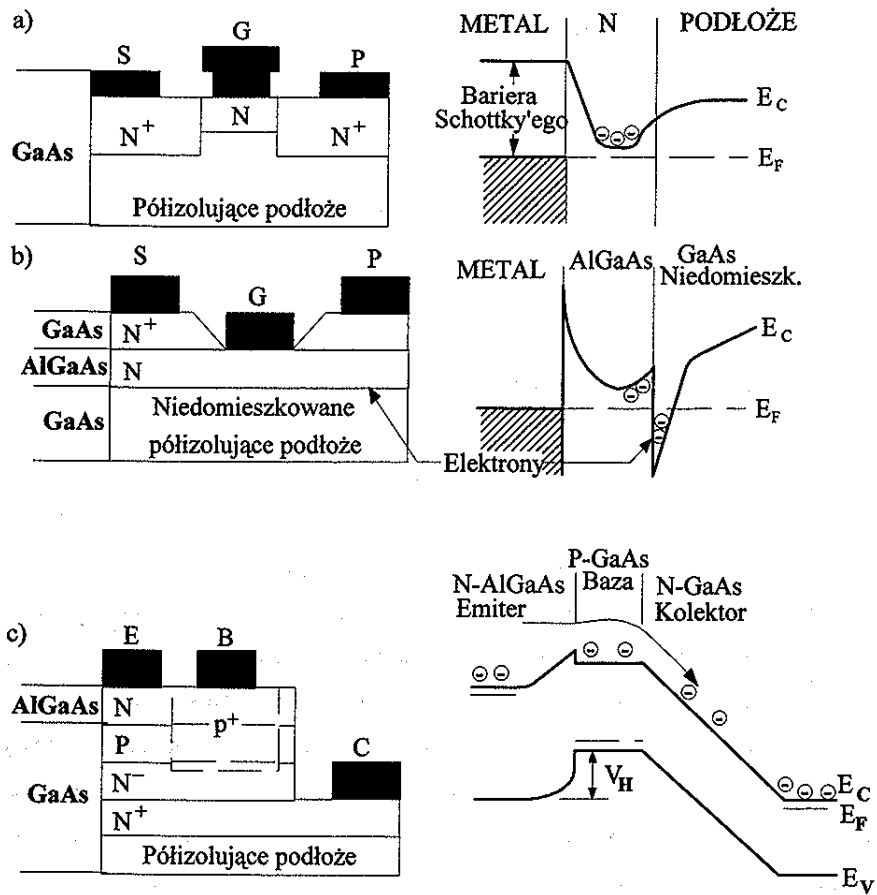
Układy SOS (Silicon-on-Sapphire)

Rys. 11



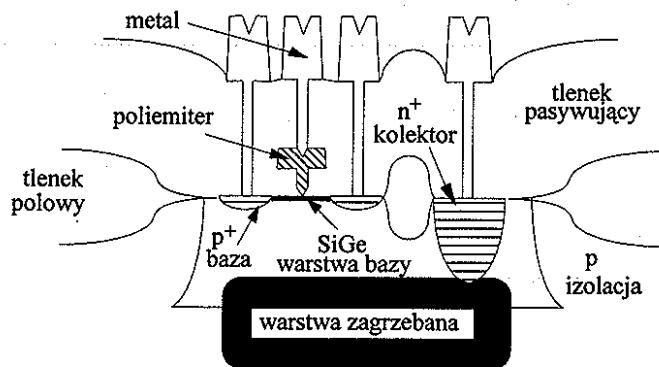
Przekrój poprzeczny przez strukturę SOI

Rys. 12



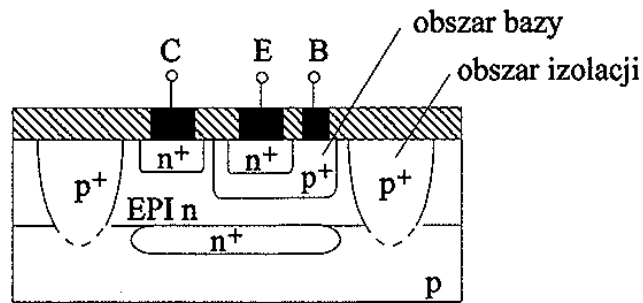
Tranzystory wytwarzane z arsenku galu: S - źródło, G - bramka, D - dren, E - emiter, B - baza, C - kolektor, a) tranzystor MESFET, b) tranzystor HEMT (High Electron Mobility Transistor), c) tranzystor bipolarny HBT (Heterostructure Bipolar Transistor)

Rys. 13



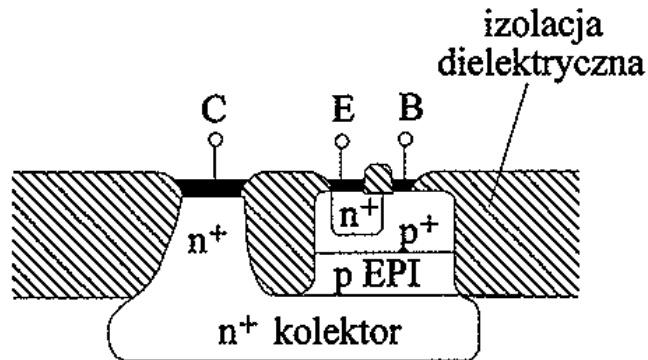
Konstrukcja heterozłączowego tranzystora bipolarnego wykonanego z Si - Ge. Wzorowana na [Voin.89]

Rys. 14



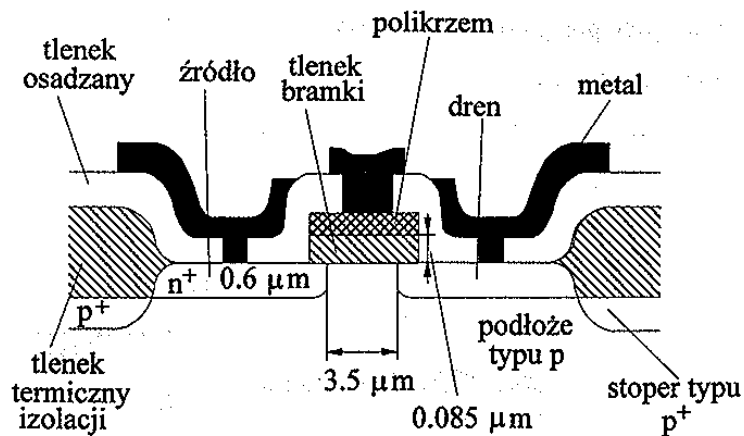
Struktura tranzystora bipolarnego wykonanego technologią epitaksjalno – planarną. Wg [Web.79]

Rys. 15



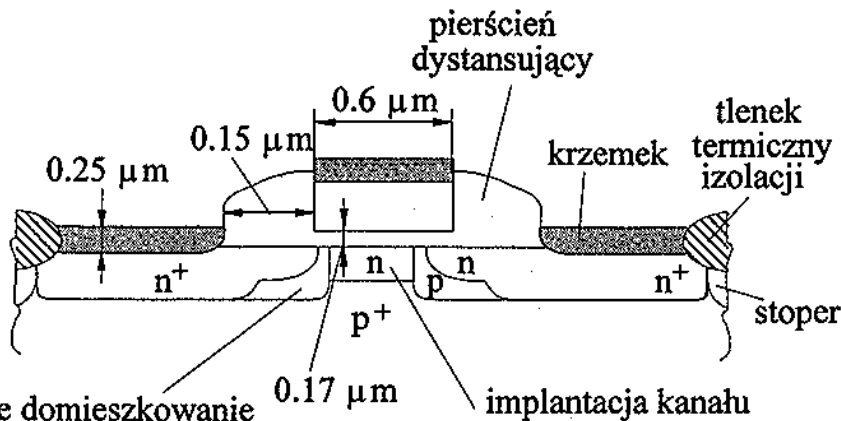
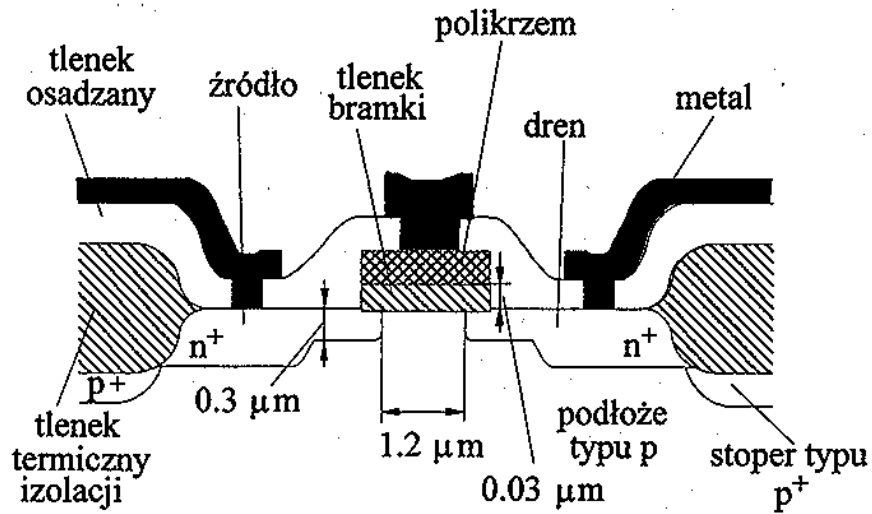
Struktura tranzystora bipolarnego n-p-n z izolacją dielektryczną. Wg [Web.79]

Rys. 16



Przekrój klasycznego tranzystora MOS. Wzorowano na [Krył.86]

Rys. 17



dodatkowe domieszkowanie w otoczeniu źródła i drenu (jama źródła i drenu)

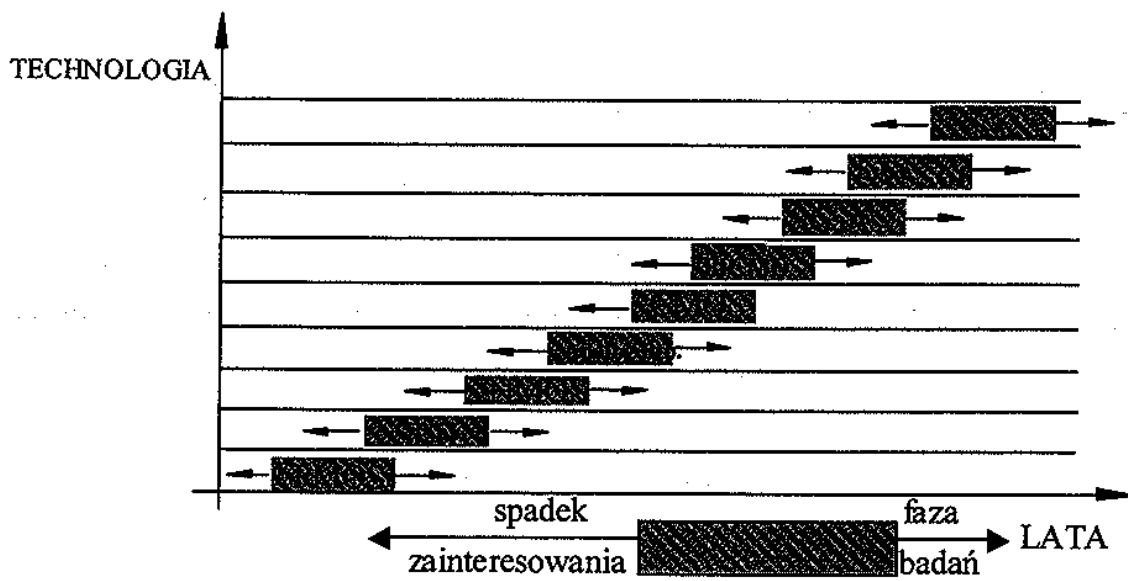
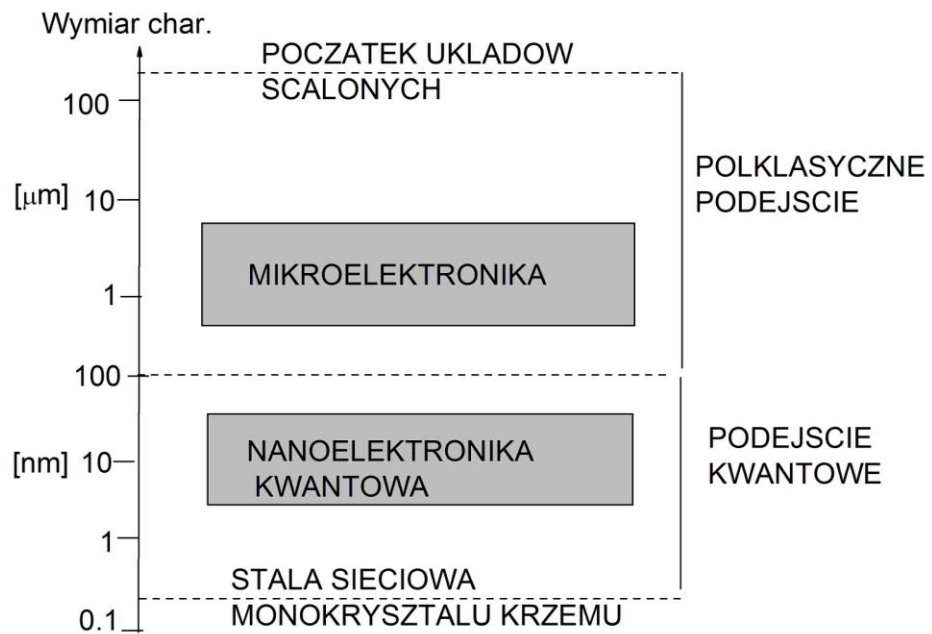
Przekroje tranzystorów MOS używanych w układach VLSI o regułach projektowania poniżej  $2\mu\text{m}$ . Wzorowano na [Krył.86]

Rys. 18

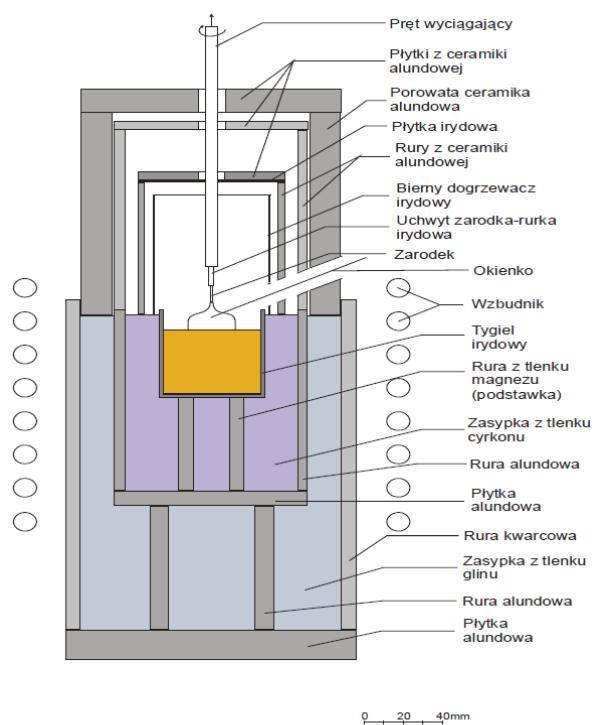
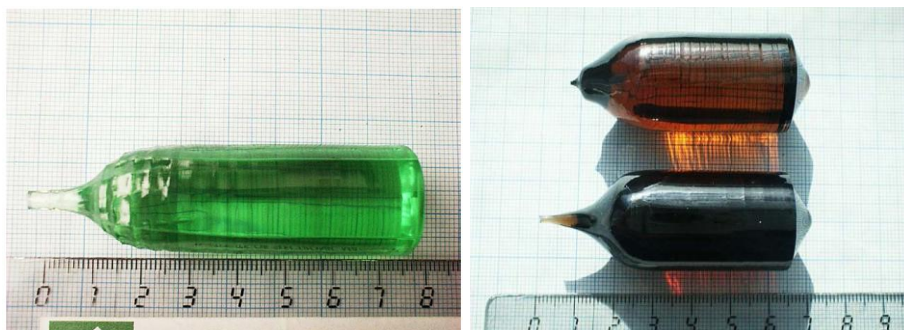
Prognozy rozwoju technologii wytwarzania struktur MOS. Wzorowano na [www.intel.com]

Parametr	Realizowane				Bliskie realizacji		Prognozy	
	500	180	130	100	70	50	35	25
Długość bramki [nm]	500	180	130	100	70	50	35	25
Napięcie [V]	5	1.8	1.3	1.0	0.7	0.5	0.35	0.25
Grubość tlenku [nm]	10	3.5	2.2	1.5	1.0	0.7	0.5	0.35

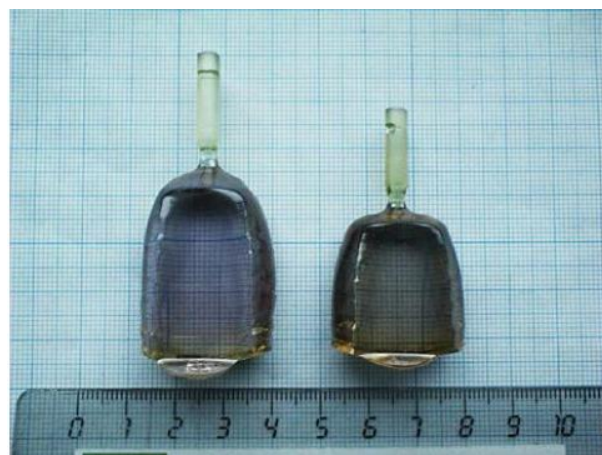




## Materialy: ITME



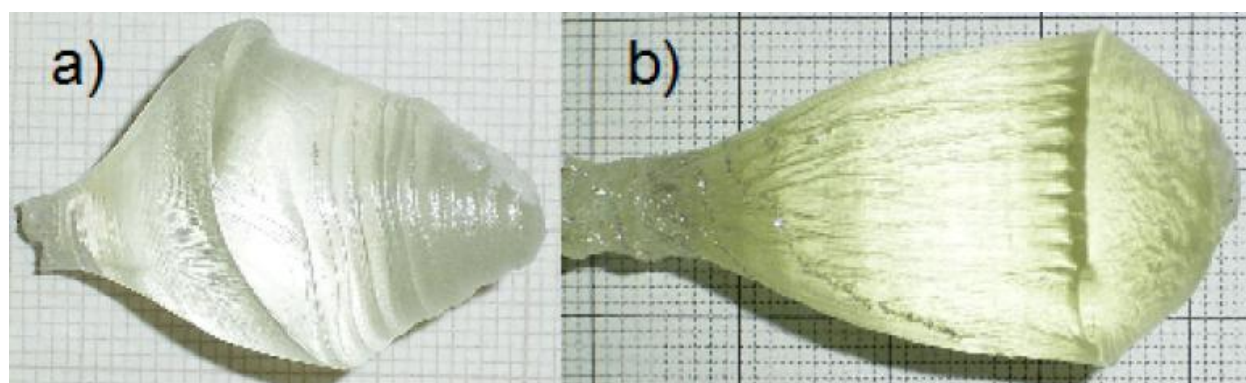
Rys. 1 Schemat cieplnego układu krystalizacji YAG



YVO<sub>4</sub>



GdCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>



Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>:Dy, Lu<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>:Dy