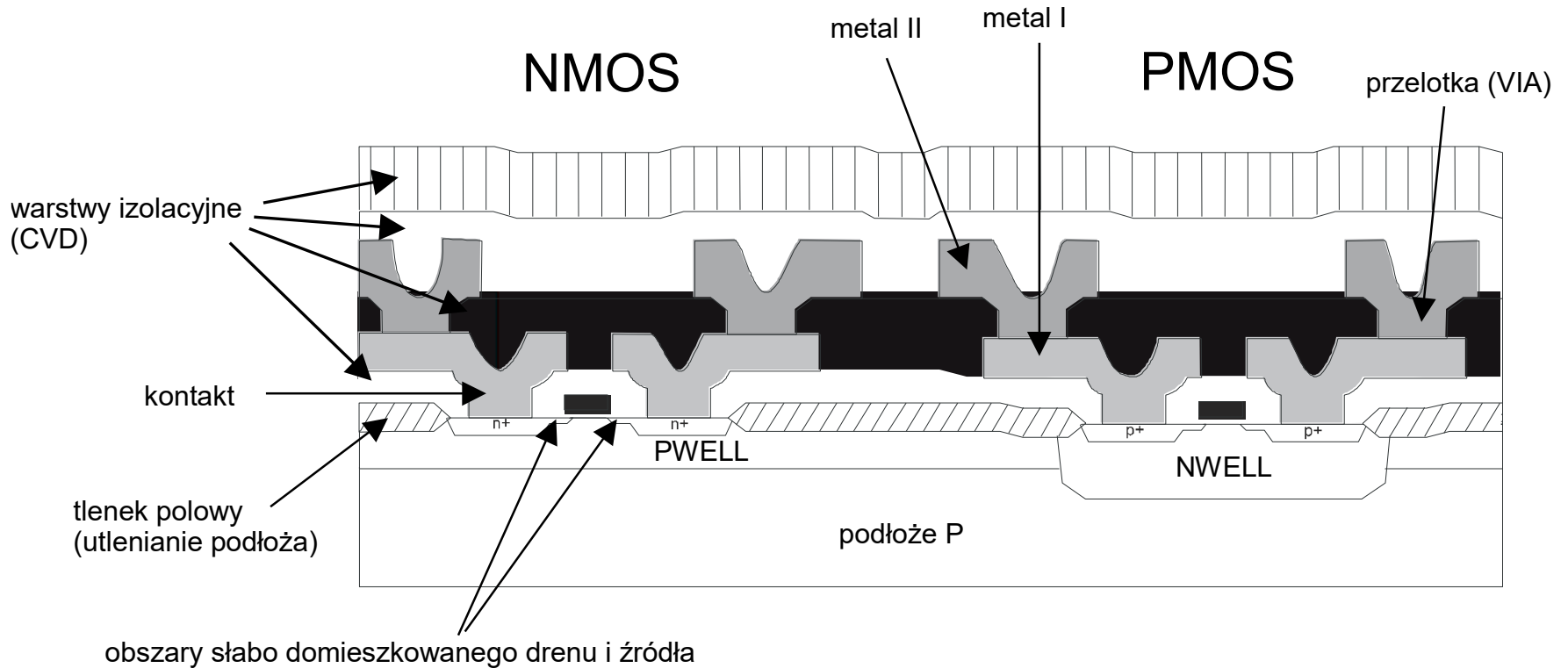
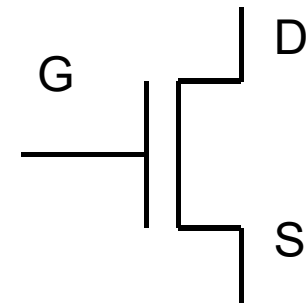
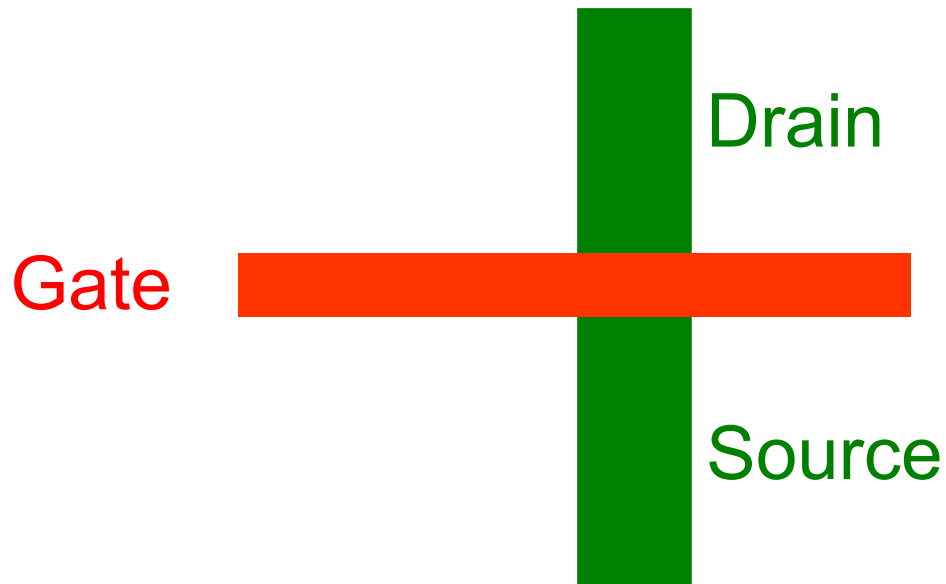


Struktura CMOS

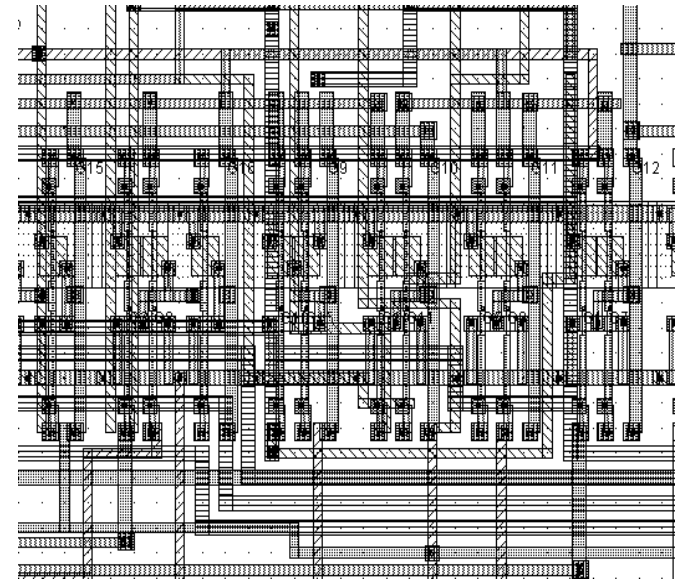
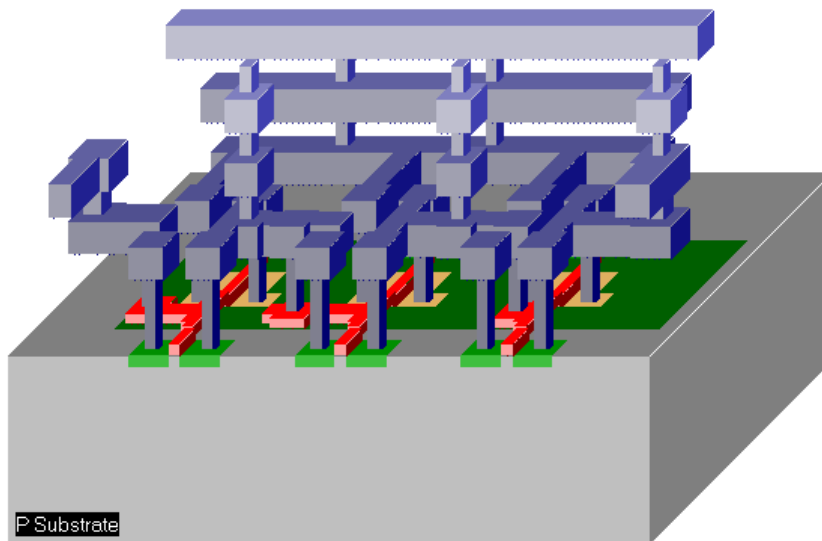


Tranzystor MOS

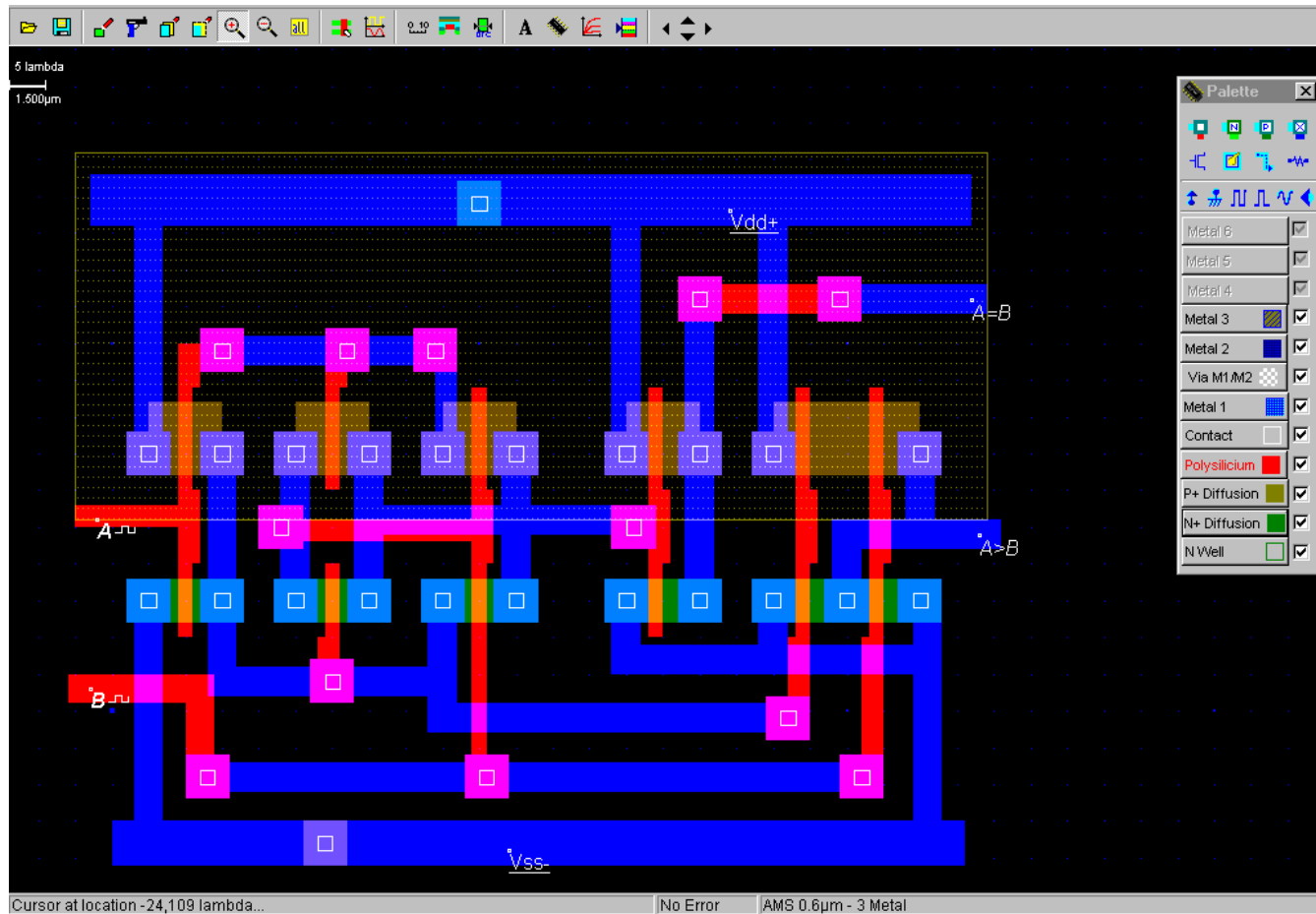
powstaje w układzie scalonym zawsze gdy nastąpi przecięcie ścieżki polikrzemowej z warstwą dyfuzji



Wytworzone maski stanowią matrycę, która pozwala na powielanie struktury układu na całej powierzchni płytki krzemowej

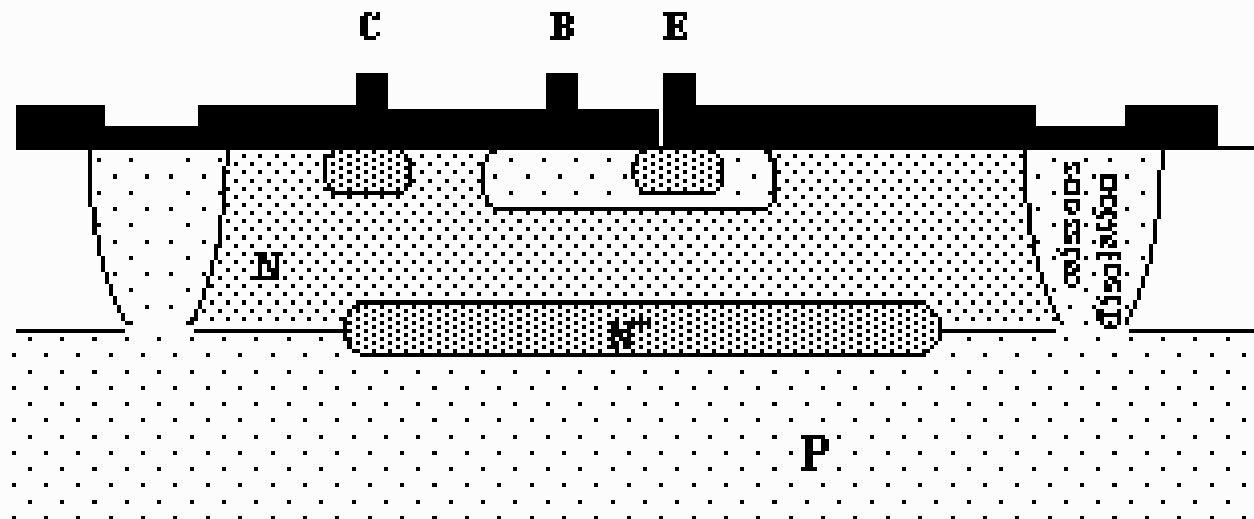


Projekt masek układu scalonego w programie Microwind



Technologia planarna

Wszystkie końcówki elementów wyprowadzone na jedną, płaską powierzchnię płytki półprzewodnikowej



Operacje technologiczne

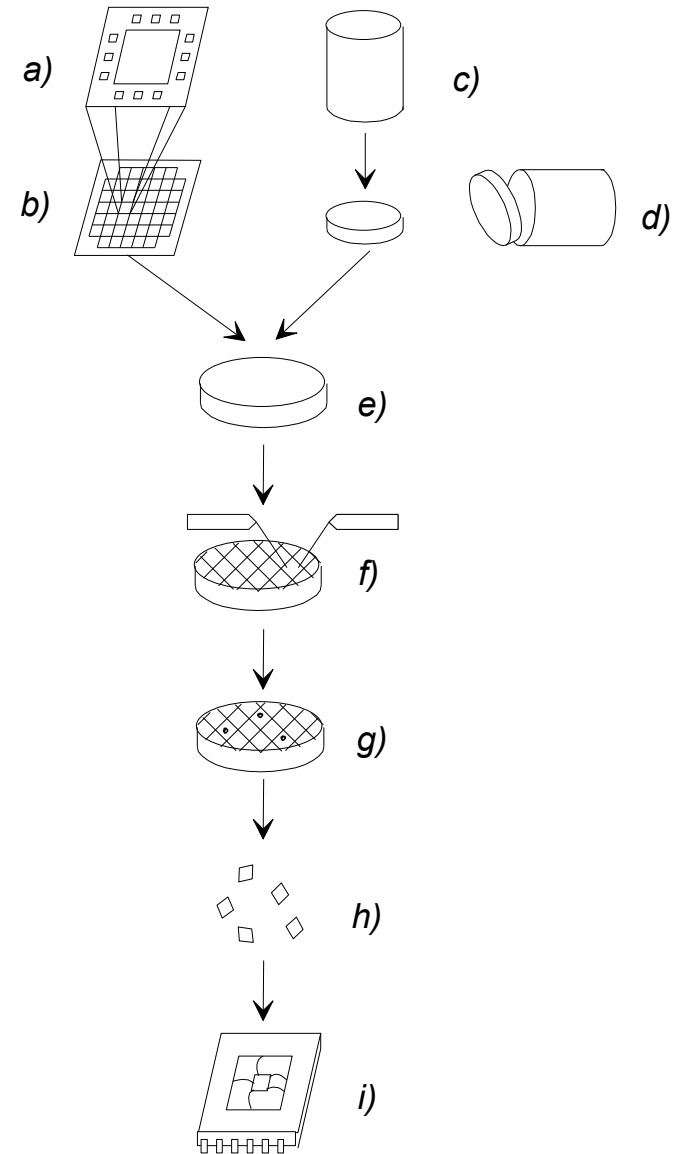
initial oxide
first nitride deposition
NTUB mask
well etch (nitride)
NTUB implant
well oxidation
self aligned P-well implant
well drive-in
pad oxide
second nitride deposition
active area mask
active area etch (nitride)
N-field mask
N-field implant
field oxide
sacrificial oxide
Vt adjust implant
gate oxide
poly1 deposition

high-resistive implant
high-resistive mask
poly1 doping
capacitor oxide
poly2 deposition
poly2 doping
poly2 mask
poly2 etch
poly1 mask
poly1 etch
N-LDD mask
N-LDD implant
P-LDD implant
spacer formation
N+ implant mask
N+ implant
P+ implant mask
P+ implant
S/D anneal

BPSG deposition/reflow
contact mask
contact etch
plug implant mask
plug implant / anneal
barrier deposition
metal1 deposition
metal1 mask
metal1 etch
IMD / planarization
via mask
via etch
metal2 deposition
metal2 mask
metal2 etch
passivation deposition
pad mask
pad etch
alloy
back side grinding

Technologia krzemowa

- (a, b) wytwarzanie masek
- (c, d) wytwarzanie płytek krzemowych
- (e) wytwarzanie elementów i połączeń
- (f) testowanie ostrzowe
- (g) selekcja płytek
- (h) cięcie płytki
- (i) montaż

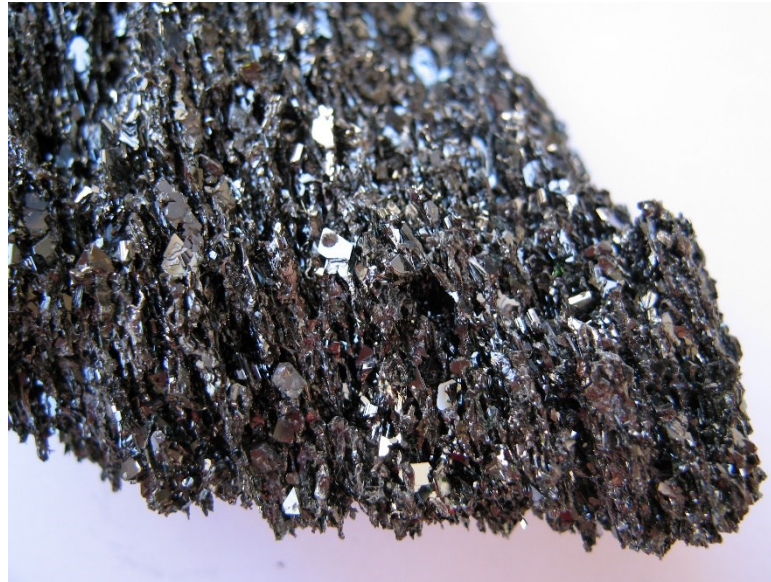


Wytwarzanie płytek krzemowych

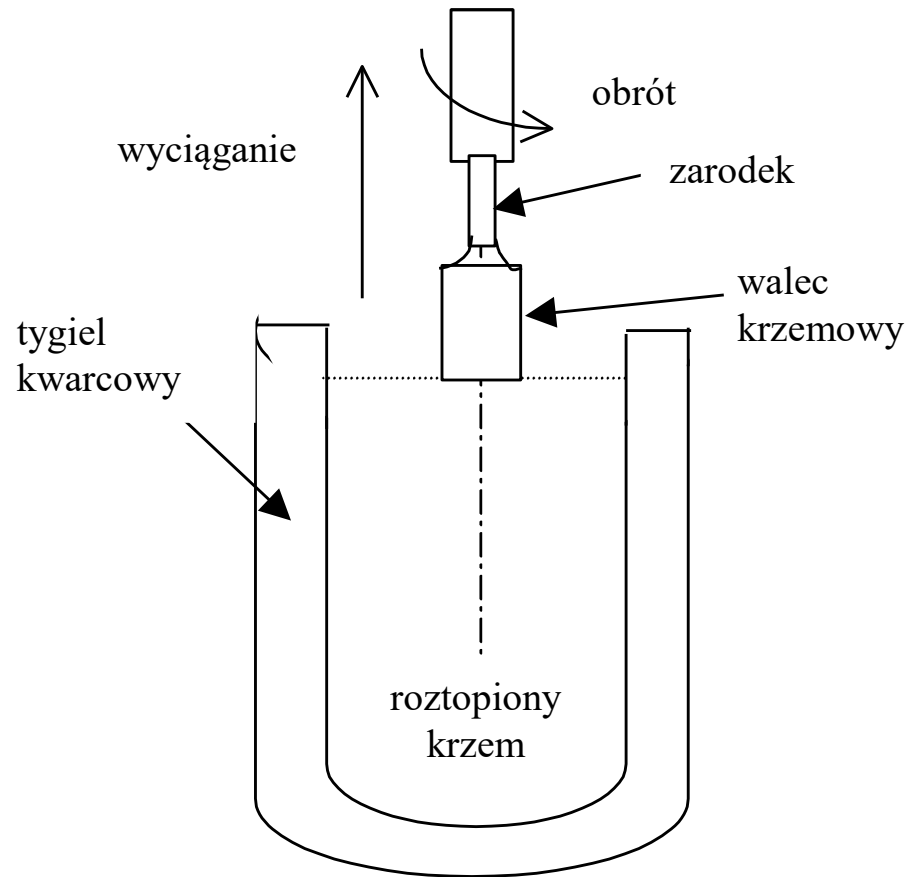
- wytworzenie krzemu polikrystalicznego
- wytworzenie monokryształu krzemu
- cięcie
- polerowanie mechaniczne i chemiczne
- czyszczenie
- kontrola
- pakowanie i wysyłka

Czysty krzem

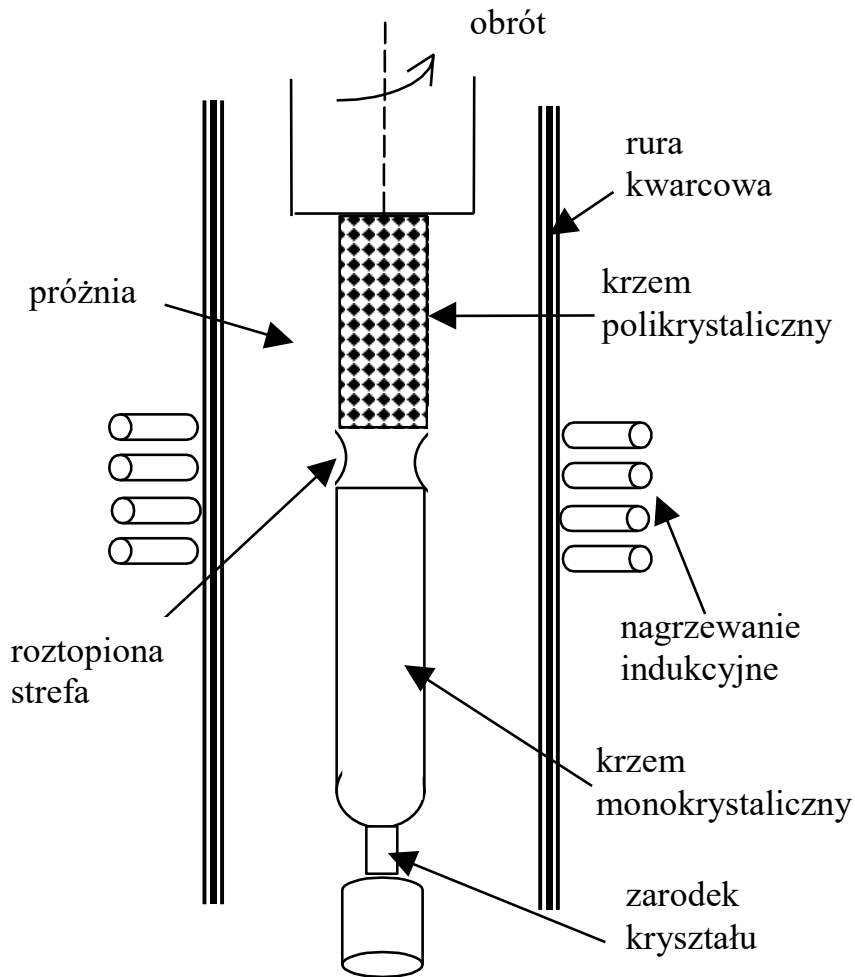
Koncentracja atomów zanieczyszczeń mniejsza niż 10^{13} atom/cm³
(jeden atom zanieczyszczenia na 10 miliardów atomów krzemu lub
99.9999999% zawartości krzemu)



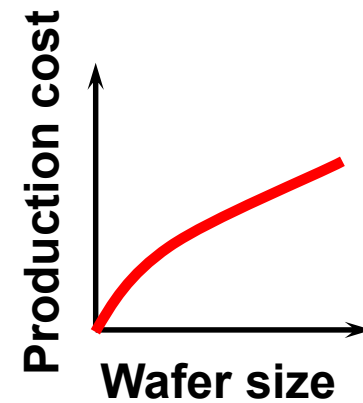
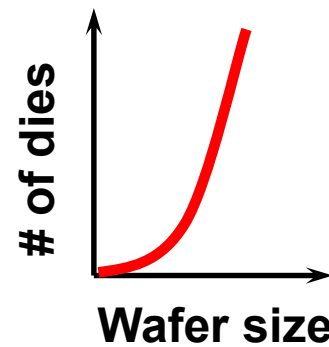
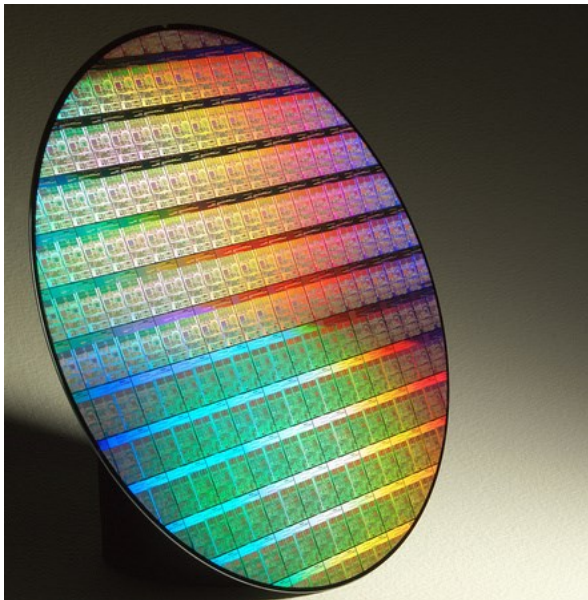
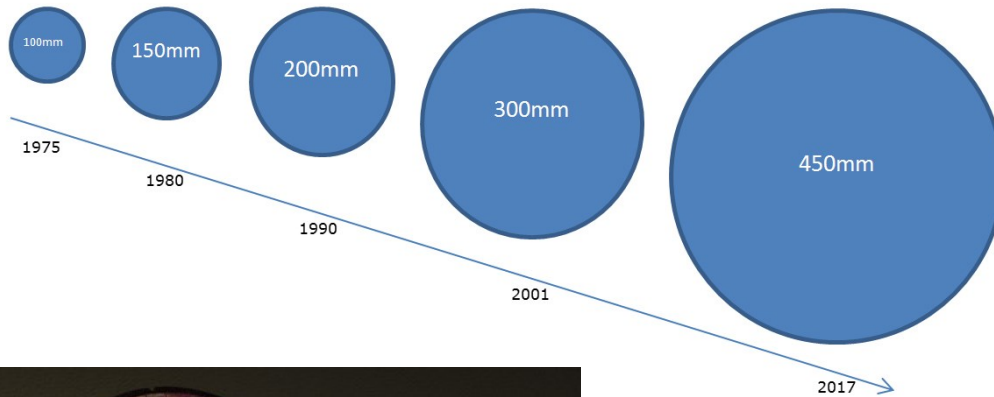
Metoda Czochralskiego



Wytapianie strefowe

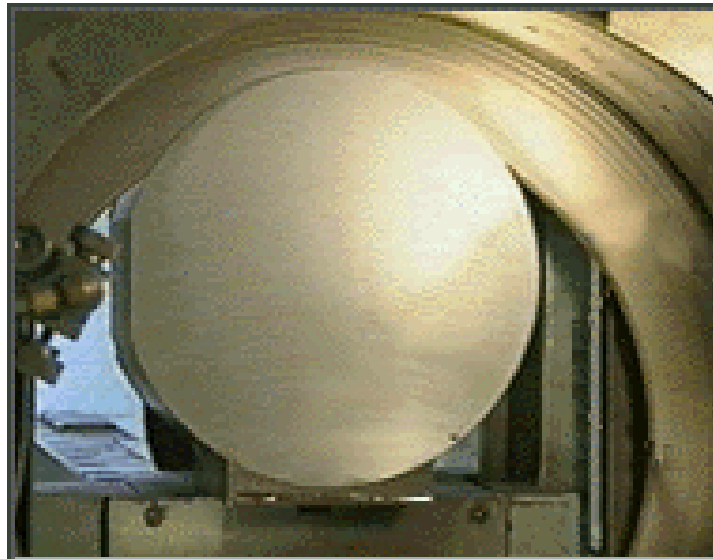


Średnica płytki krzemowej



Cięcie

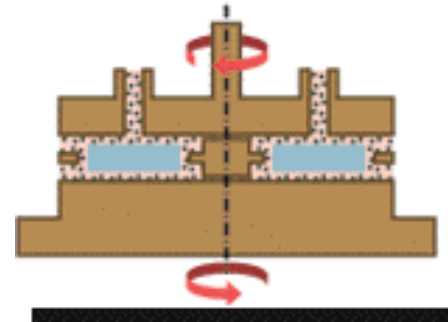
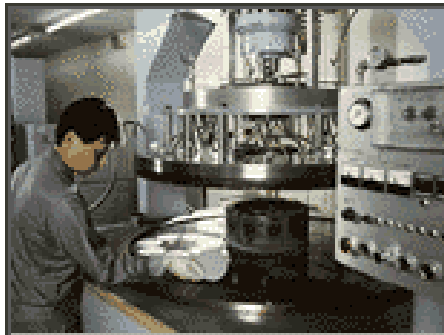
za pomocą specjalnej piły z ostrzem diamentowym na płytce o grubości ok. 0.5-1.0 mm. Tak pocięte płytki mają silnie uszkodzoną powierzchnię.



Polerowanie mechaniczne

Płytki poddawane są procesowi polerowania powierzchni, który ma na celu:

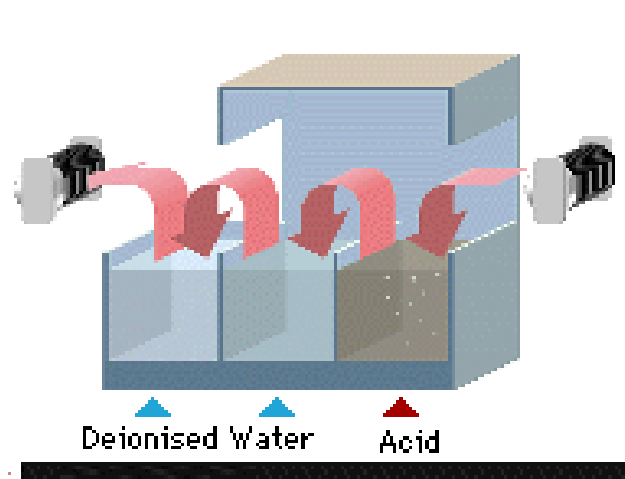
- usunięcie krzemu uszkodzonego na odciętej powierzchni
- wytworzenie idealnie płaskiej powierzchni, jaka jest niezbędna do przeprowadzenia na niej procesu fotolitografii.
- polepszenie równoległego położenia krawędzi płytki.



Polerowanie chemiczne

Po operacji polerowania mechanicznego płytki są poddane trawieniu w celu usunięcia mikropęknięć i innych uszkodzeń mechanicznych.

Do celów trawienia używa się mieszaniny kwasu azotowego i octowego lub wodorotlenku sodu.



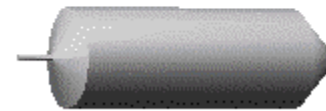
1. Polycrystalline Silicon



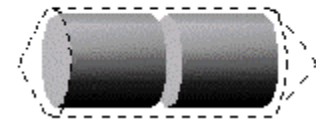
2. Crystal Growth



3. Single Crystalline Silicon Ingot



4. Shaping



5. Single Crystalline Silicon Ingot



6. Slicing



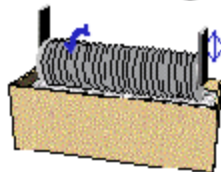
7. Edge Rounding



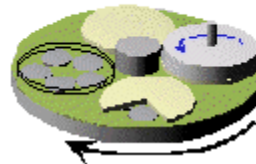
8. Lapping



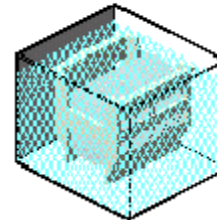
9. Etching



10. Polishing



11. Cleaning



12. Inspection



13. Packaging



14. Shipping



Wytwarzanie elementów i połączeń

- Zmiana właściwości materiału lub nałożenie nowej warstwy
- Fotolitografia
- Trawienie

Zmiana właściwości materiału

- Domieszkowanie w drodze dyfuzji
- Domieszkowanie przez implantację jonów
- Utlenianie podłoża

Domieszkowanie w drodze dyfuzji

- Temperatura 800 - 1200°C
- Bor, fosfor lub arsen z fazy gazowej
- Dyfuzja wertykalna i lateralna

Domieszkowanie w drodze dyfuzji

Dyfuzja w ciele stałym jest to ruch atomów w sieci krystalicznej na skutek różnej ich koncentracji w różnych obszarach sieci.

Temperatura 800 – 1200 [°C]

(im temperatura jest większa tym dyfuzja jest szybsza)

Dwa etapy procesu dyfuzji

W zależności od sposobu dostarczania atomów domieszki (bor, fosfor lub arsen z fazy gazowej) rozróżniamy:

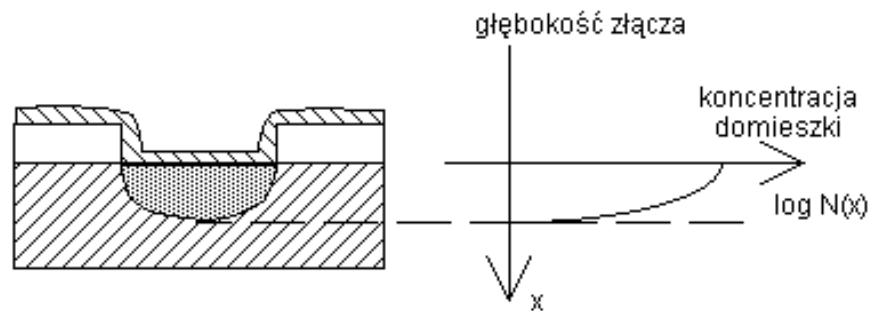
Dyfuzję ze źródła nieskończonego

Ciągłe, nieograniczone dostarczanie atomów do powierzchni podłoża, co prowadzi do osiągnięcia stałej koncentracji atomów na powierzchni podczas procesu.

Dyfuzję ze źródła skończonego

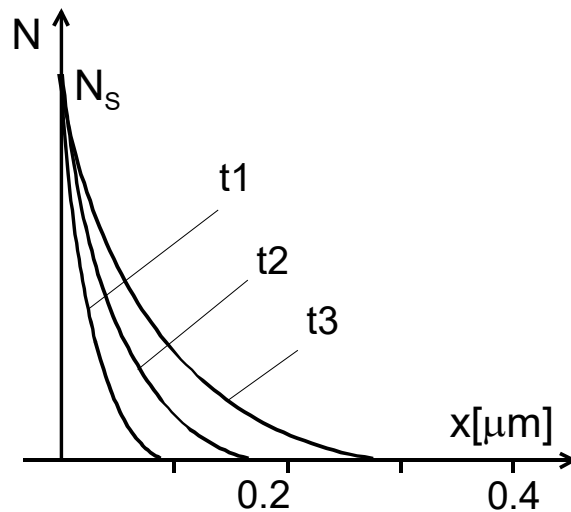
Całkowita liczba atomów w podłożu i na powierzchni jest stała, a dyfundujące atomy ubywają z powierzchni w głąb podłoża.

Profil domieszkowania

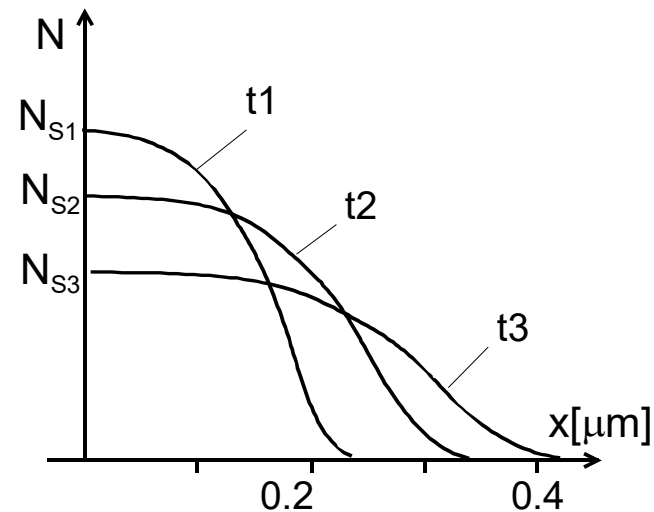


Dyfuzja ze źródła

nieskończonego



skończonego



Domieszkowanie podłoża

Może się odbywać ze źródeł stałego, ciekłego oraz gazowego

Proces dyfuzji przebiega dwuetapowo:

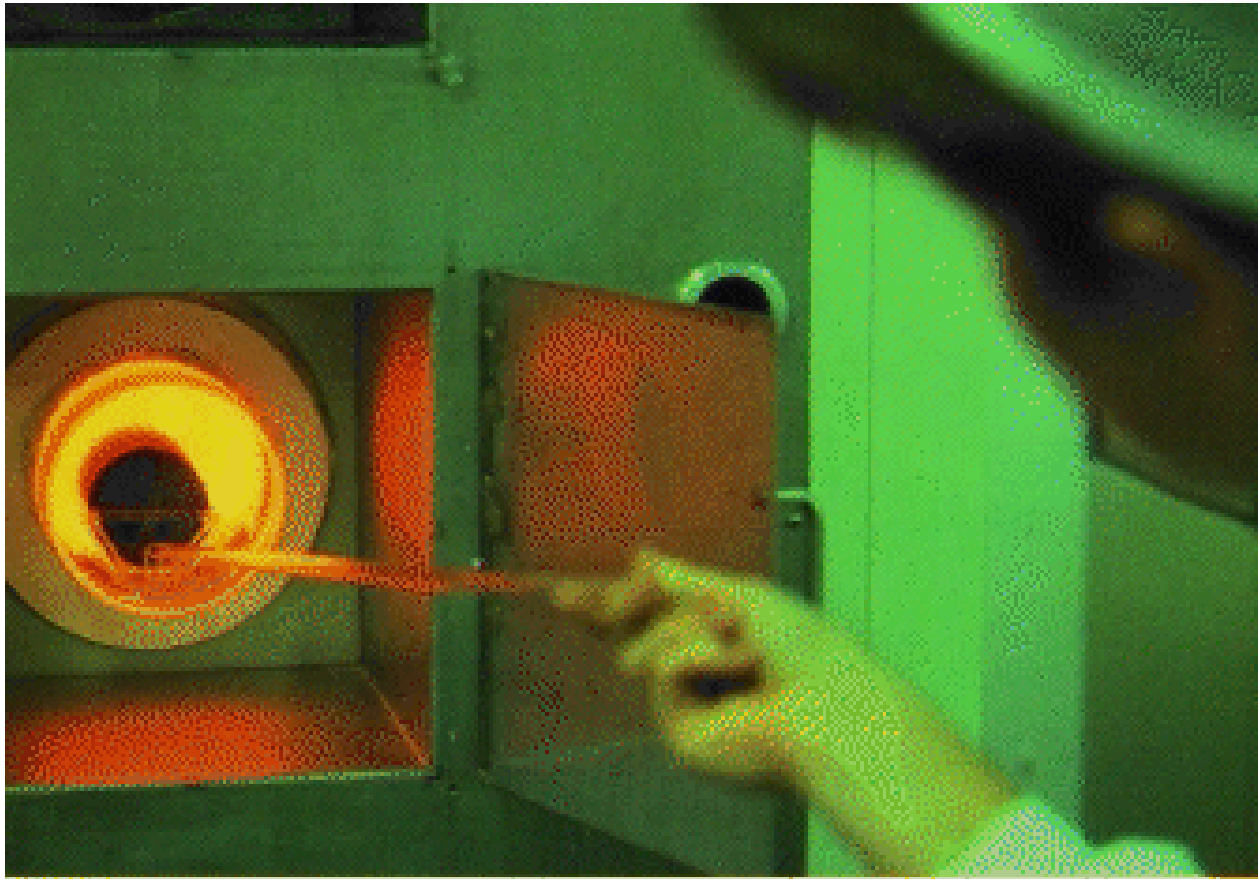
predyfuzja

wytworzenie na płytkach podłożowych tlenku domieszki odpowiada modelowi dyfuzji ze źródła nieskończonego do osiągnięcia odpowiedniej dozy domieszki na powierzchni podłoża oraz w jego wnętrzu,

redyfuzja domieszki

reakcja tlenku domieszki z krzemem - powstaje tlenek krzemu oraz wolne atomy domieszki, które dyfundują w głąb podłoża.

Piec dyfuzyjny



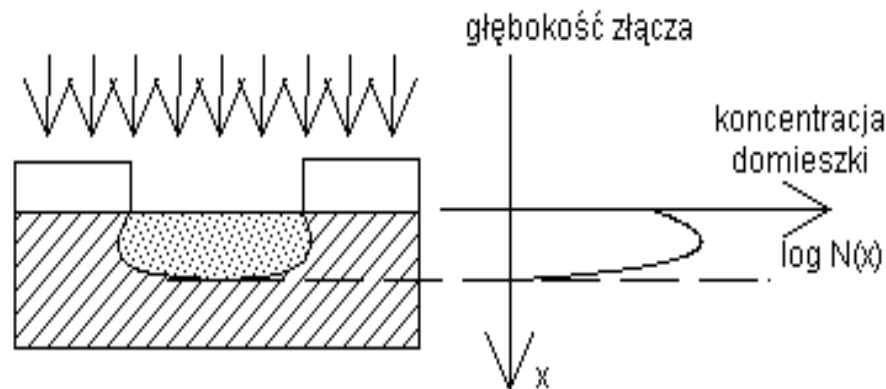
Domieszkowanie przez implantację jonów

Polega na tzw. wbijaniu przyspieszonych jonów domieszki w polu elektrycznym w materiał podłoża

- Jony domieszek rozpędzone w polu elektrycznym
- Energia jonów: kilkaset keV
- Wąski profil domieszkowania
- Uszkodzenie struktury siatki krystalicznej
- Konieczność wygrzewania
- Późniejsza dyfuzja domieszek
- Duża dokładność dawki

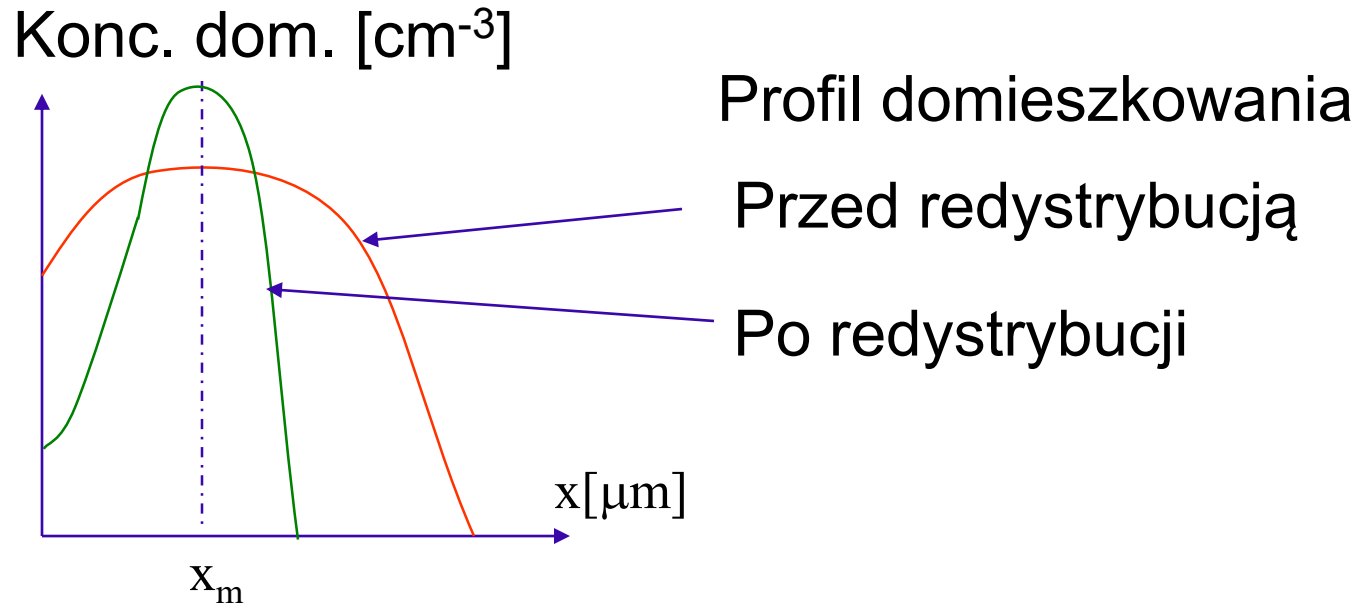
Co wpływa na proces implantacji

- masa jonu,
- energia jonów,
- orientacja krystalograficzna podłoża względem padającej wiązki jonów



Wyidealizowany profil domieszkowania przy implanatacji jonów

Wygrzewanie



Energia jonów i ich typ określają średnią głębokość wnikania i profil domieszkowania (\sim rozkład Gaussa)

Clean Room implantator jonów



Wytwarzanie warstwy dwutlenku krzemu SiO_2



Utlenianie 

- Termiczne w suchym tlenie
- Termiczne w parze wodnej

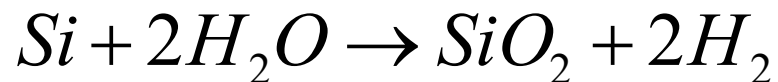
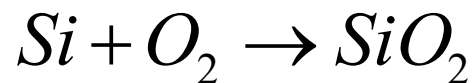
Metoda CVD
wyższe warstwy izolacyjne

Utlenianie podłoża

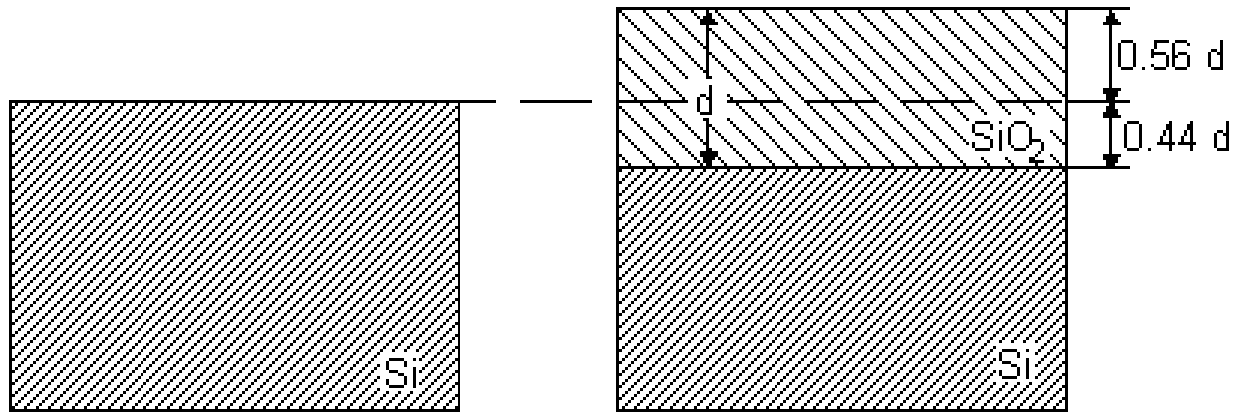
Grubość tlenku [nm]	Zastosowanie warstwy	Podstawowa metoda wytwarzania
2 - 6	tlenki tunelowe	utlenianie termiczne w suchym tlenie
15 - 50	tlenki bramkowe oraz kondensatorowe	utlenianie termiczne w suchym tlenie
20 - 50	tlenki "podkładowe" w technologii LOCOS	utlenianie termiczne w suchym tlenie
200 - 500	tlenki maskujące oraz pasywujące powierzchnię	utlenianie termiczne w parze wodnej lub CVD
300 - 1000	tlenki polowe	utlenianie termiczne w parze wodnej

Utlenianie podłoża

- Temperatura 950 - 1150°C
- Zużywane podłoże (44% grubości tlenku)
- Szybkość zależy do ciśnienia i temperatury
- Suche lub mokre:



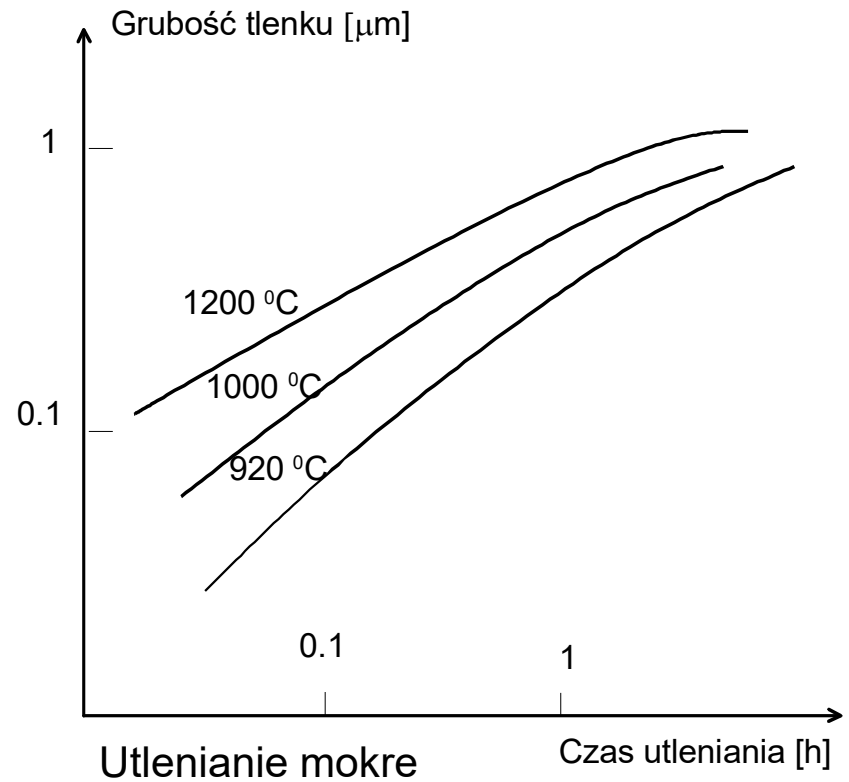
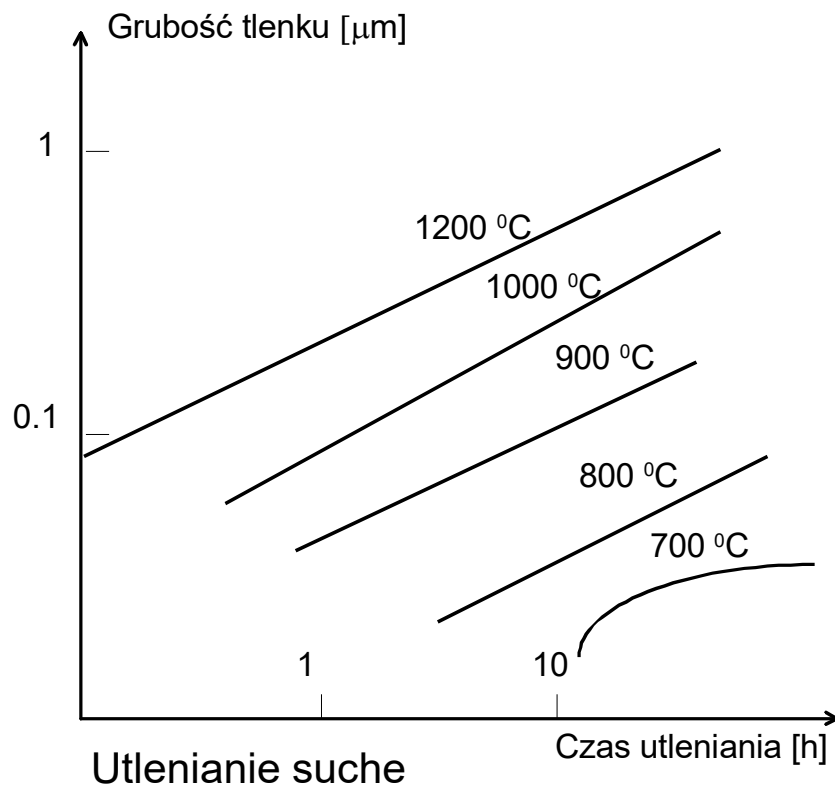
Zużywanie podłoża w wyniku utleniania termicznego krzemu



Najważniejsze parametry procesu utleniania to:

- temperatura utleniania,
- czas trwania procesu,
- skład chemiczny gazu utleniającego,
- ciśnienie tlenu w reaktorze,
- orientacja krystalograficzna podłoża krzemowego.

Eksperymentalnie mierzona charakterystyka wzrostu suchego tlenku krzemu dla różnych temperatur i przy różnym ciśnieniu



Nakładanie warstwy tlenku

Tlenki pasywujące i zabezpieczające
można otrzymać tylko metodą
nakładania



Reakcja chemiczna w atmosferze gazowej

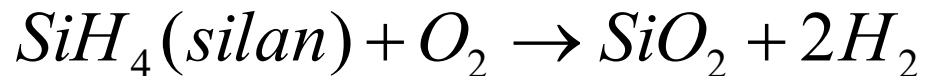
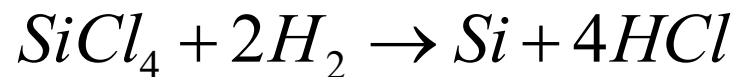
Nanoszenie nowych warstw

Metodami osadzania wytwarza się warstwy

- dielektryczne,
 - monokrystaliczne,
 - polikrystaliczne
 - warstwy metali trudno topliwych.
-
- Chemical Vapour Deposition (CVD)
 - Low Pressure
 - Plasma Enhanced
 - Physical Vapour Deposition (PVD)

Chemical Vapour Deposition

- Epitaksja
950 - 1250 °C
- Krzem polikrystaliczny
- Azotek krzemu
300 °C PECVD, 700 °C LPCVD
- Dwutlenek krzemu
450-600 °C



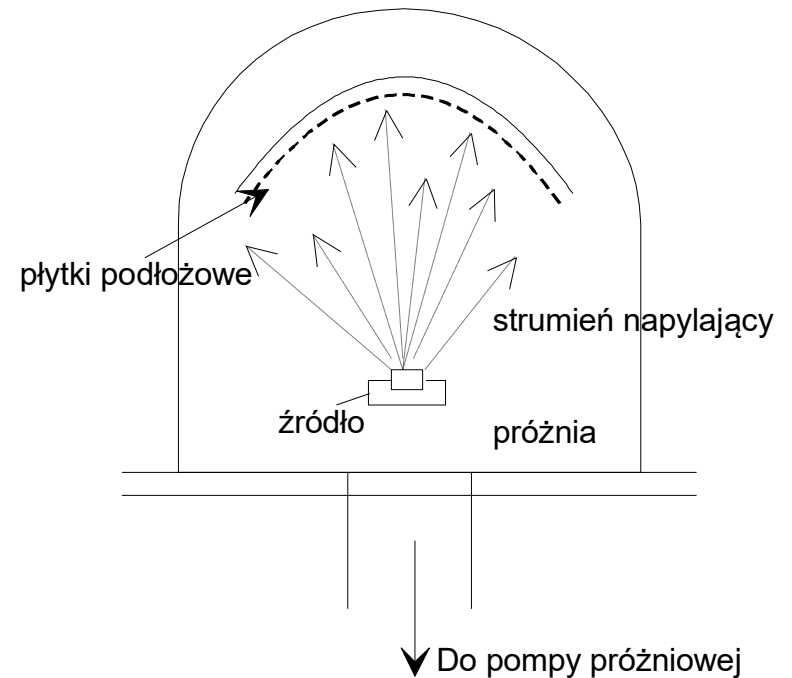
Epitaksja

Szczególny proces osadzania chemicznego z fazy lotnej

- nakładanie cienkiej warstwy półprzewodnika o grubości 3-30 μm na podłożu monokrystalicznym jako przedłużenie sieci krystalicznej podłoża.
- Możliwy inny typ domieszki

Physical Vapour Deposition

- Technologia cienkowarstwowa
- Odparowywanie termiczne lub bombardowanie jonami (sputtering) wybijanie atomów ze źródła na skutek bombardowania jego powierzchni cząsteczkami gazu obojętnego powstającego w obszarze plazmy.
- Metalizacja lub krzem polikrystaliczny



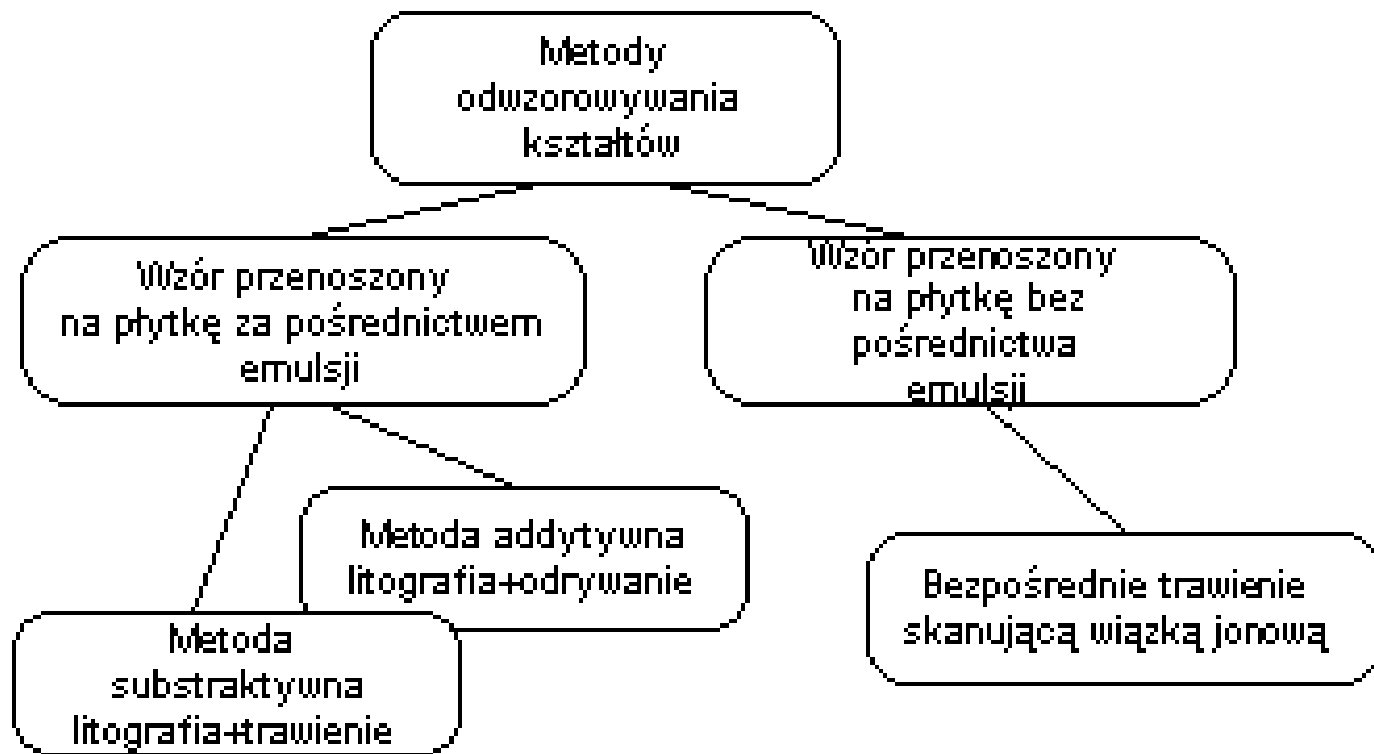
Metody fizycznego osadzania z fazy lotnej (PVD)

- odparowanie metodami fizycznymi materiału ze źródła
- transport par materiału w obszarze obniżonego ciśnienia,
- kondensacja par materiału na powierzchni podłoża i utworzenie nowej warstwy.

Przykłady

- naparowywanie próżniowe
- rozpylanie

Procesy technologiczne odwzorowujące kształty



Metody odwzorowywania kształtów wykorzystujące pośrednictwo emulsji

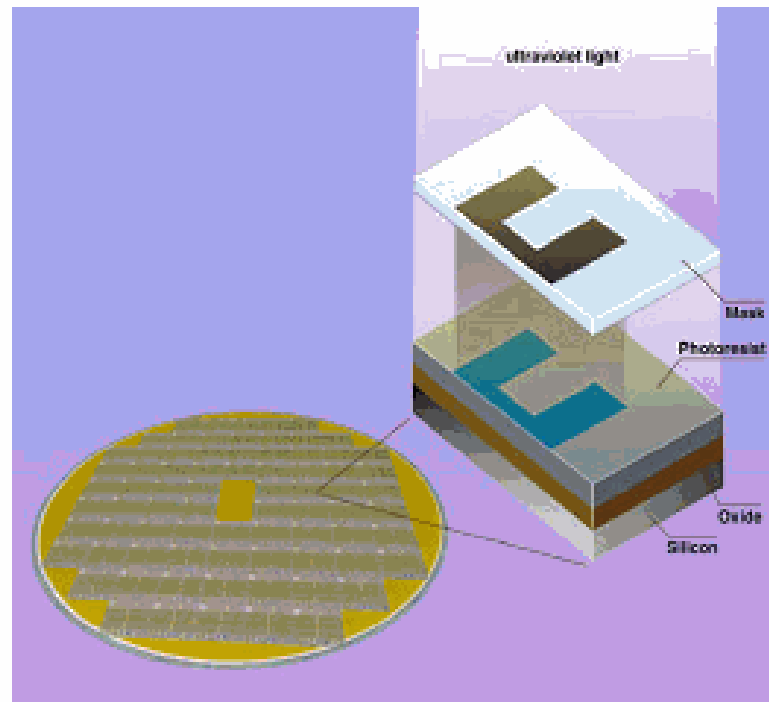
- Kształt z odpowiedniego wzorca przenoszony jest na światłoczułą emulsję (*litografia*),
- końcowy kształt warstwy uzyskuje się metodą addytywną lub substraktywną

nałożenie i wywołanie emulsji
przed osadzeniem warstwy

- osadzana jest warstwa, w której powstanie odpowiedni wzór
- nakładana i wywoływana jest emulsja
- dokonuje się trawienia warstwy i usuwania zbędnej maski

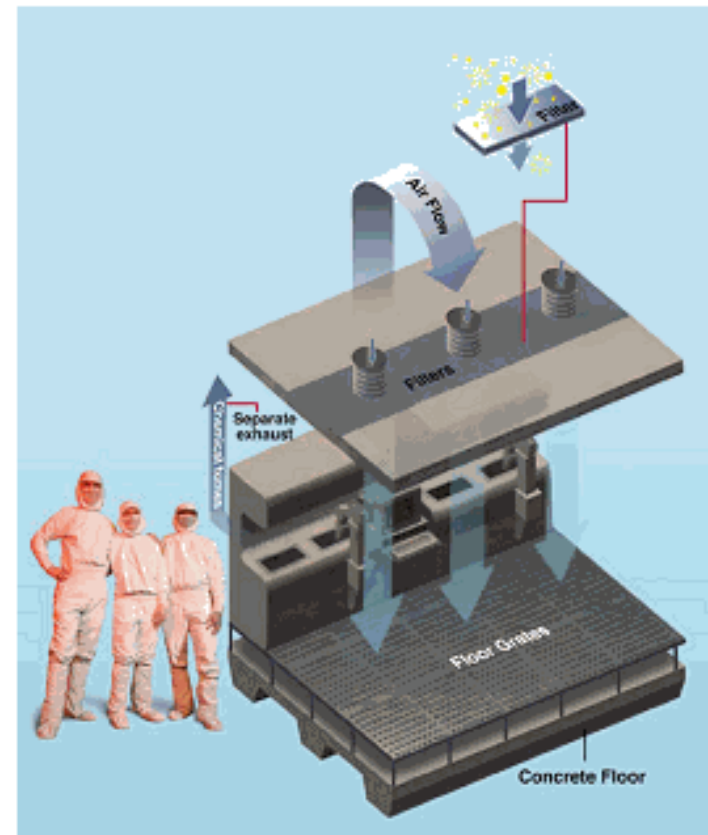
Maskowanie i litografia

polega na «przekopiowaniu» na powierzchni płytki motywu przedstawiającego każdy poziom maski



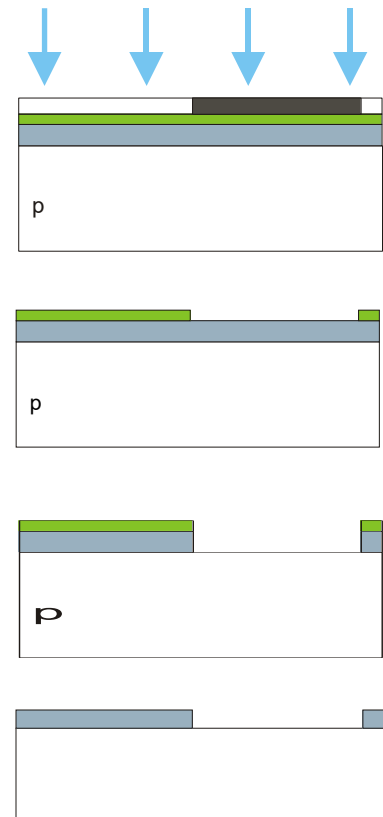
Klasa czystości

Liczba pyłków w stopie sześciennej powietrza
Od 1 do 10 000



Fotolitografia (rzeźbienie światłem)

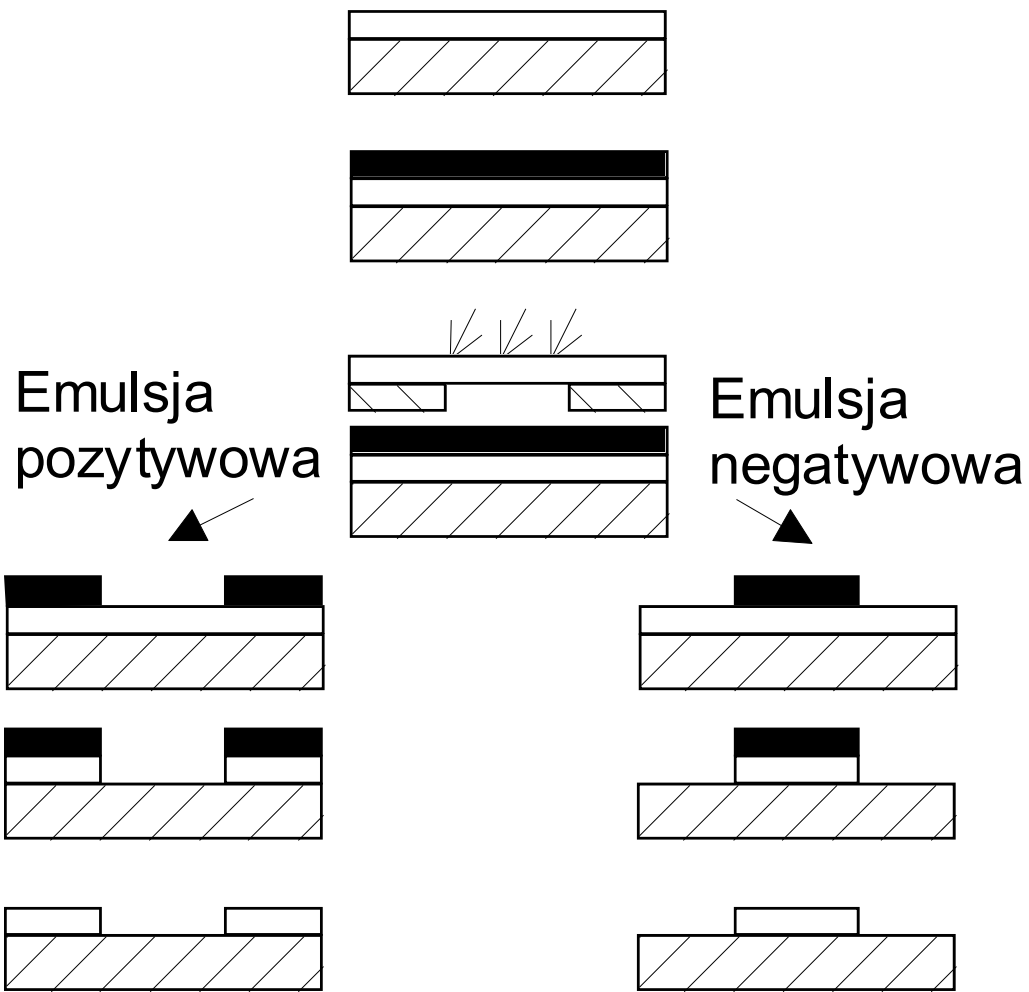
- Pokrycie płytki krzemowej równomierną warstwą fotorezystu
- Naświetlenie
- Rozpuszczenie obszaru naświetlonego lub nienaświetlonego
- Operacje technologiczne na odkrytych obszarach
- Usunięcie utwardzonego fotorezystu



Emulsje pozytywowe i negatywowe

obszary naświetlone ulegają wypłukaniu pod wpływem substancji zwanej wywoływaczem, a obszary nienaświetlone pozostają i stanowią maskę np. do procesów trawienia w metodzie subtraktywnej

Obraz emulsji jest zatem przeniesionym dokładnie obrazem z maski i stąd też nazwa takiej emulsji - emulsja pozytywowa.



Litografia

Zespół procesów, których celem jest wykorzystanie promieniowania do zmiany struktury chemicznej fotorezystu

Promienie są zatrzymywane przez powierzchnię maski ale naruszają strukturę molekularną fotorezystu (żywicy)

Rozdzielczość jest ograniczona długością użytej fali promieniowania

Typy litografii

- Optyczna (*praktycznie ultrafiolet*)
(długość fali 300 - 400 nm)
- Rentgenowska (*promienie X o małej energii*)
(długość fali 1 - 100 Å)
- Elektronowa (*strumień elektronów*)
(długość fali 1 Å dla energii 10keV)
- Jonowa (*strumień jonów*)

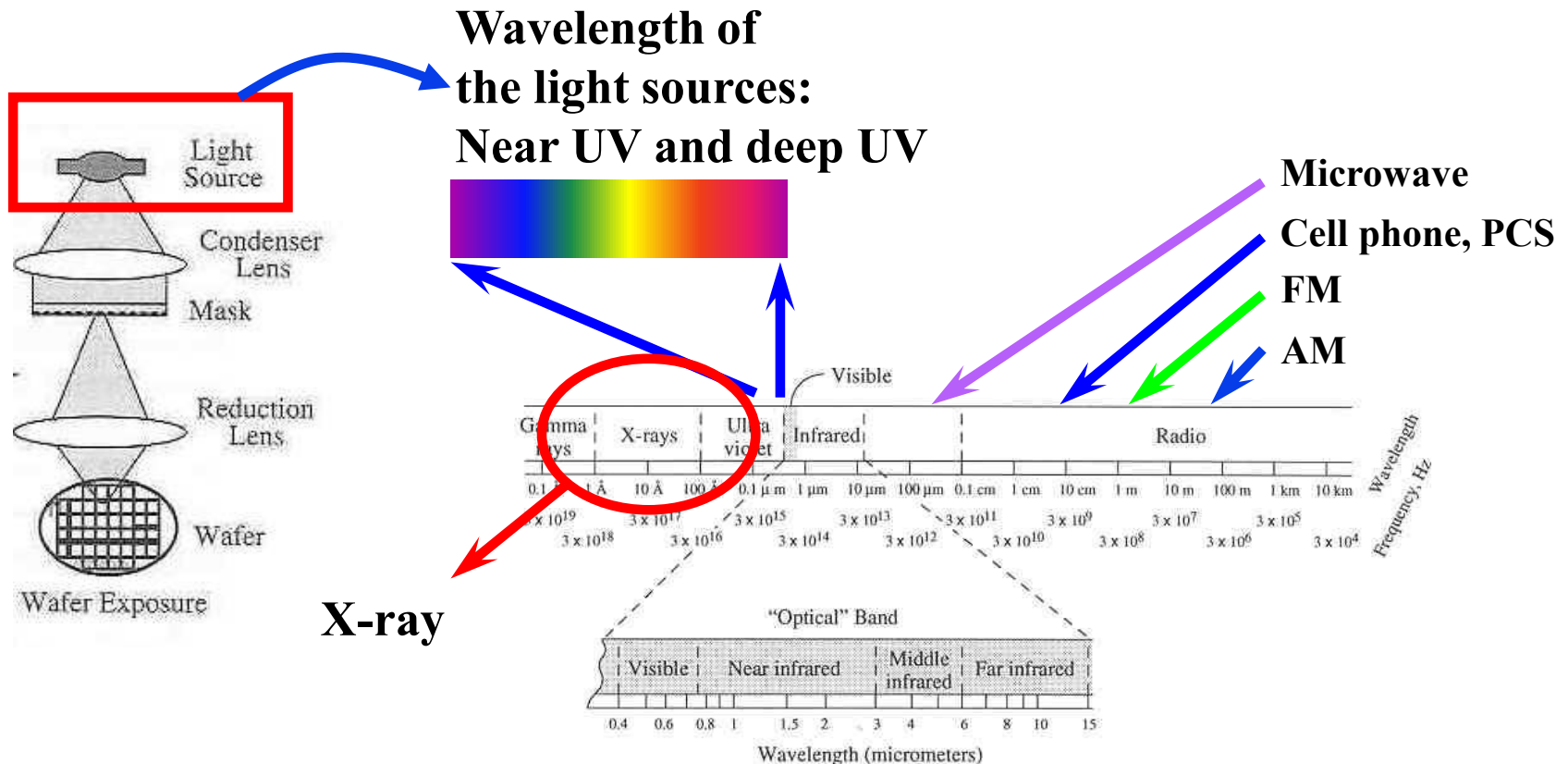
Maski

- Maska jest wzorcem dla powstającej warstwy, dokładność jej wykonania musi przekraczać kilkakrotnie dokładność odwzorowania.
- Maski najczęściej wykonuje się ze szkła sodowo-wapniowego, boro-krzemowego lub kwarcowego.
- Wzór na masce zwykle wykonywany jest z chromu, który tworzy cienką i twardą warstwę na powierzchni maski.

Nie wszystkie metody wymagają użycia masek - sterowana wiązka wysokoenergetycznych cząstek bombardująca płytkę podłożową

- elektrony (elektronolitografia)
- jony (jonolitografia)

Źródła światła w fotolitografii



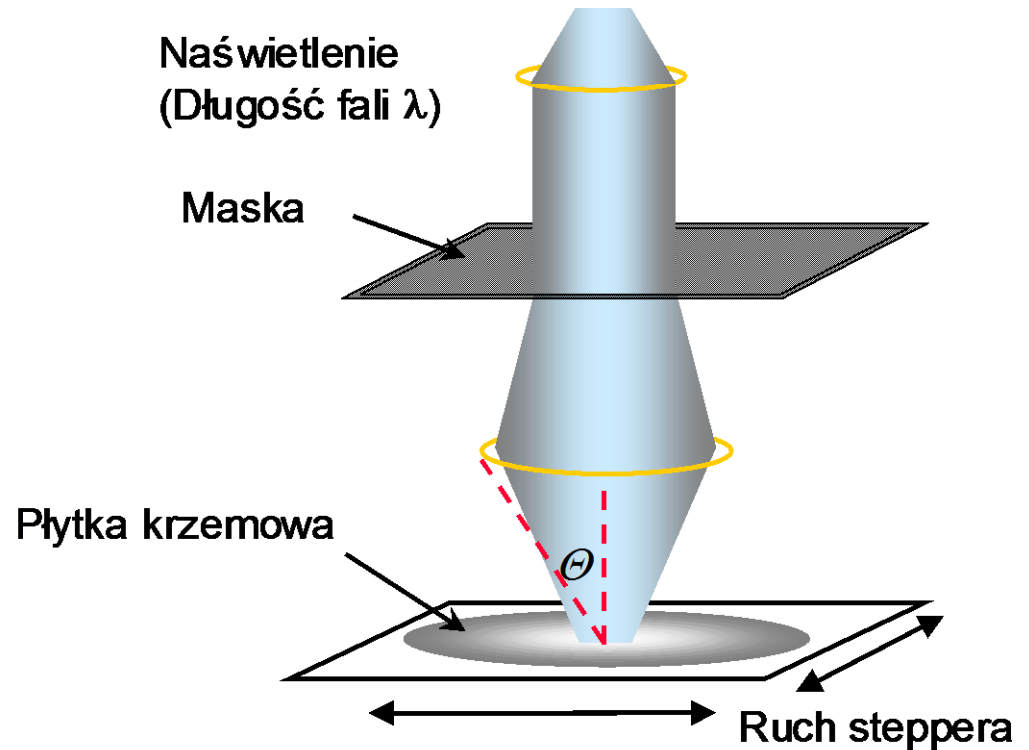
Metody naświetlania

Wzajemne położenie względem siebie maski oraz podłoża (istotny wpływ na rozdzielczość)

- Zbliżeniowa, wykorzystująca rzutowanie obrazu maski na podłoże [maska znajduje się w niewielkiej (rzędu μm) odległości od płytki]
- Kontaktowa, gdy maska dotyka emulsji na płytce
- Projekcyjna, obraz maski rzutowany jest na płytkę za pośrednictwem układu optycznego

Litografia projekcyjna

Przy pomocy układu optycznego na płytkę krzemową rzutowany jest obraz maski pojedynczego układu scalonego, po czym płytką jest przesuwana w celu naświetlenia jej kolejnego fragmentu za pomocą mechanizmu zwanego stepperem



Ograniczenia litografii optycznej

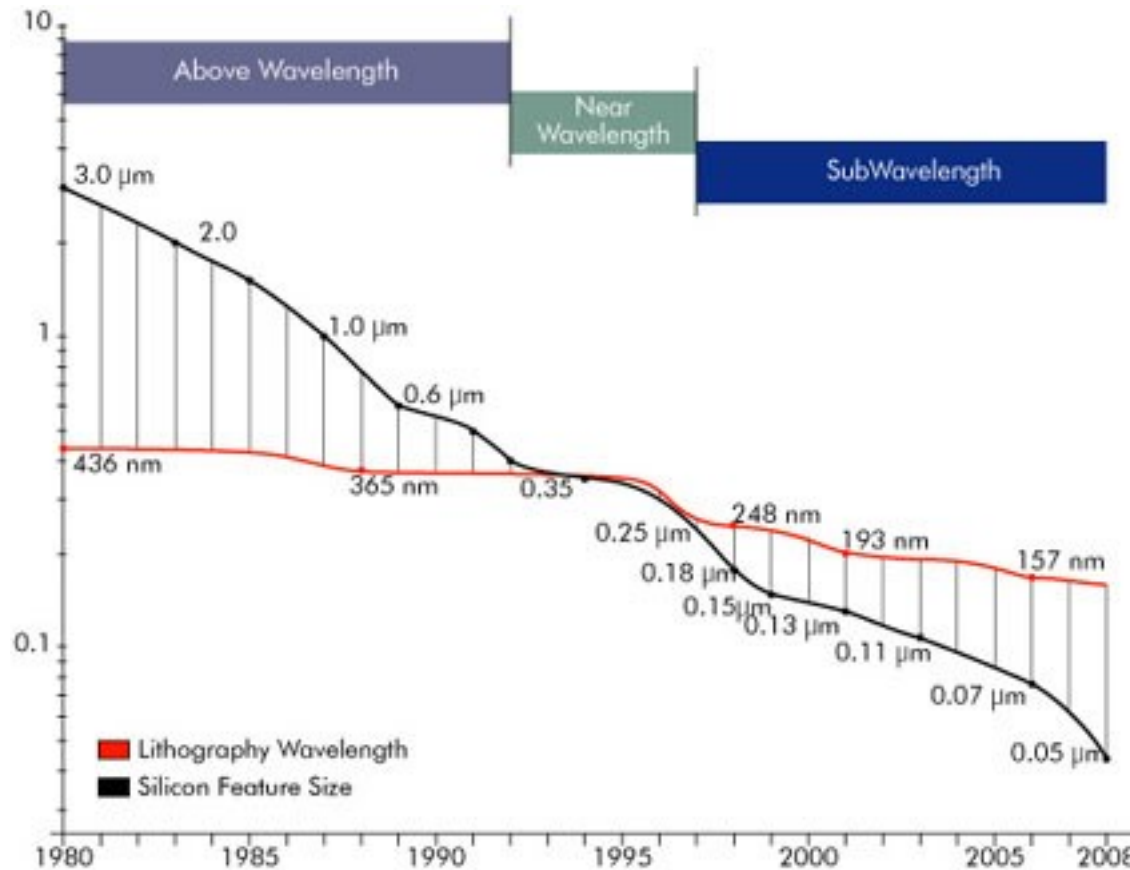
MTF - modulation transfer function - stosunek oświetlenia między obszarem jasnym a ciemnym (kontrast)

$$\lambda=157 \text{ nm}, W=100\text{nm}, n_a(=n \sin(\theta/2))=0.6 \Rightarrow \text{MTF}=23\%$$

$$MTF = \frac{2}{\pi} \left(\phi - \frac{1}{2} \sin(2\phi) \right)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{\lambda}{4Wn_a} \right)$$

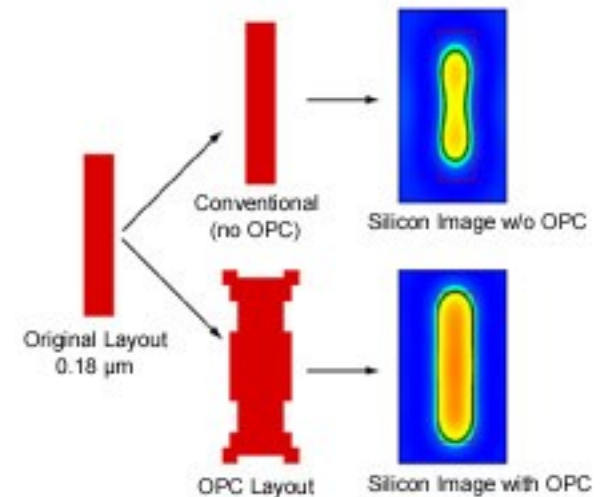
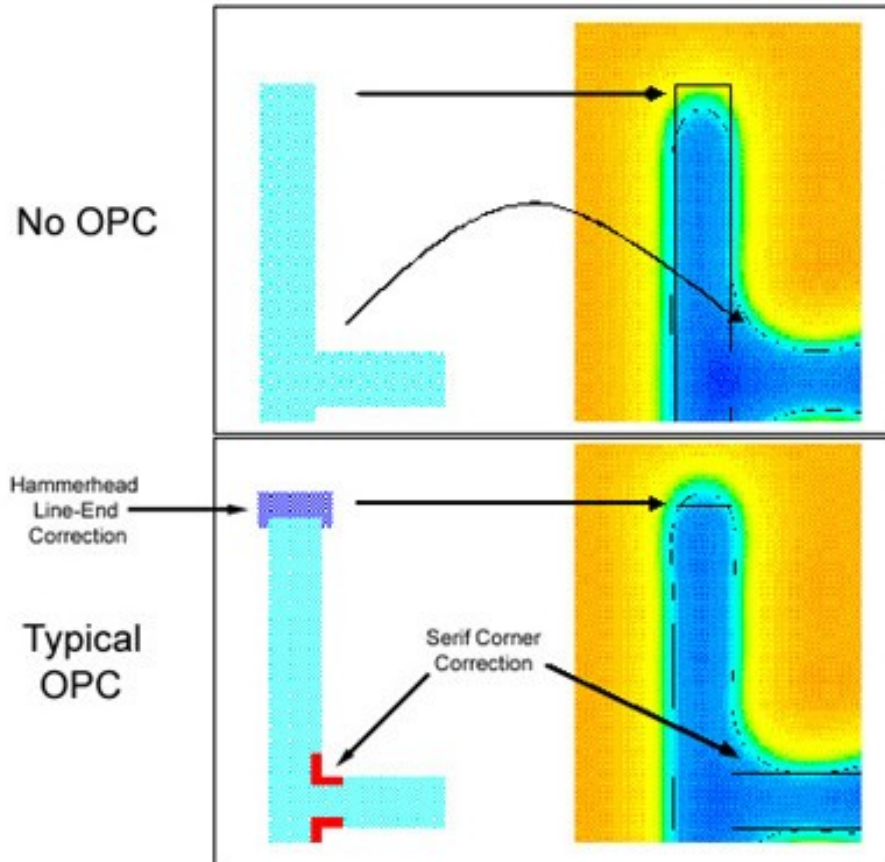
Fotolitografia a rozmiar charakterystyczny



Źródło: Numerical Technologies <http://www.numeritech.com>

Optical Proximity Correction

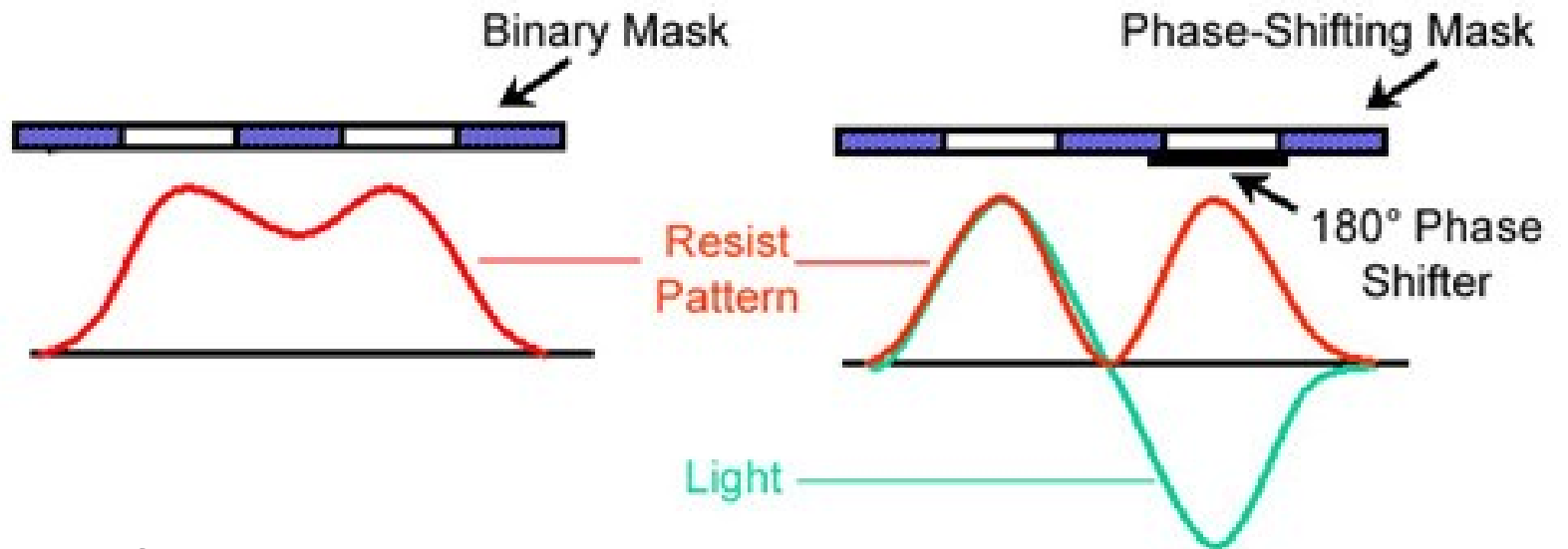
korekcja gęstości optycznej wiązki



Źródło: Numerical Technologies <http://www.numeritech.com>

Maski wielofazowe

zwiększanie rozdzielczości odwzorowania cd.



Interferencja światła
z sąsiednich otworów

Przesunięcie fazowe fali świetlnej

Źródło: *Numerical Technologies* <http://www.numeritech.com>

Usuwanie zbędnego fotorezystu

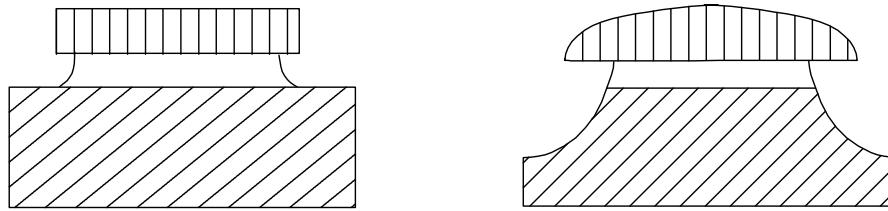
- użycie silnego rozpuszczalnika organicznego, który rozpuszcza naświetloną żywicę
- użycie kwasów, które rozpuszczają substancje organiczne
- poddanie płytki działaniu tlenu monoatomowego, który utlenia substancje organiczne

Trawienie

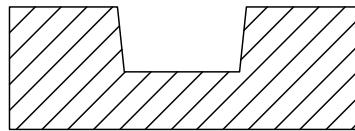
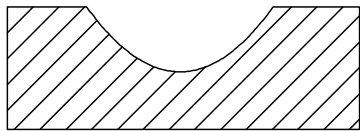
- Mokre lub suche
- Zalety trawienia suchego:
 - Wysoka rozdzielczość
 - Wysoka anizotropia
- Trawienie suche
 - fizyczne
 - chemiczne
 - chemiczno-fizyczne
 - fotochemiczne

Parametry trawienia

Selektywność, zdolność do wybiórczego trawienia jednego materiału bez szkody dla innych materiałów znajdujących się na tej samej płytce



Anizotropowość, znacznie większa szybkość trawienia w jednym, wyróżnionym kierunku



zapewnia większą wierność w odwzorowywaniu kształtów.