

EPITAKSJA

epitaksja (gr. *epi* + *taxis* = na + uporządkowanie)

wzrost kryształu (warstwy epitaksjalnej) w sposób uporządkowany na podłożu krystalicznym

sposób wzrostu zależy od różnicy między stałymi sieci krystalicznych podłoża i tworzącej się warstwy

w ujęciu termodynamicznym sposób wzrostu zależy od relacji między sumą energii swobodnych powierzchni warstwy (E_{ep}) i powierzchni styku tej warstwy z podłożem (E_i) a energią swobodną powierzchni podłoża (E_s)

1) wzrost warstwa na warstwie (proces energetycznie stabilny)

$$E_{ep} + E_i \leq E_s \quad (\text{zwilżanie})$$

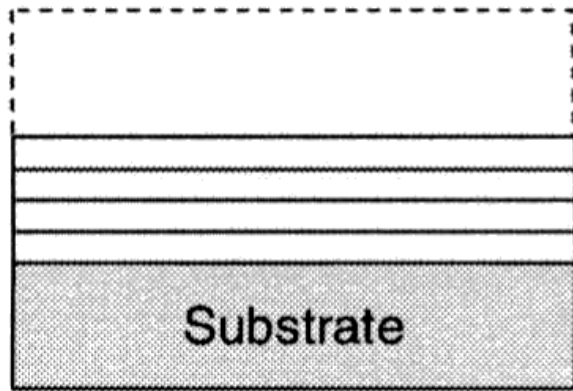
2) wzrost przez zarodkowanie (brak stabilności energetycznej)

$$E_{ep} + E_i \gg E_s \quad (\text{brak zwilżania})$$

3) wzrost warstwa na warstwie, a następnie przez zarodkowanie

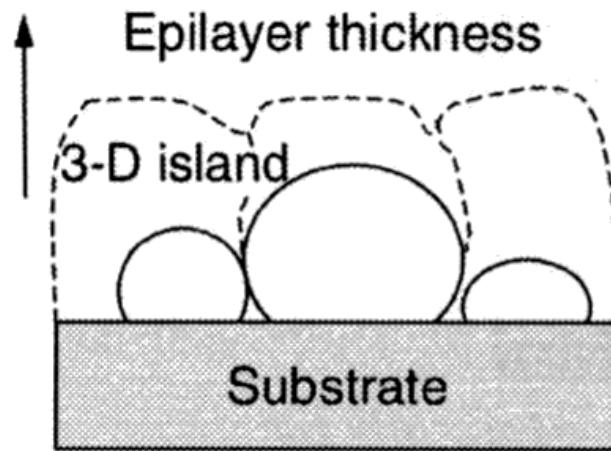
$$E_{ep} + E_i \geq E_s \quad (\text{brak zwilżania})$$

1)



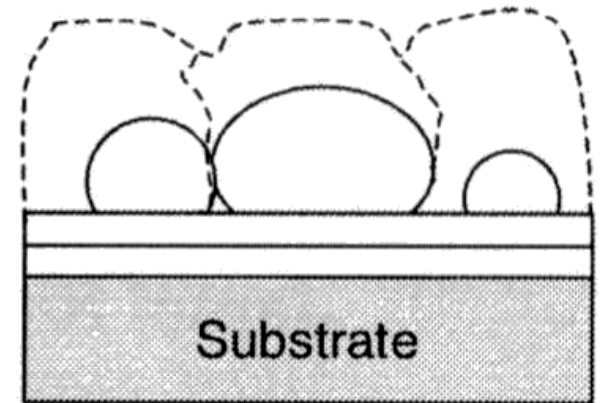
Layer by layer growth

2)



Nucleation growth

3)



S-K growth

Różne sposoby wzrostu warstw epitaksjalnych

1) wzrost warstwa na warstwie

atomy osiadają na podłożu w postaci wysp aż do wypełnienia całej warstwy (monokrystalicznej)

kolejna warstwa zaczyna się tworzyć zwykle przed wypełnieniem poprzedniej

homoepitaksja: Si/Si, GaAs/GaAs

heteroepitaksja: AlGaAs/GaAs, InGaP/GaAs

Postęp w epitaksji warstwowej:

epitaksja z przyspieszoną migracją atomów przez zapewnienie czasu na lokowanie się atomów w tworzonej warstwie

epitaksja cykliczna: nakładanie atomów – usuwanie nadmiaru atomów (rozpoczynających tworzenie następnej warstwy przed zakończeniem poprzedniej)

2) wzrost przez zarodkowanie

trójwymiarowy wzrost kryształu, co powoduje zmniejszenie całkowitej swobodnej energii powierzchniowej

tworzenie się warstwy przez wypełnienie przestrzeni między ziarnami

ten proces (heteroepitaksja) występuje w przypadku materiałów niedopasowanych lub chemicznie niekompatybilnych

poszukuje się odpowiednich podłoży lub matrycy interfejsowych dla zmniejszenia niedopasowania sieci krystalicznych

3) wzrost warstwa na warstwie, a następnie przez zarodkowanie

występuje w przypadku niewielkiego niedopasowania sieci krystalicznych

pierwsze monowarstwy tworzą się przy stabilności energetycznej

po osiągnięciu pewnej grubości pojawia się niestabilność energetyczna i dalszy wzrost kryształu jest trójwymiarowy

przykłady struktur pseudo morficznych: GaInAs/GaAs, SiGe/Si

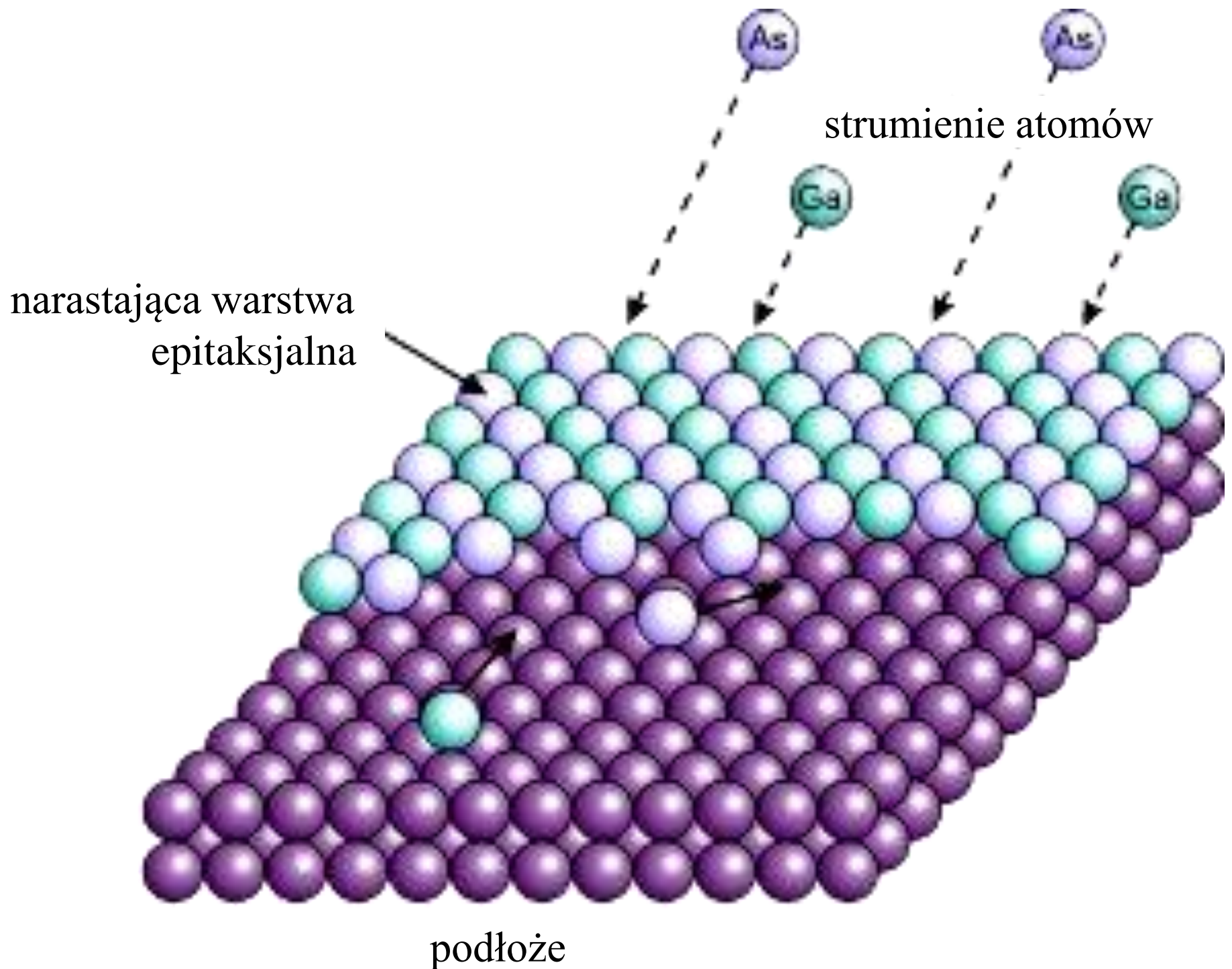
Technologie epitaksjalne

najczęściej stosowane przy wytwarzaniu półprzewodników:

MBE – Molecular Beam Epitaxy

CVD – Chemical Vapour Deposition

MBE – osadzanie warstw ze strumienia cząstek (atomów)



podłoże podgrzewane umieszczone w komorze próżniowej
osiadanie atomów zależy od ich kinetyki powierzchniowej
i dyfuzji

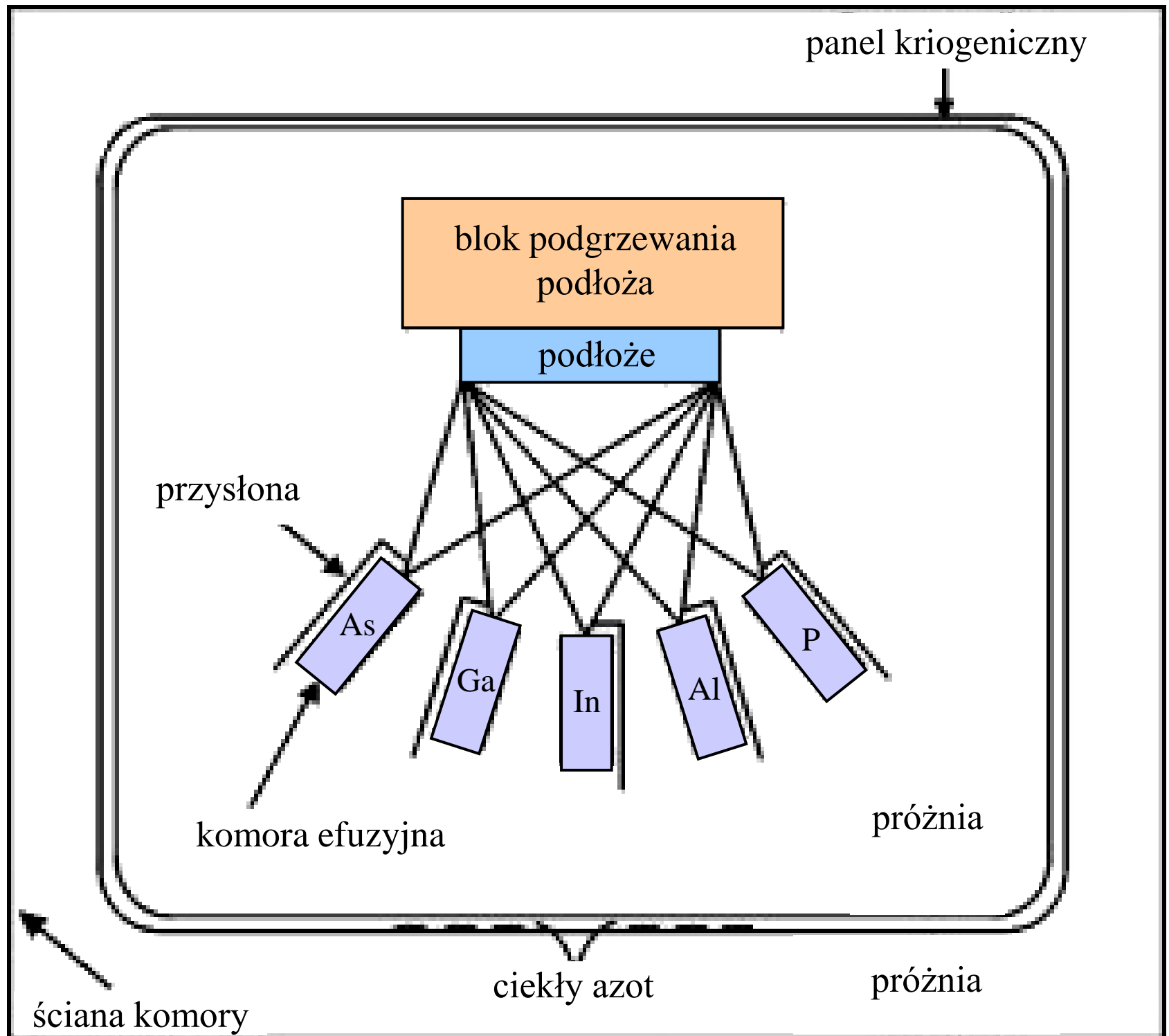
MBE polega na parowaniu (sublimacji) w wysokiej próżni
materiałów w postaci pierwiastków: Si, Ge, Al, Ga, In, As, P
materiał źródłowy znajduje się w komorze efuzyjnej

Komora do nakładania warstw epitaksjalnych

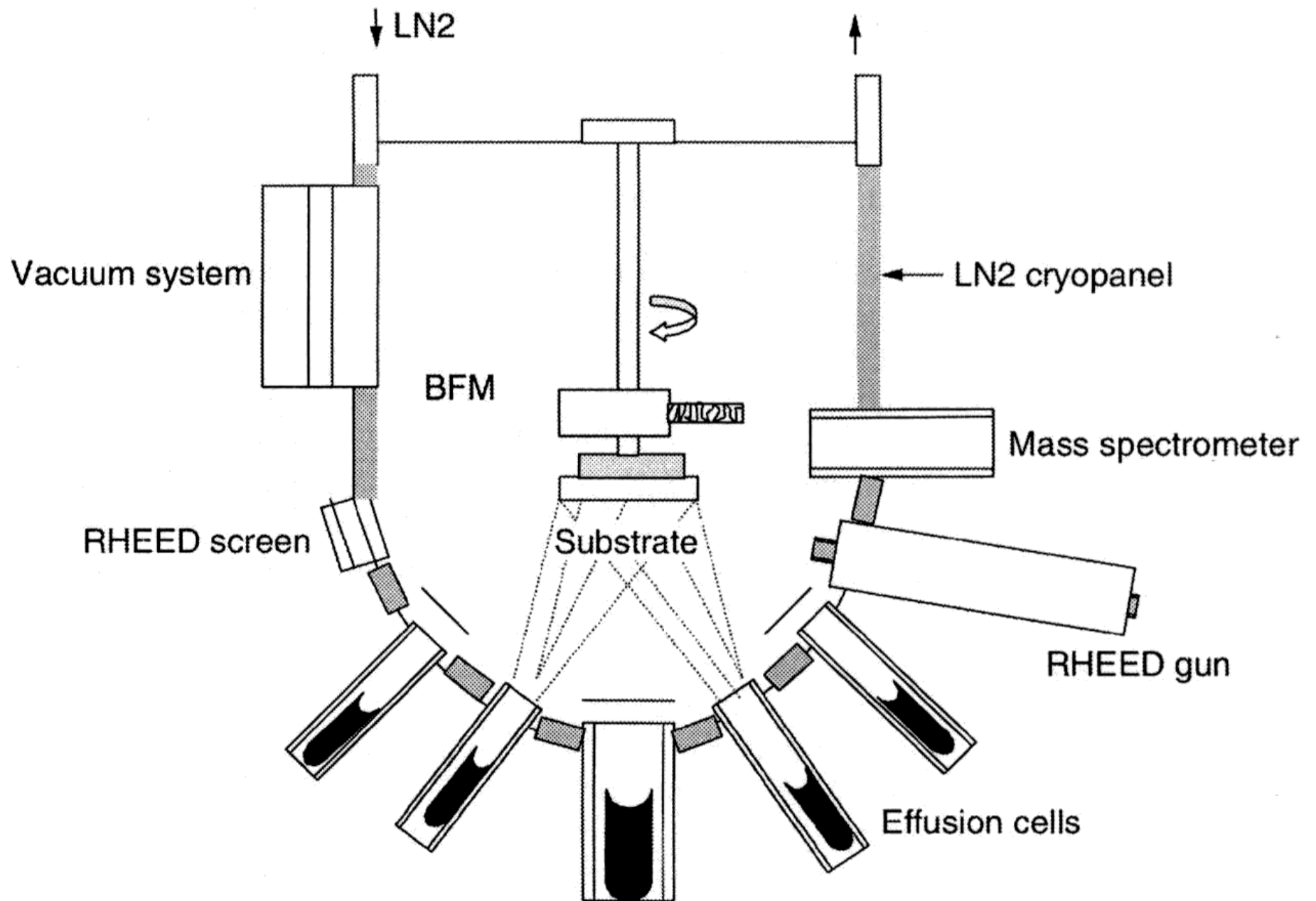
wysoka próżnia (10^{-9} Pa) utrzymywana za pomocą systemu
pomp: dyfuzyjnych, turbinowych, kriogenicznych, jonowych
i sublimacyjnych tytanowych

temperatura ścian komory 200 °C - desorpcja substancji
lotnych (H_2O , O_2 , CO, CO_2)

wewnątrz komory jest panel (płaszcz) kriogeniczny z ciekłym
azotem - zapobiega parowaniu cząstek z powierzchni
wewnętrznych komory i izoluje cieplnie komory efuzyjne



Szkic komory MBE



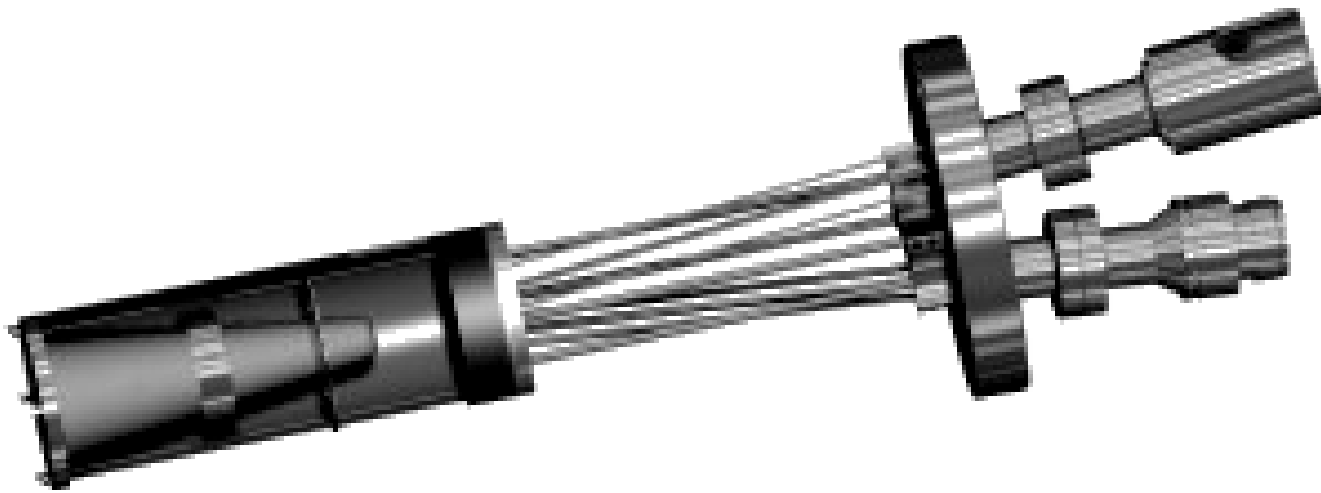
Schemat komory do nakładania warstw epitaksjalnych

RHEED – Reflection of High Energy Electron Diffraction

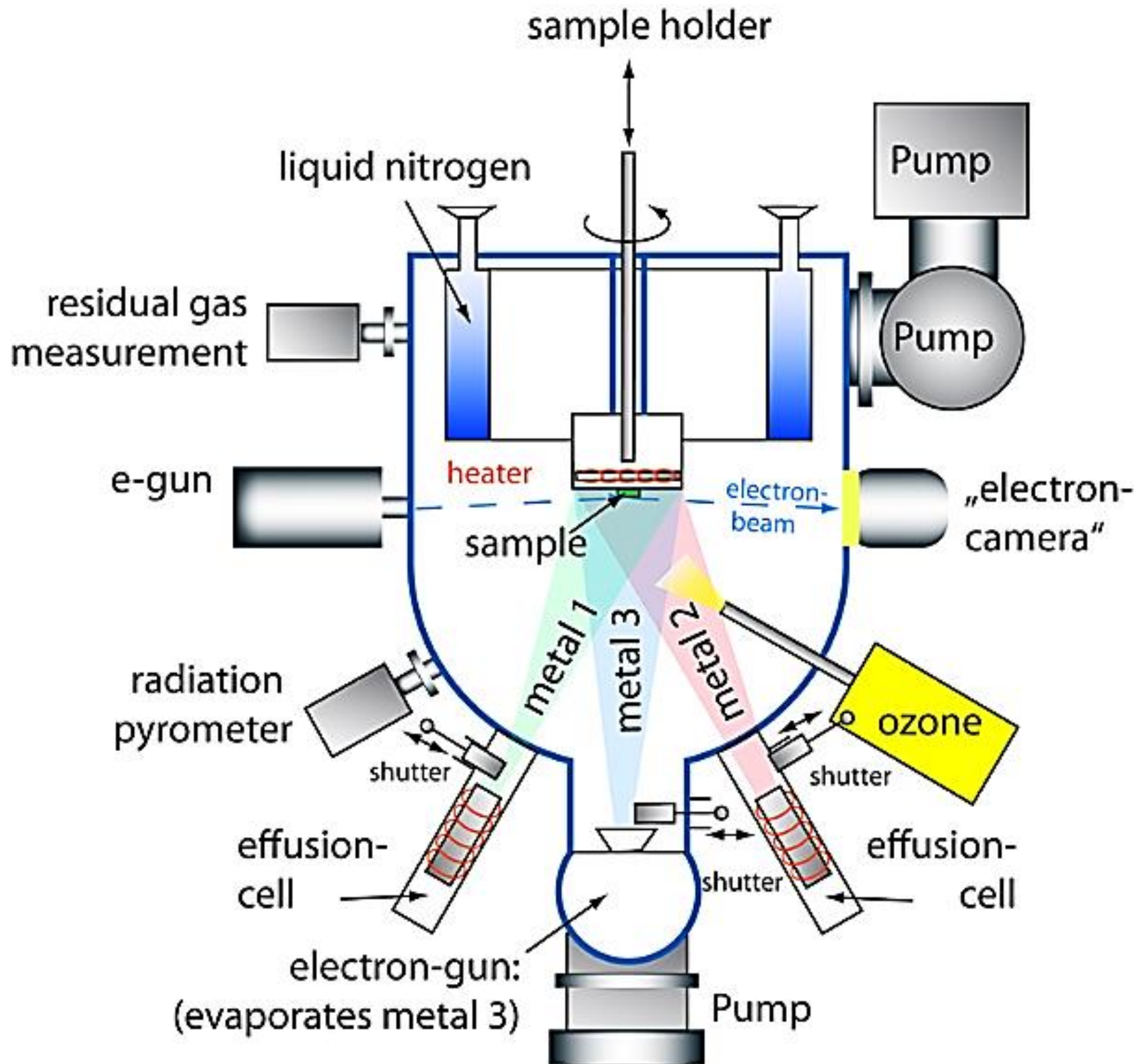
BFM - Beem Flux Monitor

prosta komora efuzyjna:

- otwarty tygiel ceramiczny
- urządzenie grzejne - żarnik
- komora metalowa wyłożona folią z tantalu ekranującą termicznie



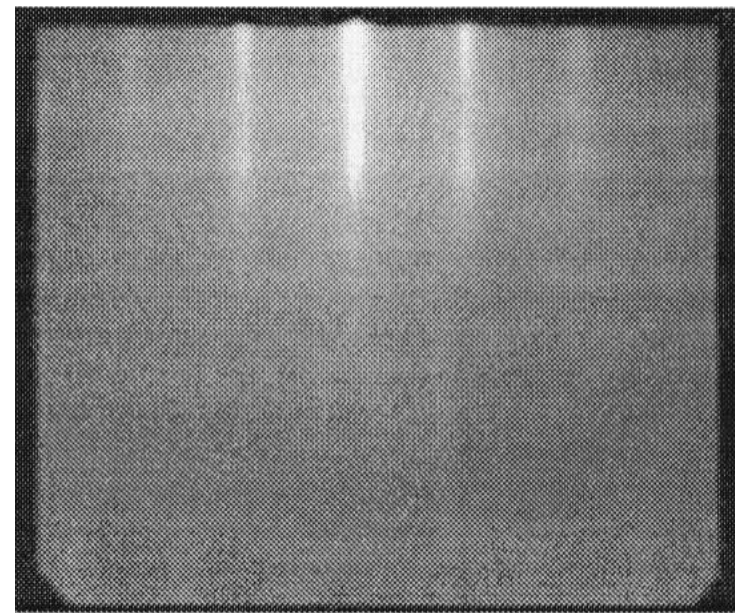
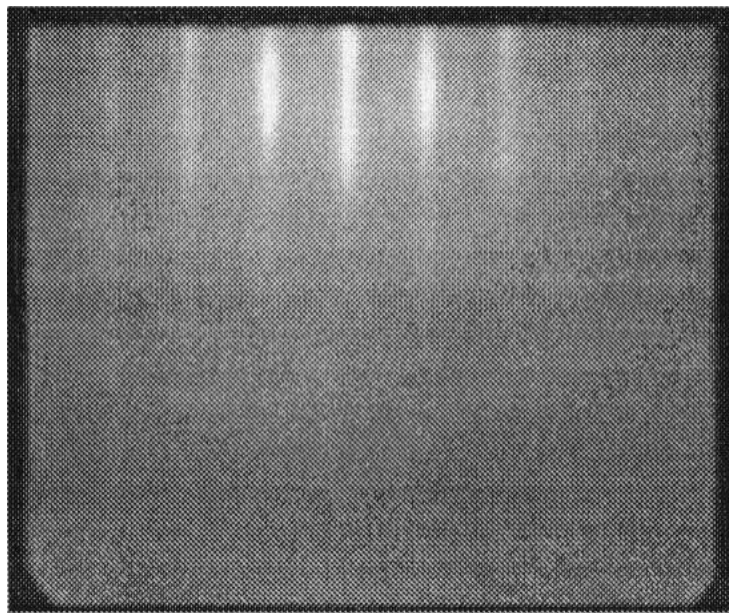
Widok komór efuzyjnych



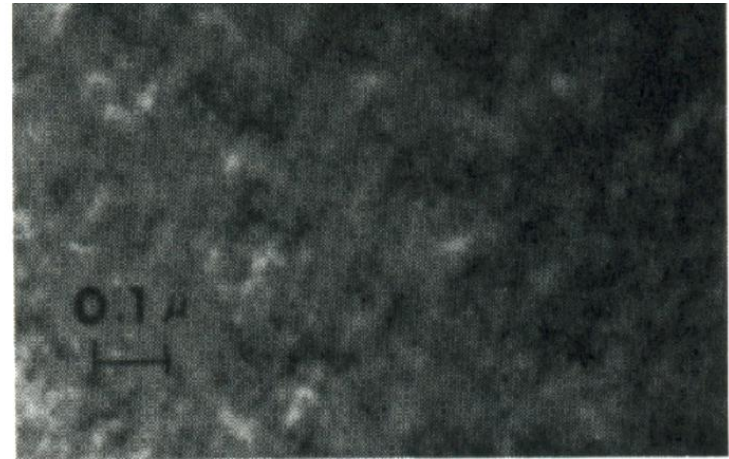
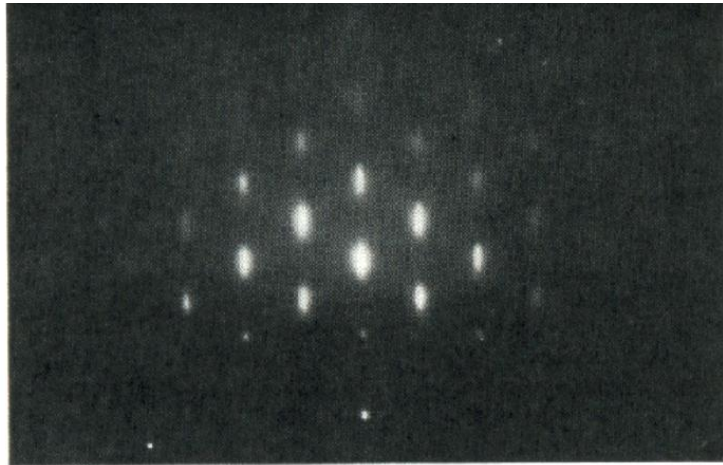
uwarunkowania procesu MBE:

- ściśle określona temperatura podłoża – powstaje warstwa monokrystaliczna
- niższa temperatura – powstaje warstwa amorficzna
- wyższa temperatura – desorpcja warstwy
- szybkość wzrostu warstwy: 1 $\mu\text{m/h}$, 1-atomowa na sekundę
- powtarzalne precyzyjne warstwy nawet o grubości kilku atomów
- działanie przesłon wiązki molekuł trwa znacznie krócej
- w materiałach wielowarstwowych - ostra granica między warstwami

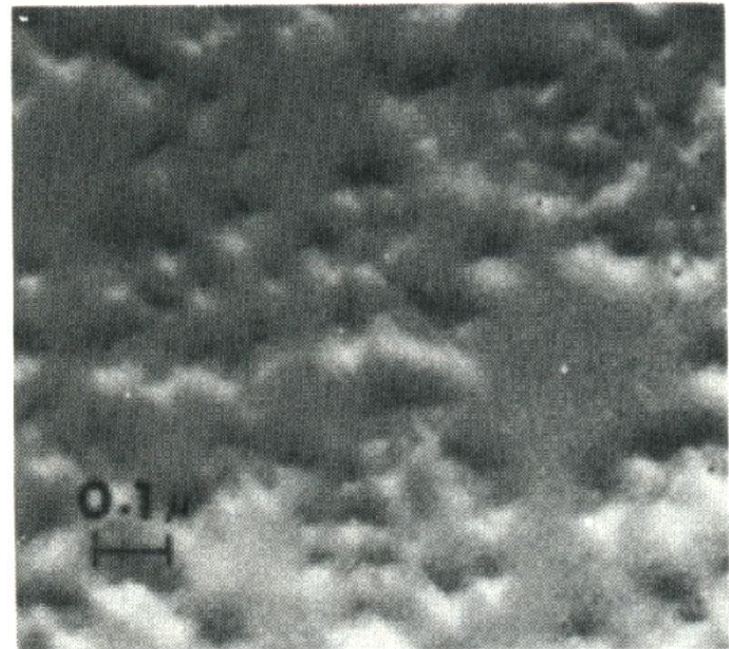
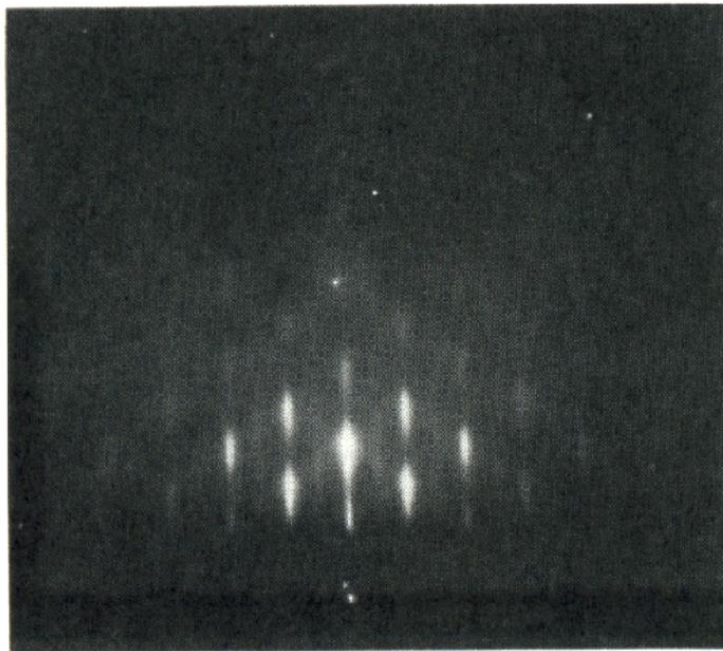
pomiar grubości i płaskości powierzchni warstwy epitaksjalnej
strumień elektronów o wielkiej energii (20 keV)
pada na powierzchnię warstwy pod kątem od 1 do 3 stopni
odbity strumień pada na ekran fluorescencyjny
obraz prążkowy świadczy o dokładnie płaskiej powierzchni
obraz w postaci plamek jest spowodowany nierównościami



Obraz elektronowy warstwy epitaksjalnej SrTiO₃ w kierunku:
[010] i [110]

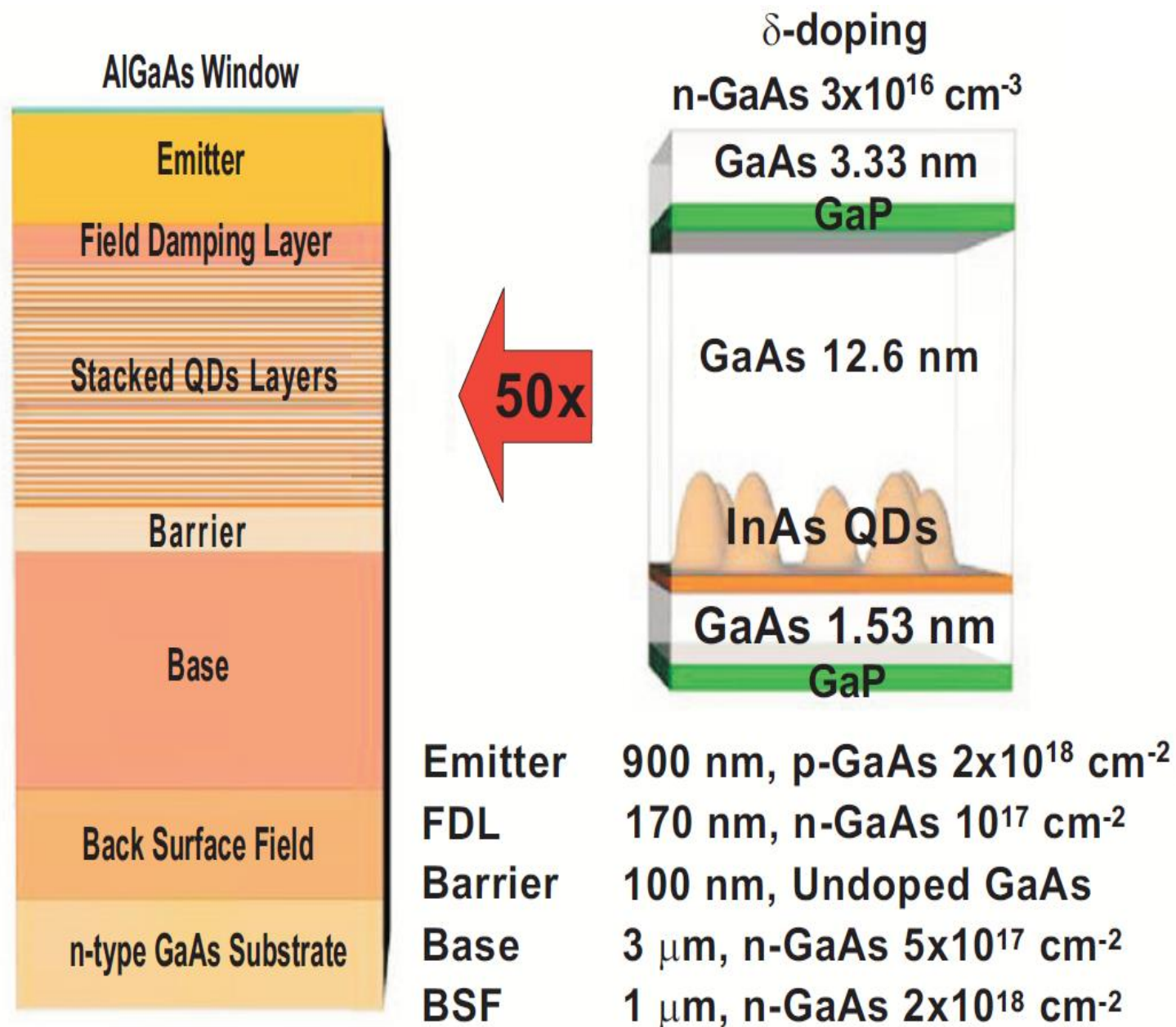


(a)



(b)

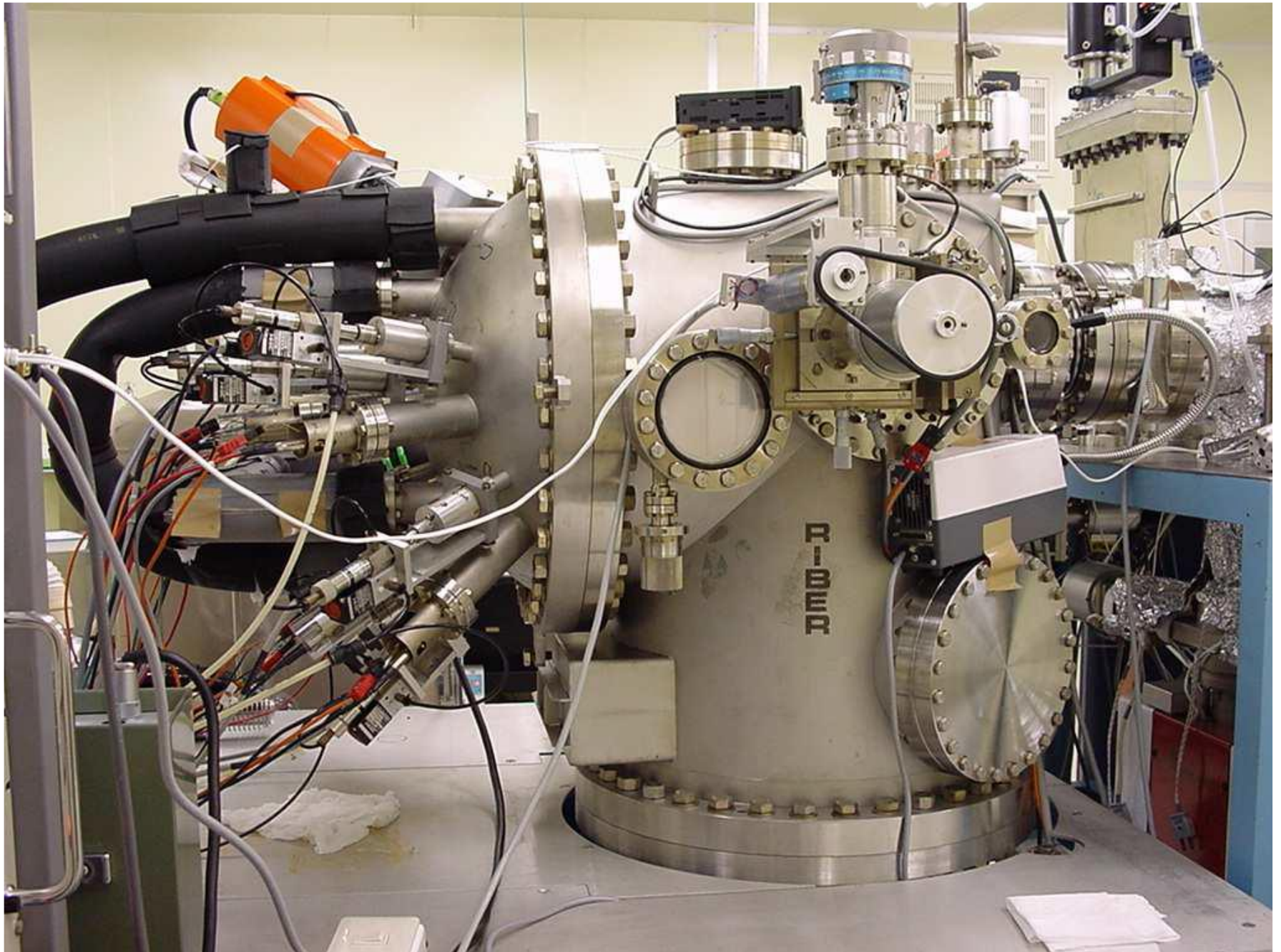
Obraz elektronowy warstw epitaksjalnych GaAs:
(a) pierwsza warstwa, (b) kolejna warstwa



Struktura 50 warstw kropek kwantowych ogniwa fotowoltaicznego, wykonana technologią MBE. Każda warstwa GaP ma nominalną grubość jednego atomu (0,273 nm)



Laboratorium na Wydziale Fizyki UW,
system produkcyjny MBE



Laboratorium na Wydziale Fizyki UW,
system produkcyjny MBE - komora epitaksjalna



Laboratorium na Wydziale Fizyki UW,
nowy system MBE

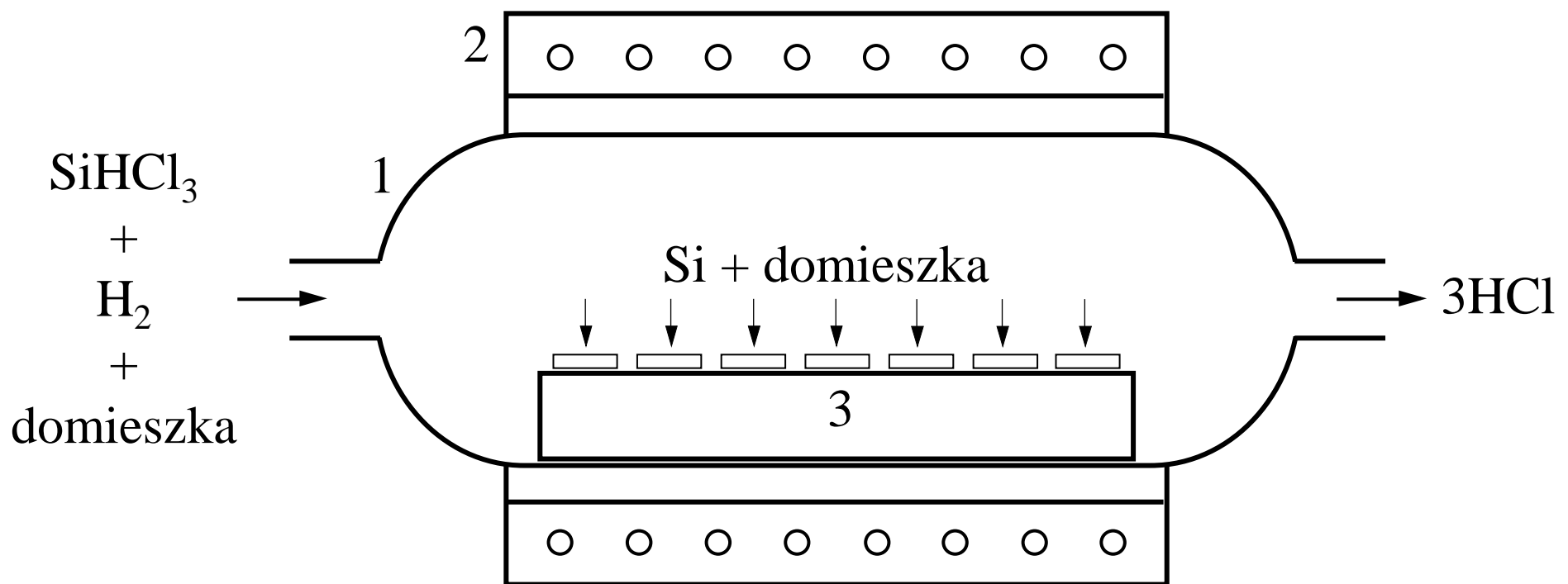
CVD - osadzanie warstw z zastosowaniem reakcji w fazie gazowej

ciśnienie zbliżone do ciśnienia atmosferycznego

temperatura wysoka (wyższa niż w MBE)

materiały w fazie gazowej transportowane przez gaz, np. H_2

proces bardziej skomplikowany niż MBE



Urządzenie do osadzania warstw epitaksjalnych z fazy gazowej:

1 - komora ze szkła kwarcowego, 2 - nagrzewnica indukcyjna,

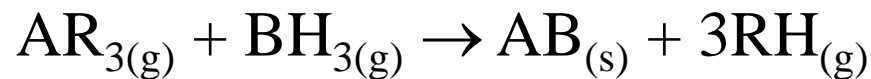
3 - kasetta z płytkami krzemowymi

MOCVD - odmiana CVD

Metal-Organic Chemical Vapour Deposition

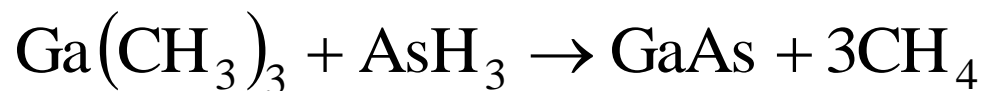
- z wykorzystaniem związków metaloorganicznych w fazie gazowej

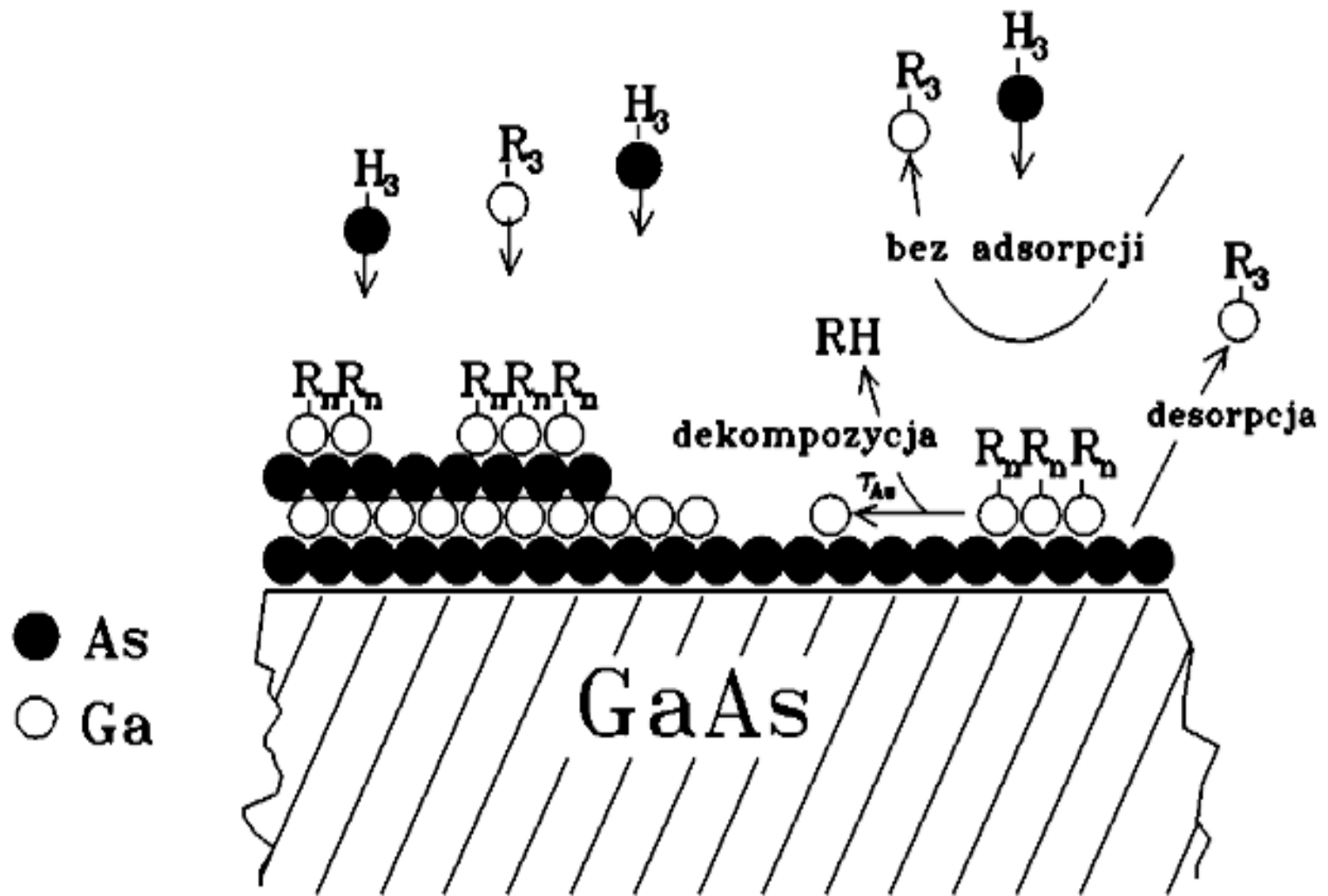
reakcje na podłożu:



AR_3 - związek metaloorganiczny pierwiastka III grupy,

BH_3 - wodorek pierwiastka V grupy



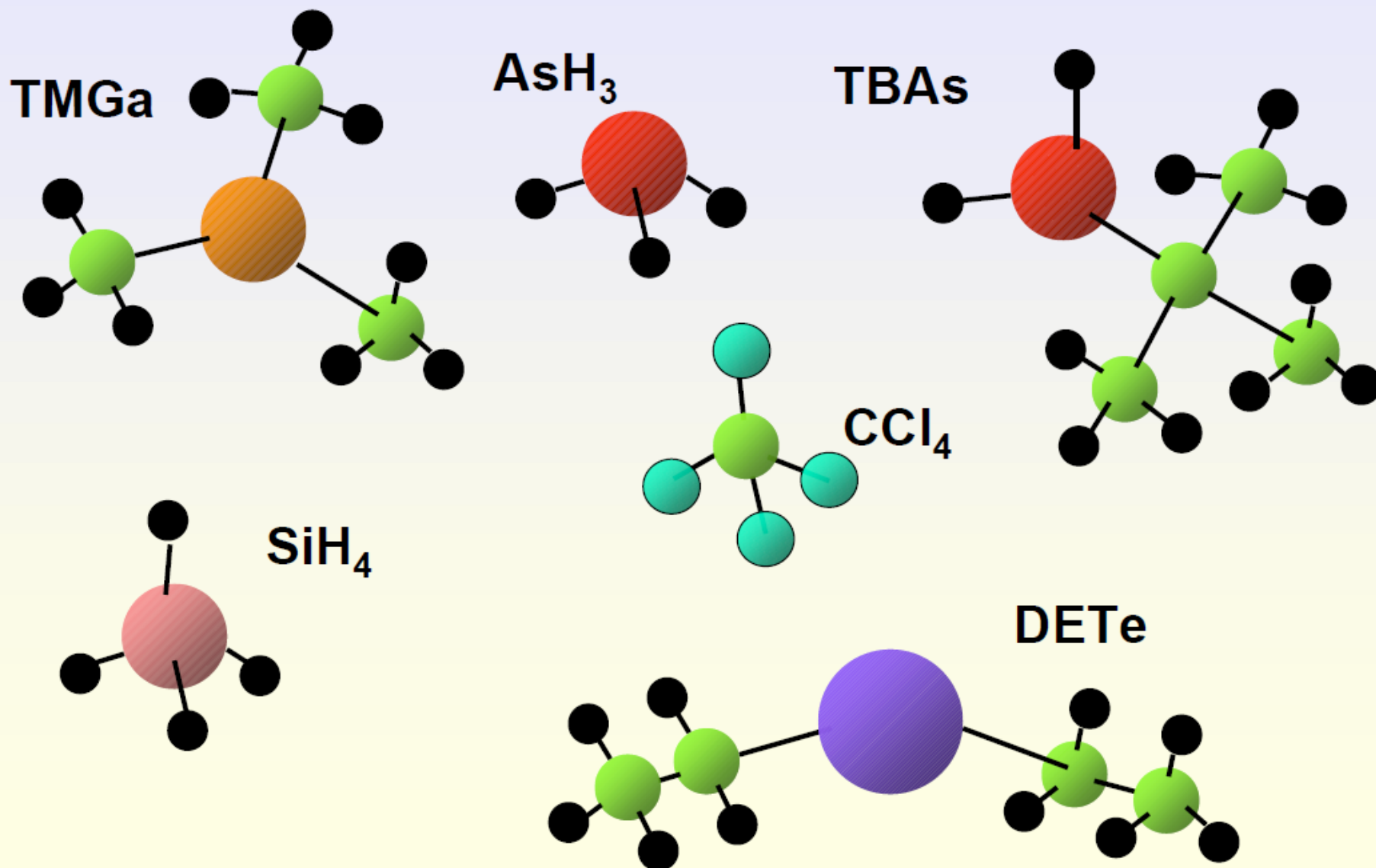
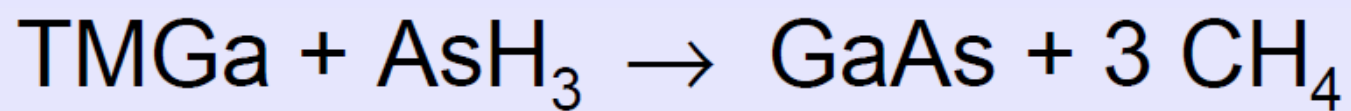


Model wzrostu warstwy w technologii MOCVD

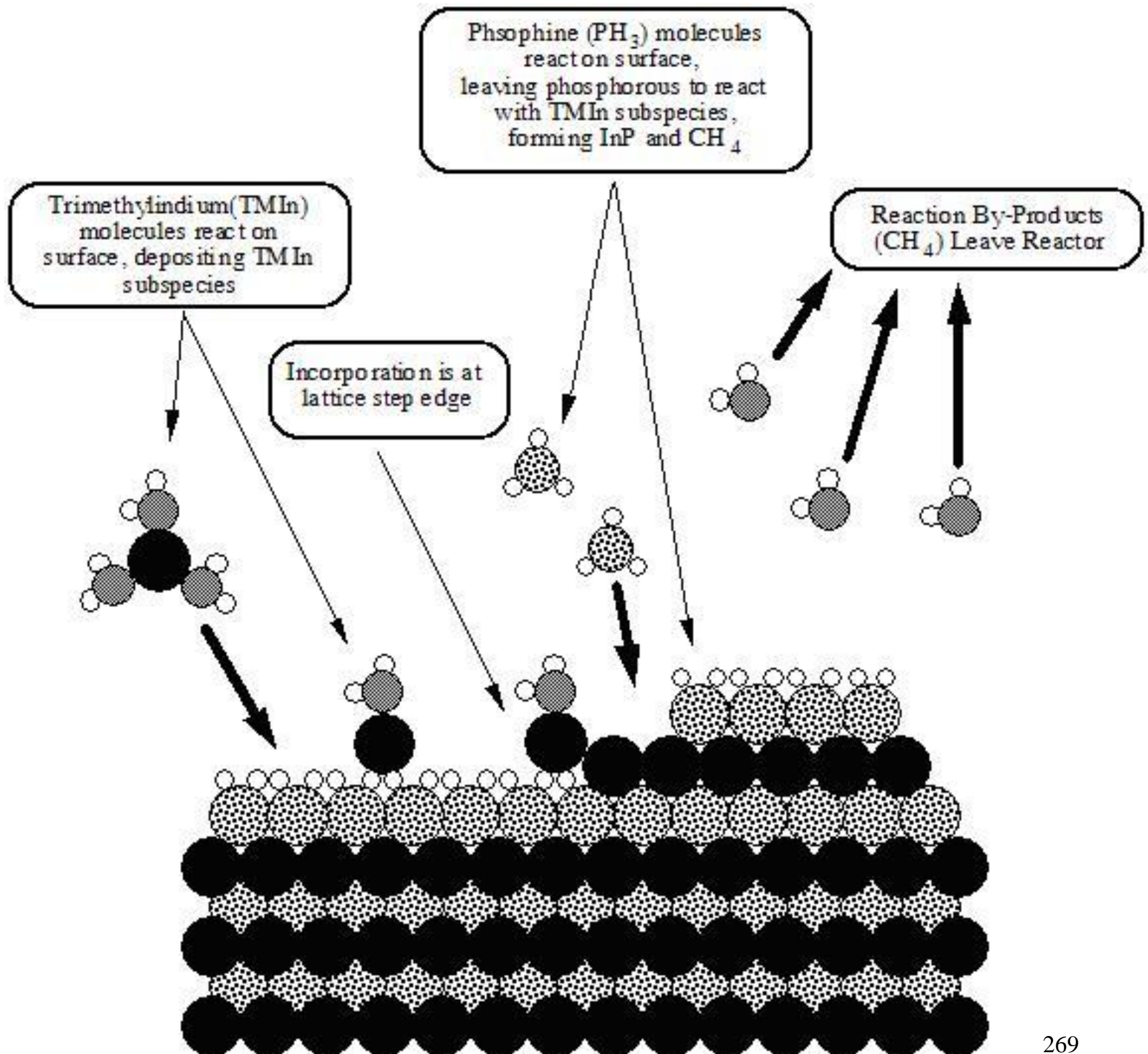
R_3 to $3CH_3$, R_n to nCH_3 , np. $(CH_3)_2$ lub $(CH_3)_3$

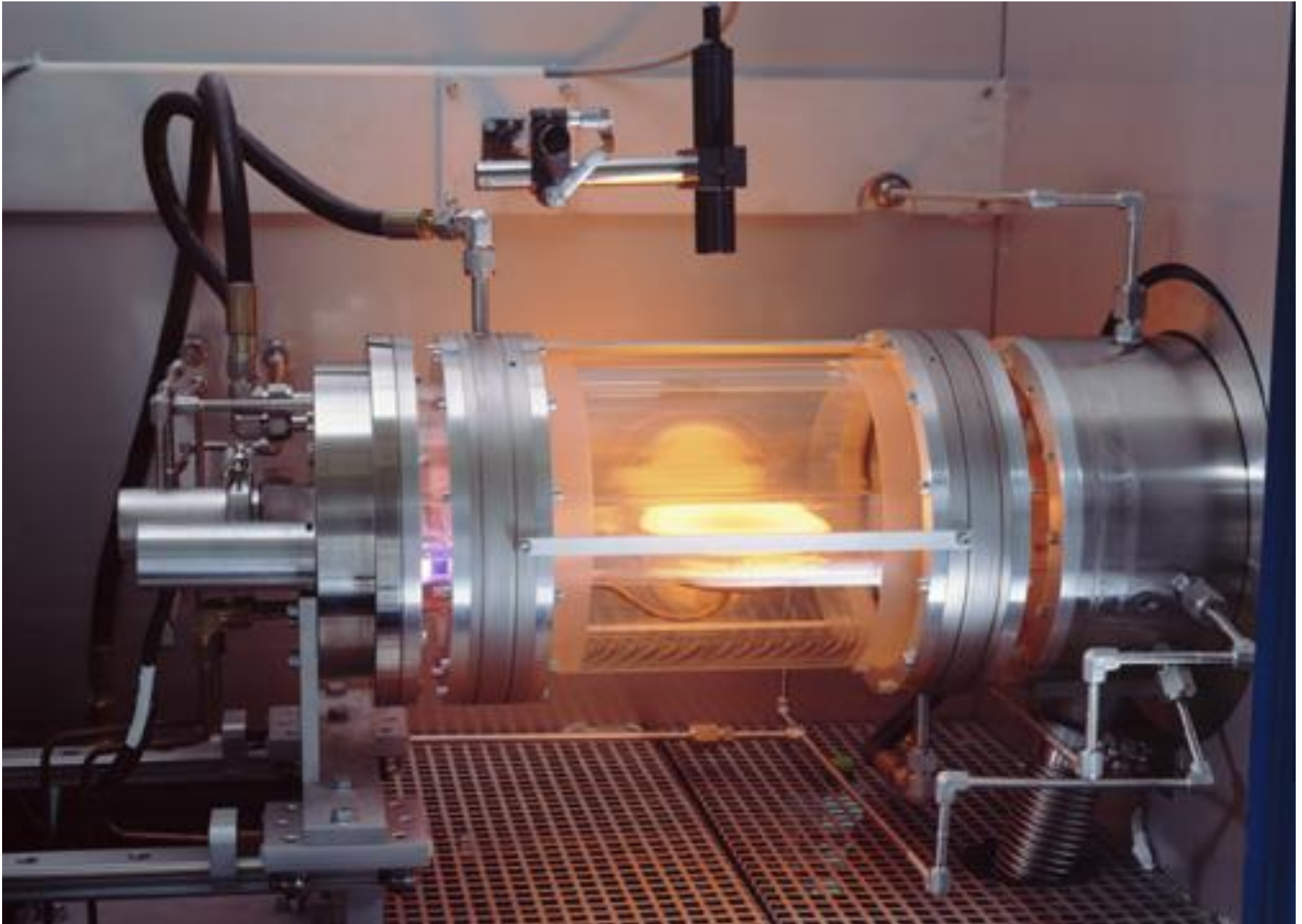
najczęściej używane związki chemiczne:

- trójmetylek galu $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ (w skrócie **TMGa**)
- trójetylek glinu $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ (w skrócie **TEAl**)
- trójbutylek arsenu $\text{As}(\text{C}_4\text{H}_9)_3$ (w skrócie **TBAAs**)
- arsenowodór AsH_3
- krzemowodór SiH_4
- amoniak NH_3
- bicyklopentadienyl magnezu Cp_2Mg
- bimetylcyklopentadienyl magnezu $(\text{CH}_3\text{C}_5\text{H}_4)_2\text{Mg}$
- gaz transportujący, np. H_2 , N_2



Przykłady molekuł metaloorganicznych

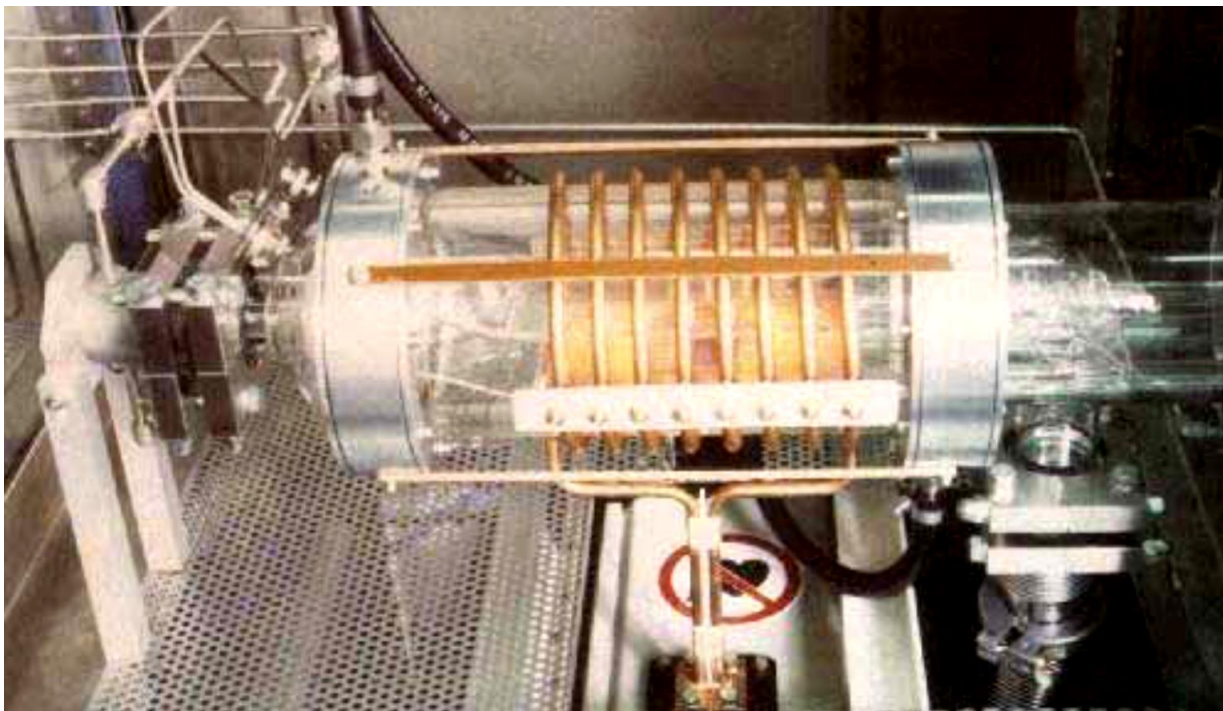


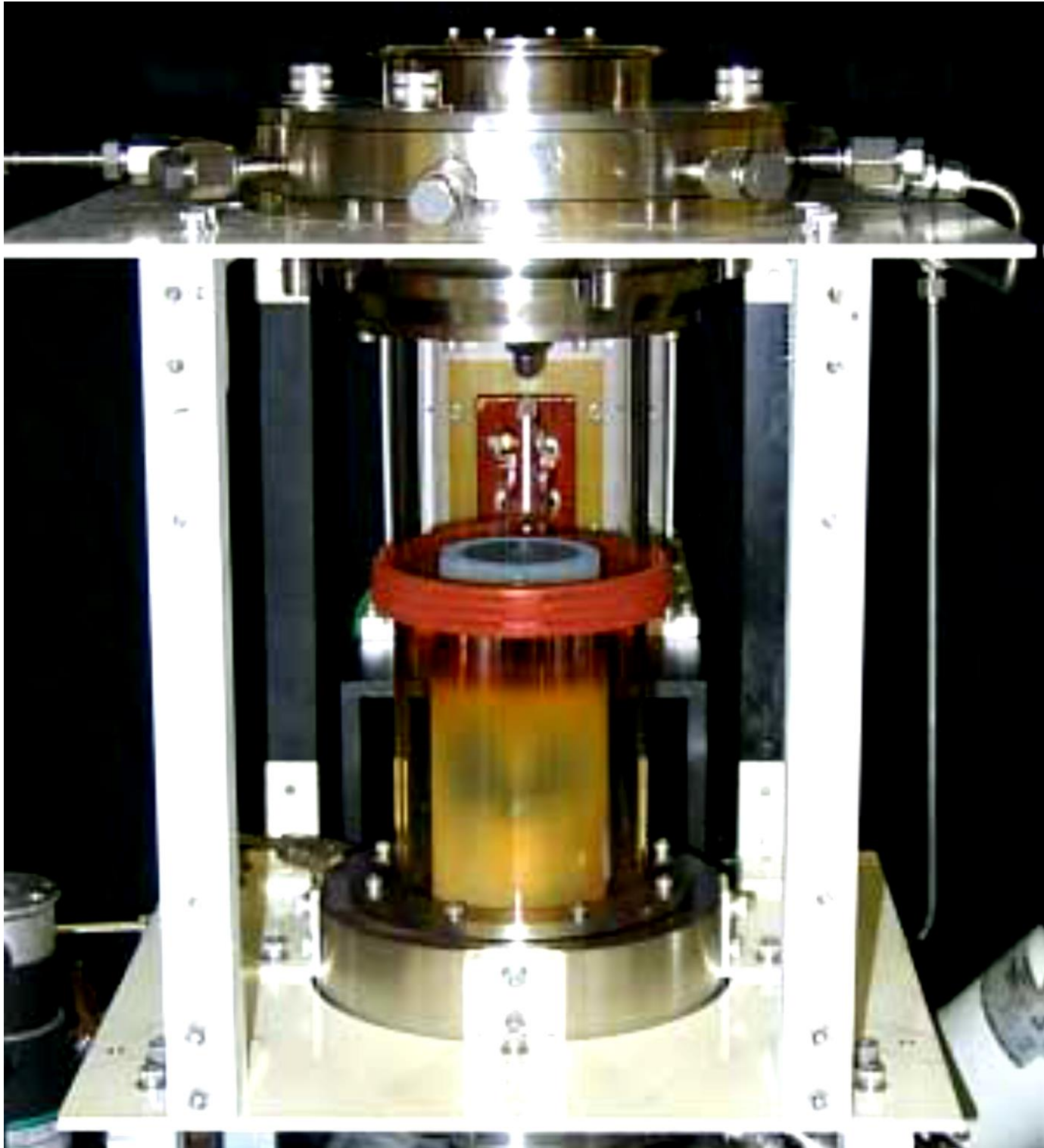


Komora do nakładania warstw epitaksjalnych z fazy gazowej związków metaloorganicznych (MOCVD)



Komora do nakładania warstw epitaksjalnych z fazy gazowej związków metaloorganicznych (MOCVD)





Komora pionowa do nakładania warstw epitaksjalnych z fazy gazowej związków metaloorganicznych (MOCVD)



Komory
planetarne
MOCVD



Types of epitaxial growths

explanation of used abbreviations:

SPE (Solid Phase Epitaxy)

LPE (Liquid Phase Epitaxy)

LPEE (Liquid Phase Electroepitaxy)

VPE (Vapour (Vapor) Phase Epitaxy)

CVD (Chemical Vapour Deposition)

PVD (Physical Vapour Deposition)

Main types of VPE epitaxial growths

Molecular Beam Epitaxy:

MBE (Molecular beam epitaxy)

SSMBE = Solid Source MBE,

CBE = Chemical Beam Epitaxy,

GSMBE = Gas Source MBE (Hydride Source MOMBE
or Metal Organic MBE),

UHV ALE = Ultra High Vacuum Atomic Layer Epitaxy.

Vapour Phase Epitaxy from organometallic:

MOVPE (MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy),

MOCVD (MetalOrganic Chemical Vapour Deposition),

Photo-MOVPE (Nonthermal, light activated),

Plasma-MOVPE (Nonthermal, plasma activated).