EPITAKSJA

Epitaksja z języka greckiego: *epi* + *taxis* = na + uporządkowanie.

Ta technologia polega na wzroście 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 tworzącej się warstwy (E_{ep}) i energią powierzchni jej styku z podłożem (E_i) a energią swobodną powierzchni podłoża (E_s).

1) Wzrost warstwa na warstwie (proces energetycznie stabilny):

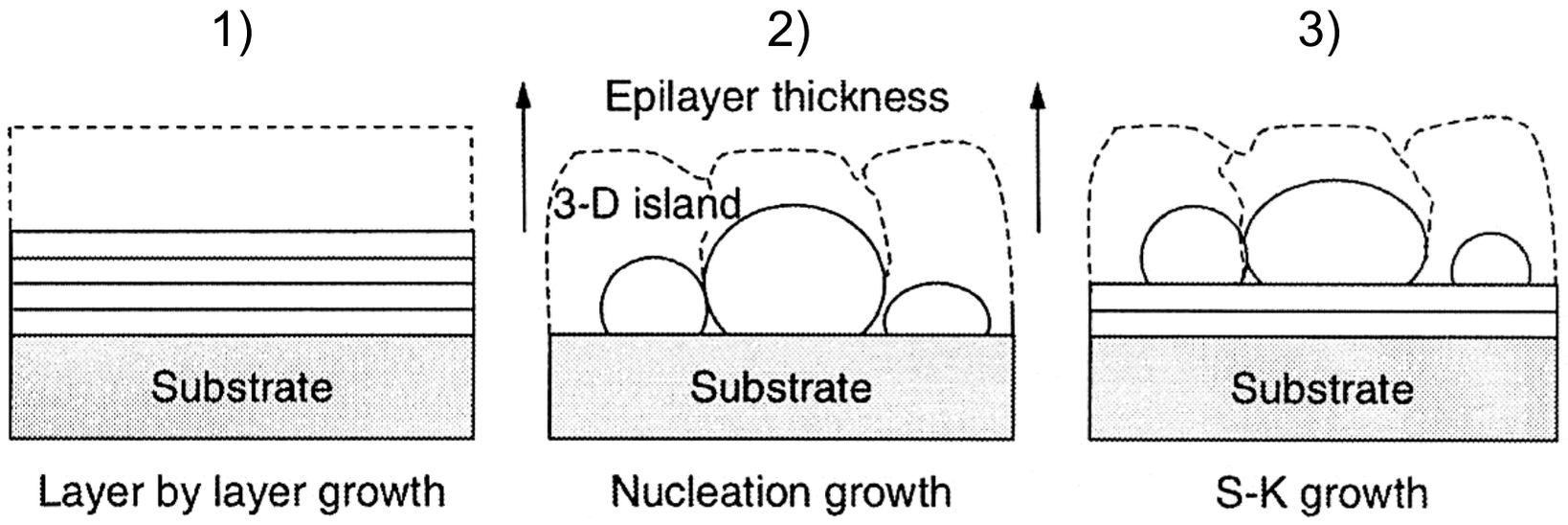
$$E_{ep} + E_i \leq E_s \quad \text{(zwilżanie)}$$

2) Wzrost przez zarodkowanie (brak stabilności energetycznej):

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

3) Wzrost warstwa na warstwie, a następnie przez zarodkowanie:

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



Technologie epitaksjalne

Najczęściej stosowane przy wytarzaniu półprzewodników:

MBE – Molecular Beam Epitaxy,

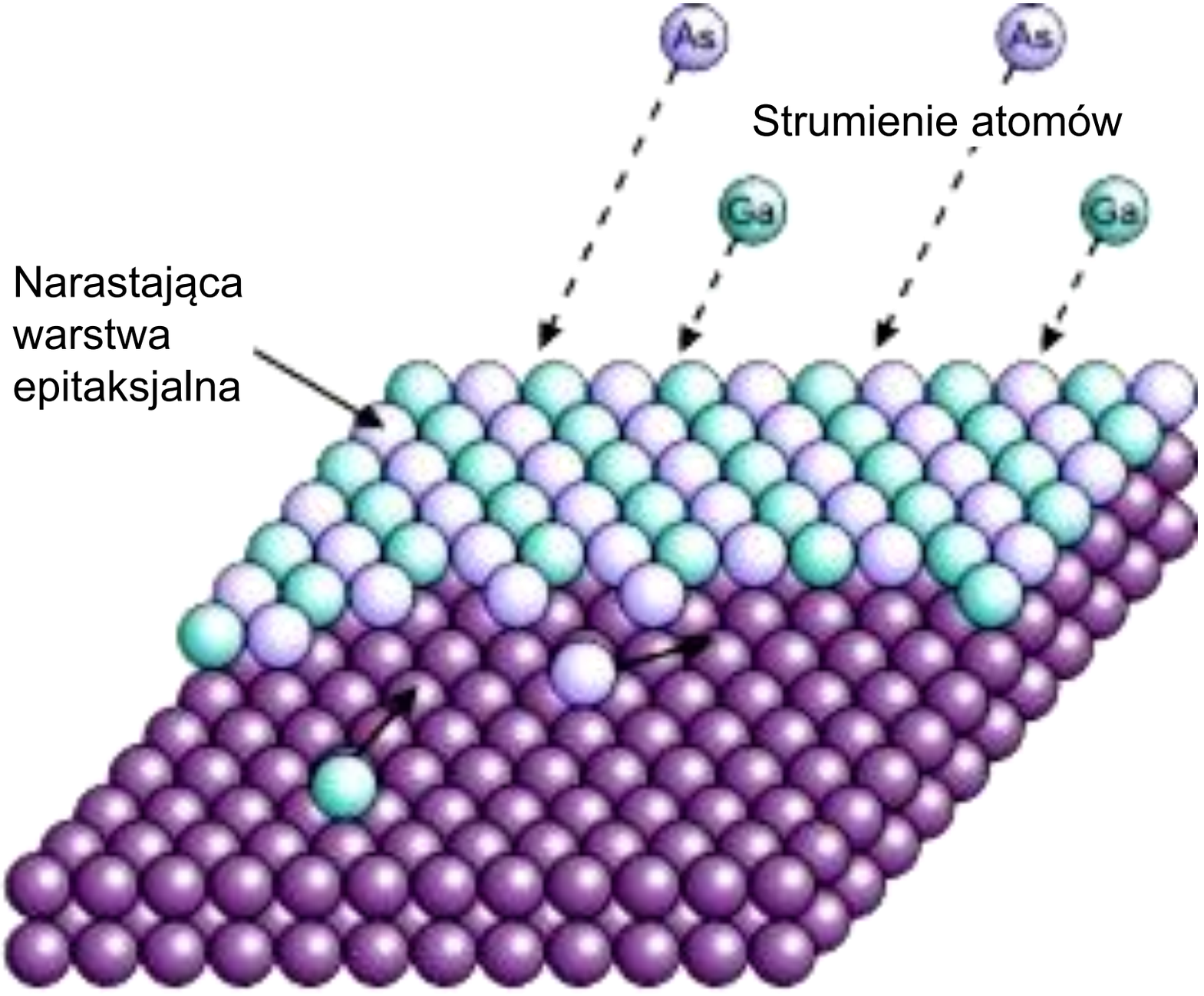
CVD – Chemical Vapour Deposition.

MBE - osadzanie warstw ze strumienia cząstek (atomów).

Podgrzewane podłoże jest umieszczone w komorze próżniowej.

Osiadanie atomów na podłożu 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, znajdujących się w komorach efuzyjnych.



Tworzenie warstwy epitaksjalnej

Komora do nakładania warstw epitaksjalnych

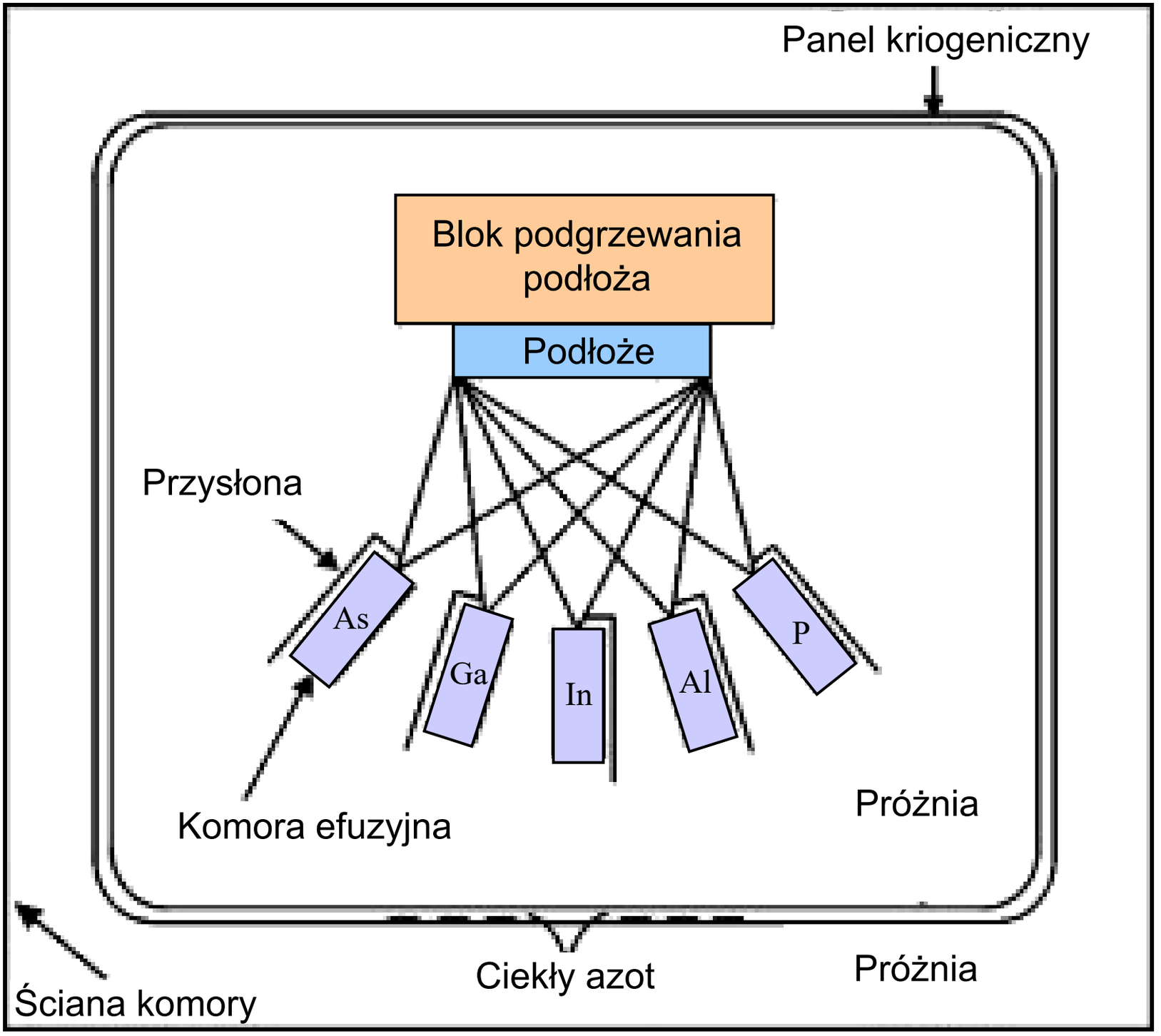
Wysoka próżnia (10^{-9} Pa) jest utrzymywana za pomocą systemu pomp: dyfuzyjnych, turbinowych, kriogenicznych, jonowych i sublimacyjnych tytanowych.

Temperatura wewnętrznych ścian komory wynosi 200 °C, co powoduje desorpcję substancji lotnych (H_2O, O_2, CO, CO_2).

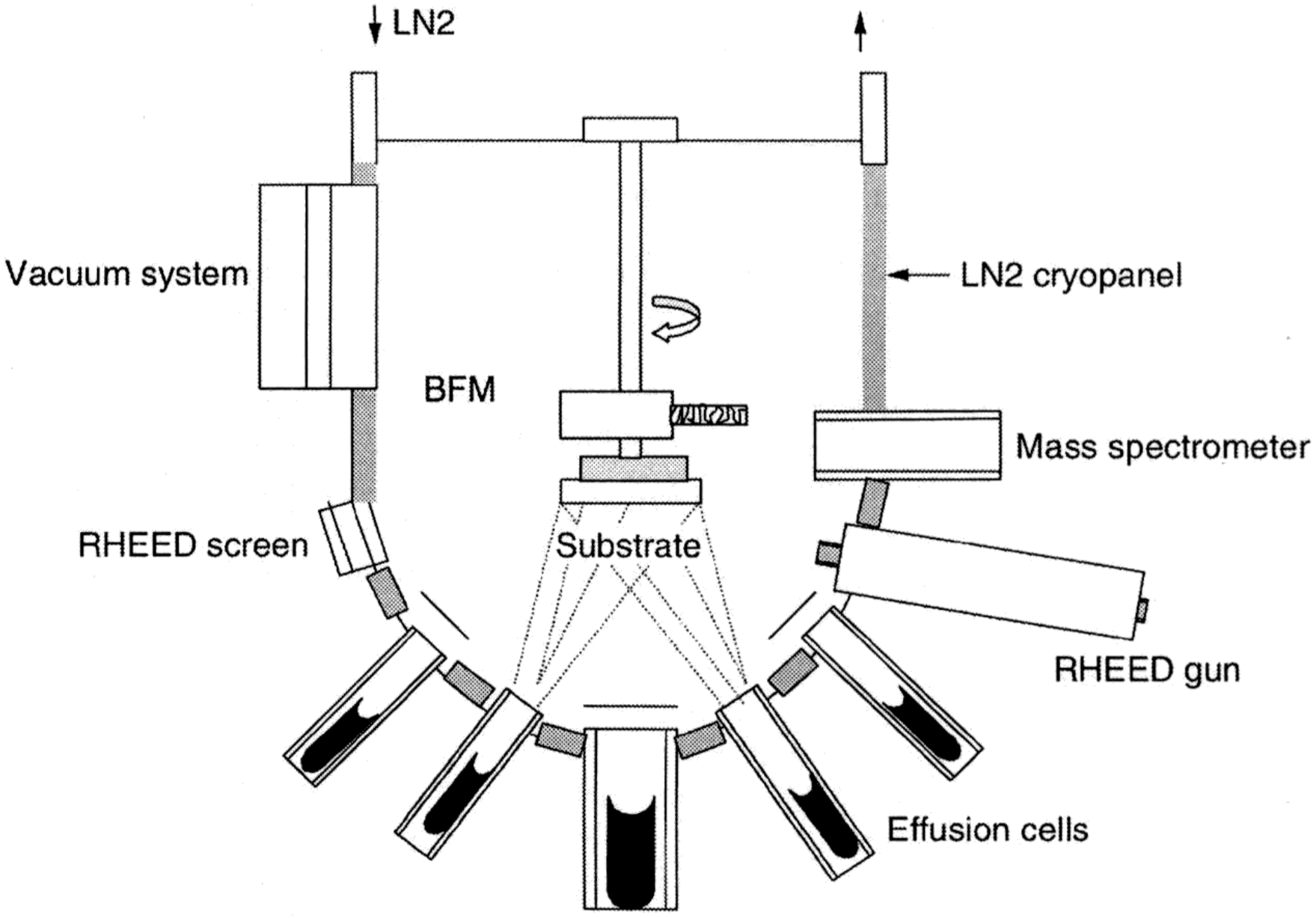
Wewnątrz komory jest panel (płaszcz) kriogeniczny z ciekłym azotem, do którego przyklejają się pozostałe w komorze cząstki, a także izoluje cieplnie komory efuzyjne.

Uwarunkowania procesu MBE:

- ściśle określona temperatura podłoża - powstaje warstwa monokrystaliczna,
- w niższej temperaturze powstaje warstwa amorficzna,
- w wyższej temperaturze następuje desorpcja warstwy,
- szybkość wzrostu warstwy: 1 μm/h (1-atomowa na sekundę),
- powtarzalne precyzyjne warstwy nawet o grubości kilku atomów,
- w materiałach wielowarstwowych uzyskuje się ostrą granicę między warstwami.



Szkic komory MBE



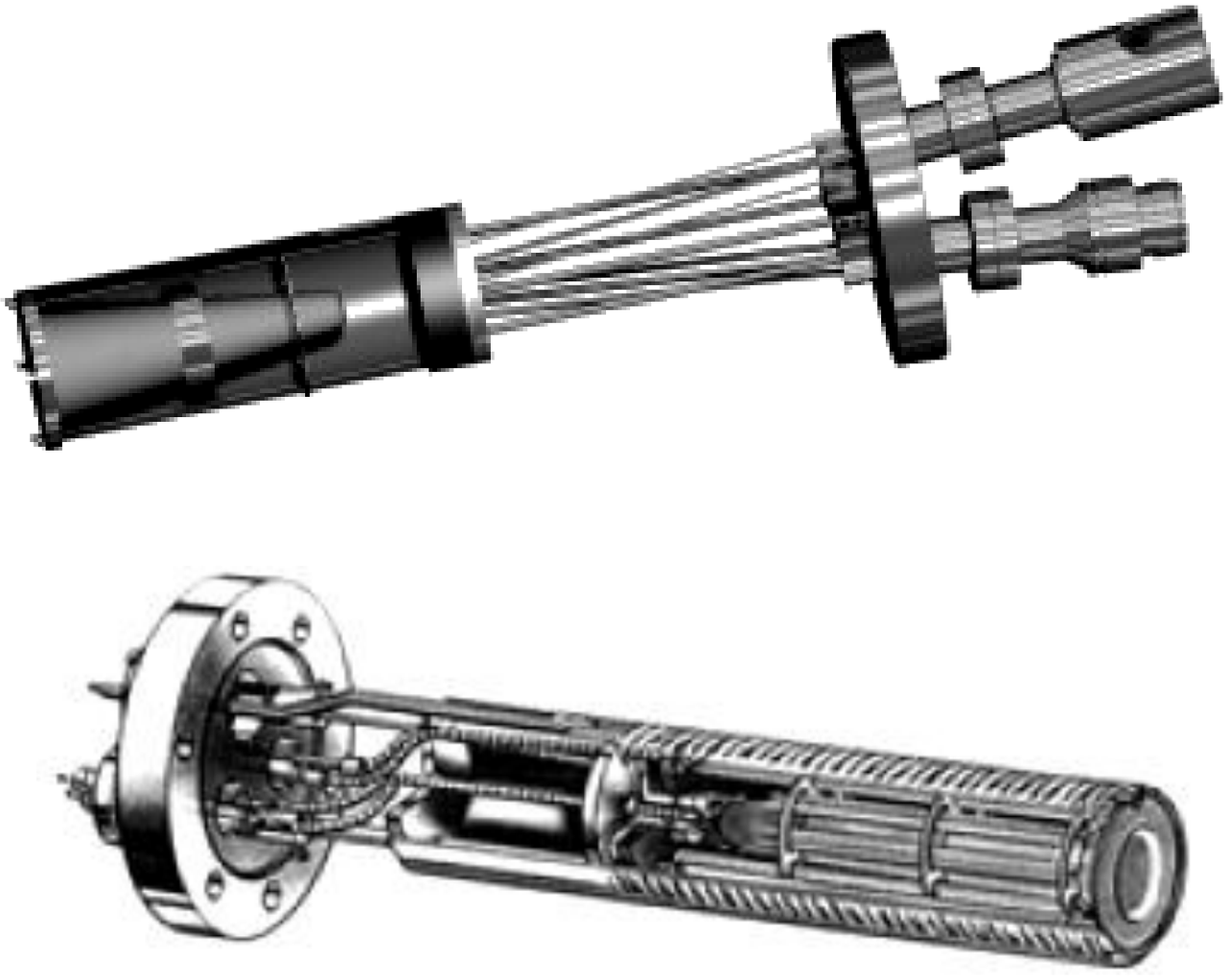
Schemat komory do nakładania warstw epitaksjalnych

RHEED – Reflection of High Energy Electron Diffraction

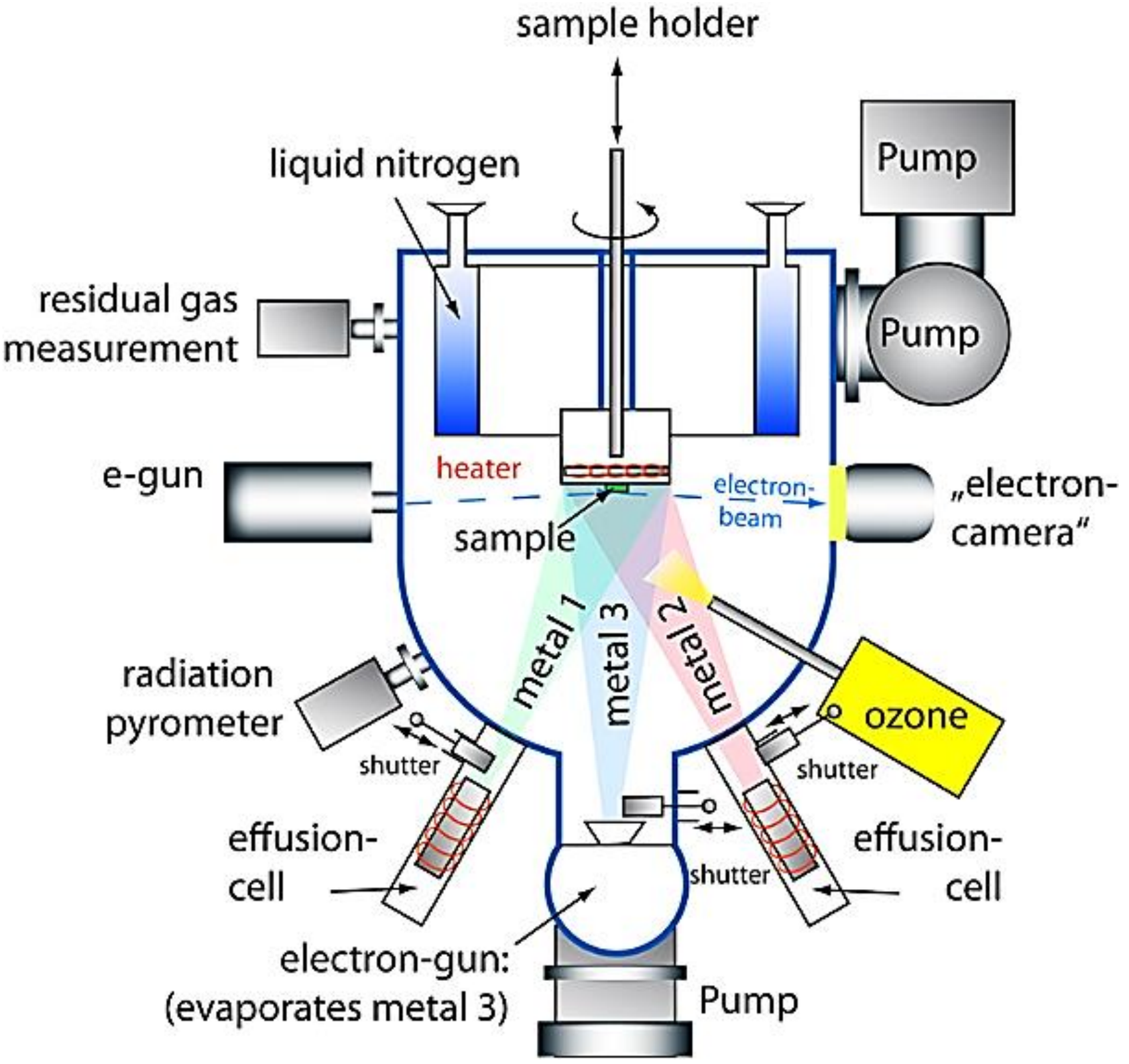
BFM - Beam Flux Monitor

Prosta komora efuzyjna:

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



Widok komór efuzyjnych



Schemat komory do nakładania warstw epitaksjalnych

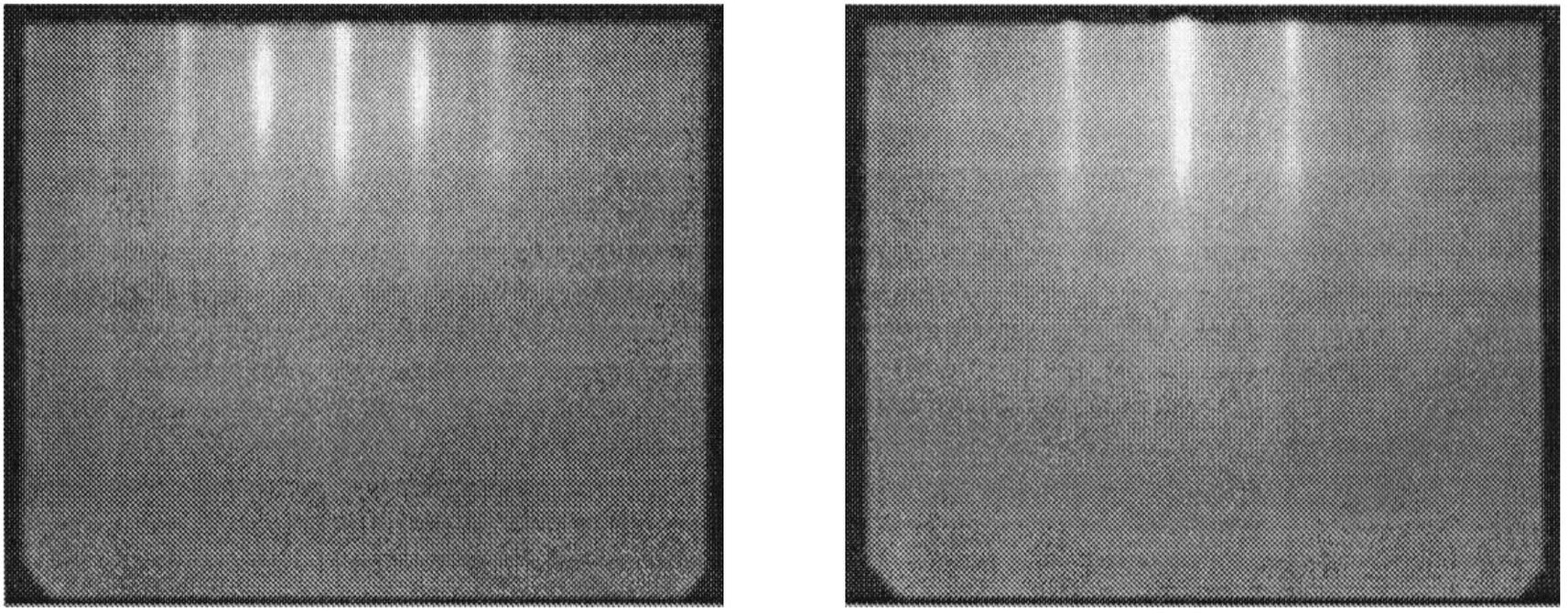
Pomiar grubości i płaskości powierzchni warstwy epitaksjalnej

Strumień elektronów o wielkiej energii (20 keV) pada na powierzchnię warstwy pod kątem od 1 do 3 stopni.

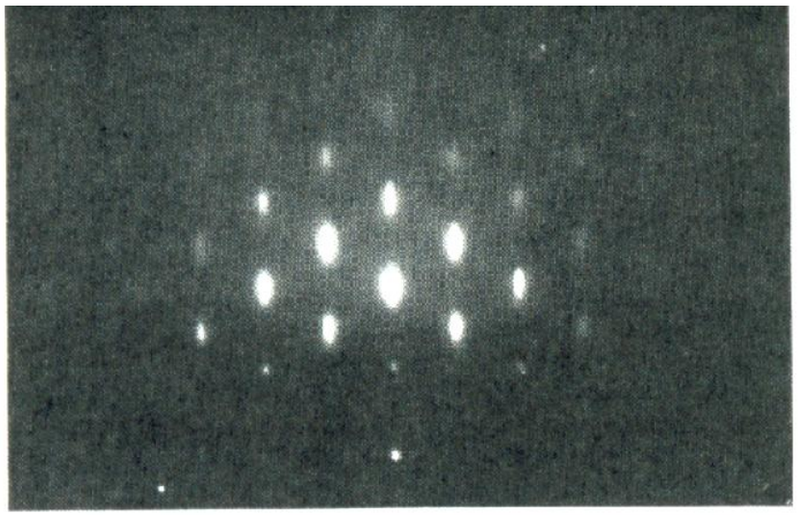
Odbity strumień pada na ekran fluorescencyjny.

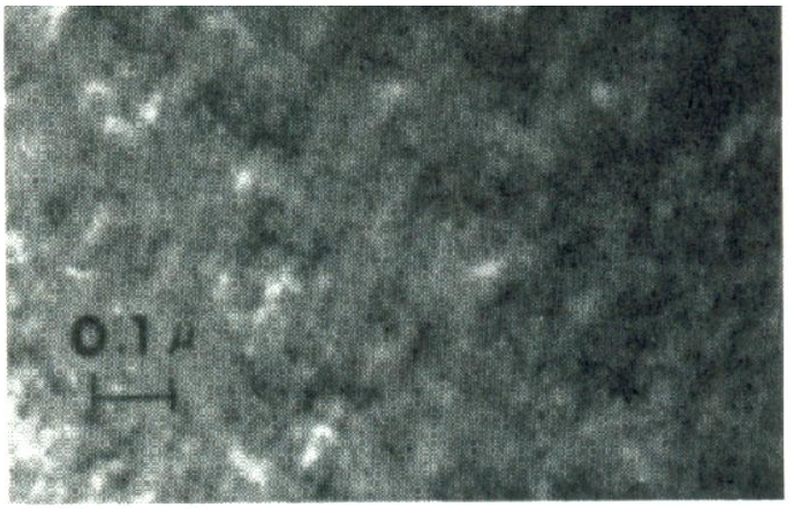
Obraz prążkowy świadczy o dokładnie płaskiej powierzchni.

Obraz w postaci plamek jest spowodowany nierównościami.

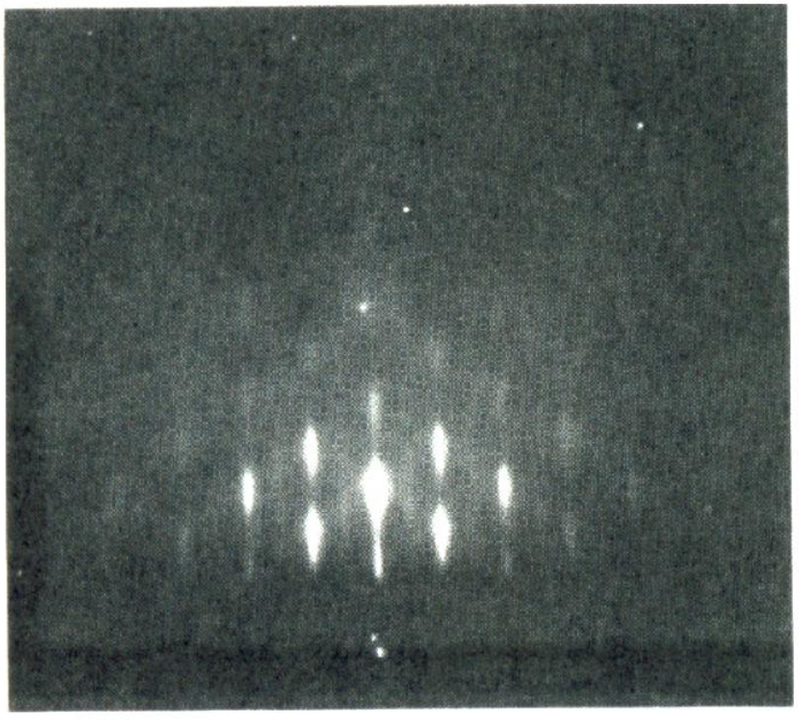


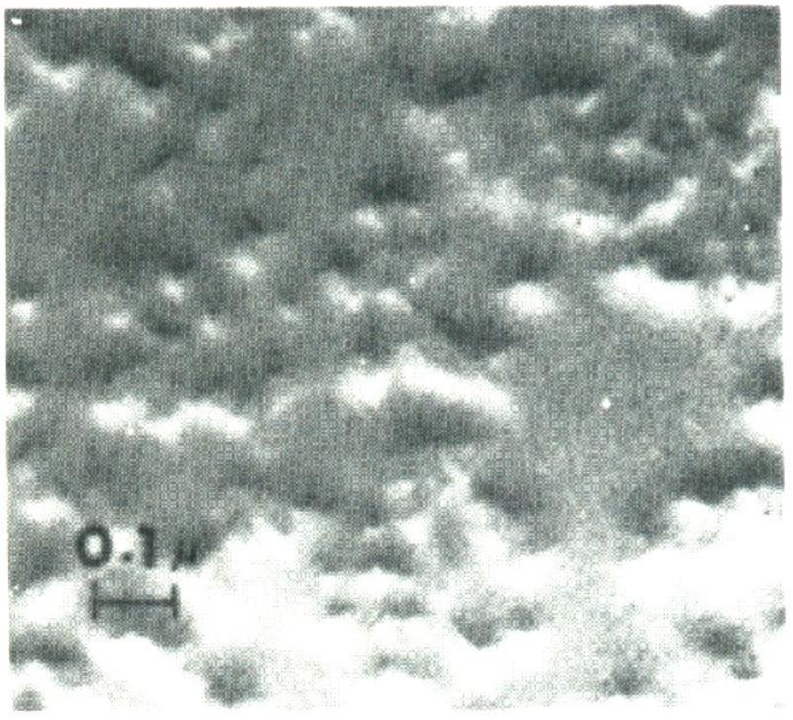
Obraz elektronowy warstwy epitaksjalnej $SrTiO_3$ w kierunku: [010] i [110]





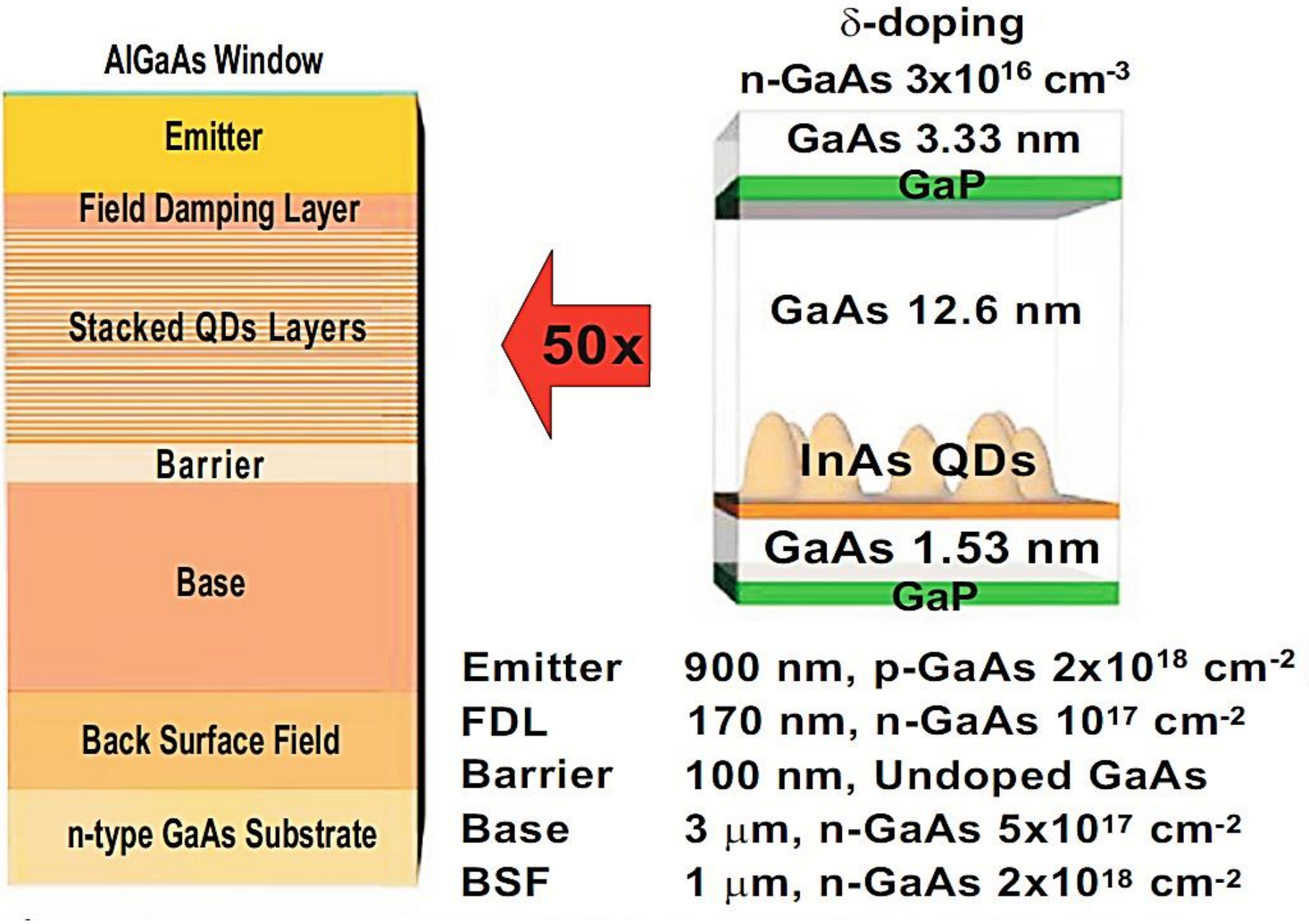
(a)





(b)

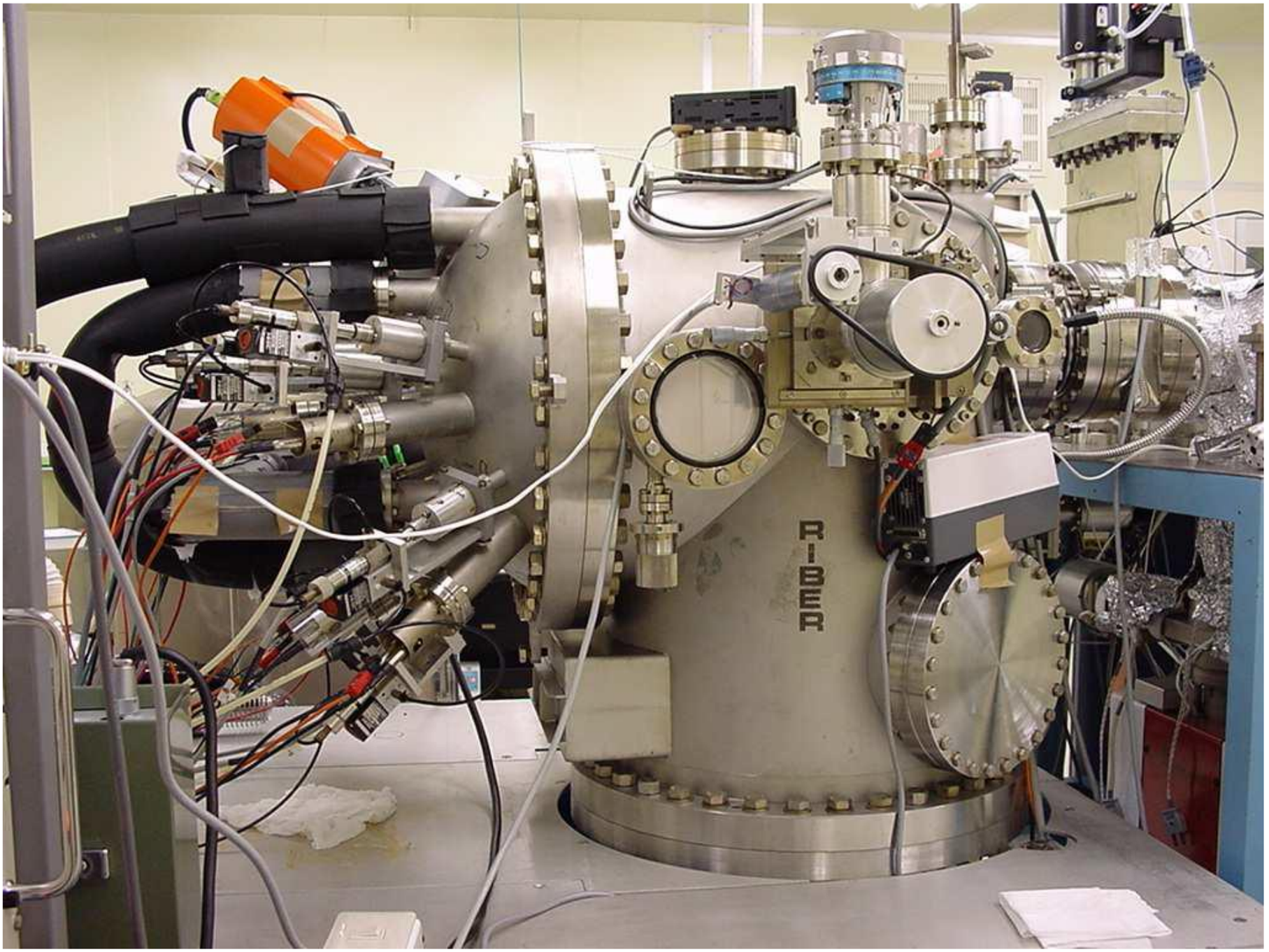
Obraz elektronowy warstw epitaksjalnych GaAs:
(a) pierwsza warstwa, (b) kolejna warstwa



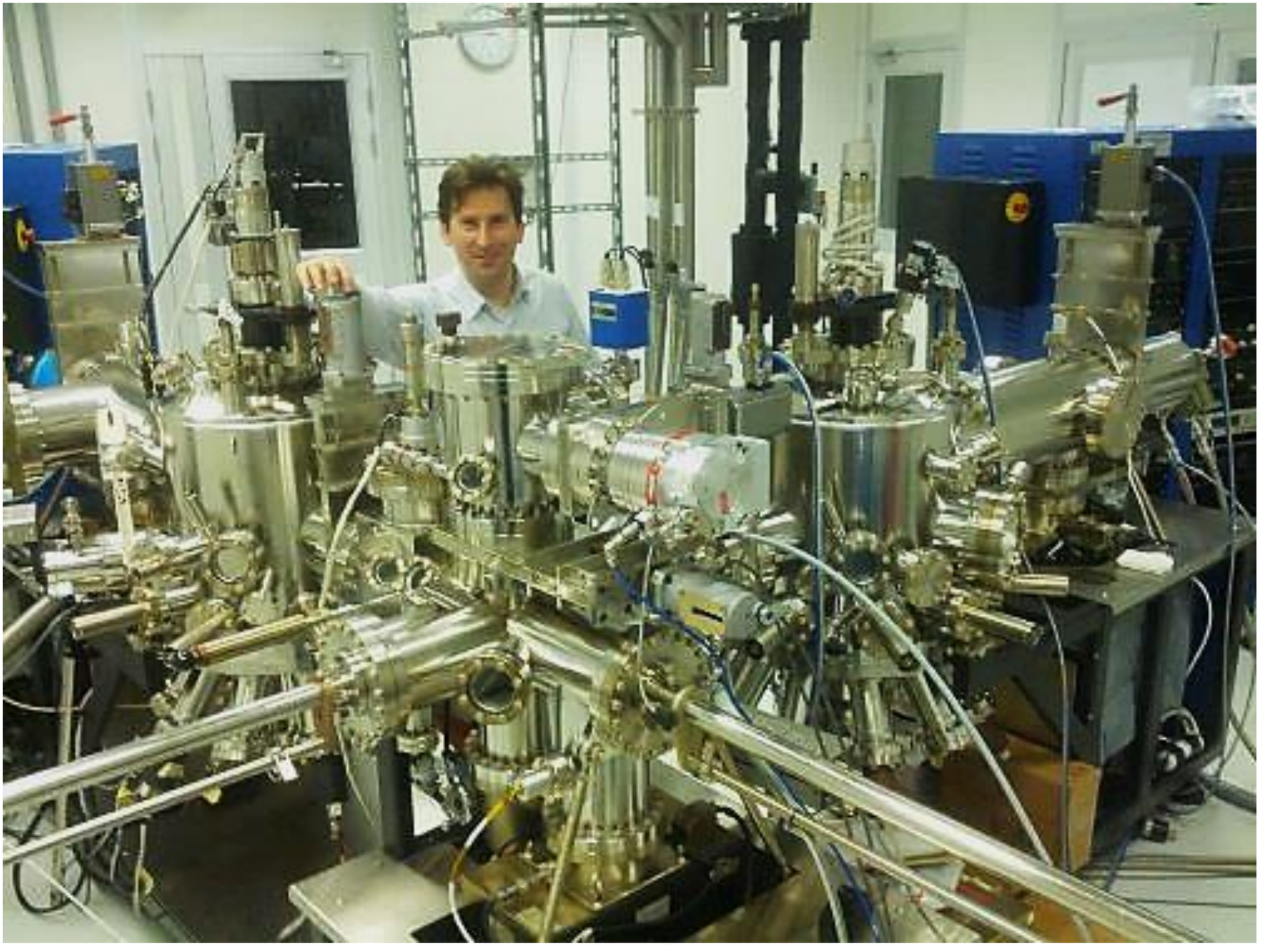
Struktura 50 warstw kropek kwantowych ogniwa fotowoltaicznego, wykonana technologią MBE. Każda warstwa GaP ma nominalną grubość jednego atomu (0,273 nm).



Laboratorium na Wydziale Fizyki UW, system produkcyjny MBE



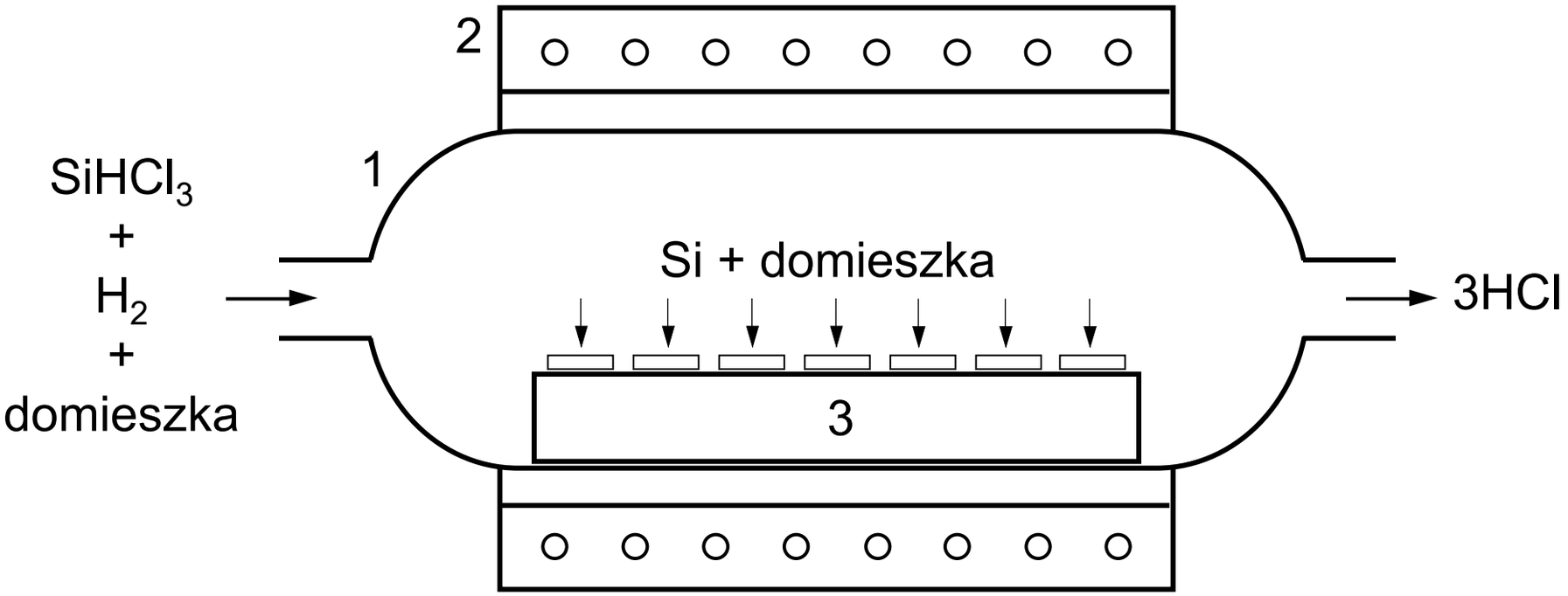
Laboratorium na Wydziale Fizyki UW,
system produkcyjny MBE - komora epitaksjalna



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 - kaseta z płytkami krzemowymi.

MOCVD - odmiana CVD

Metal-Organic Chemical Vapour Deposition

(z wykorzystaniem związków metaloorganicznych w fazie gazowej)

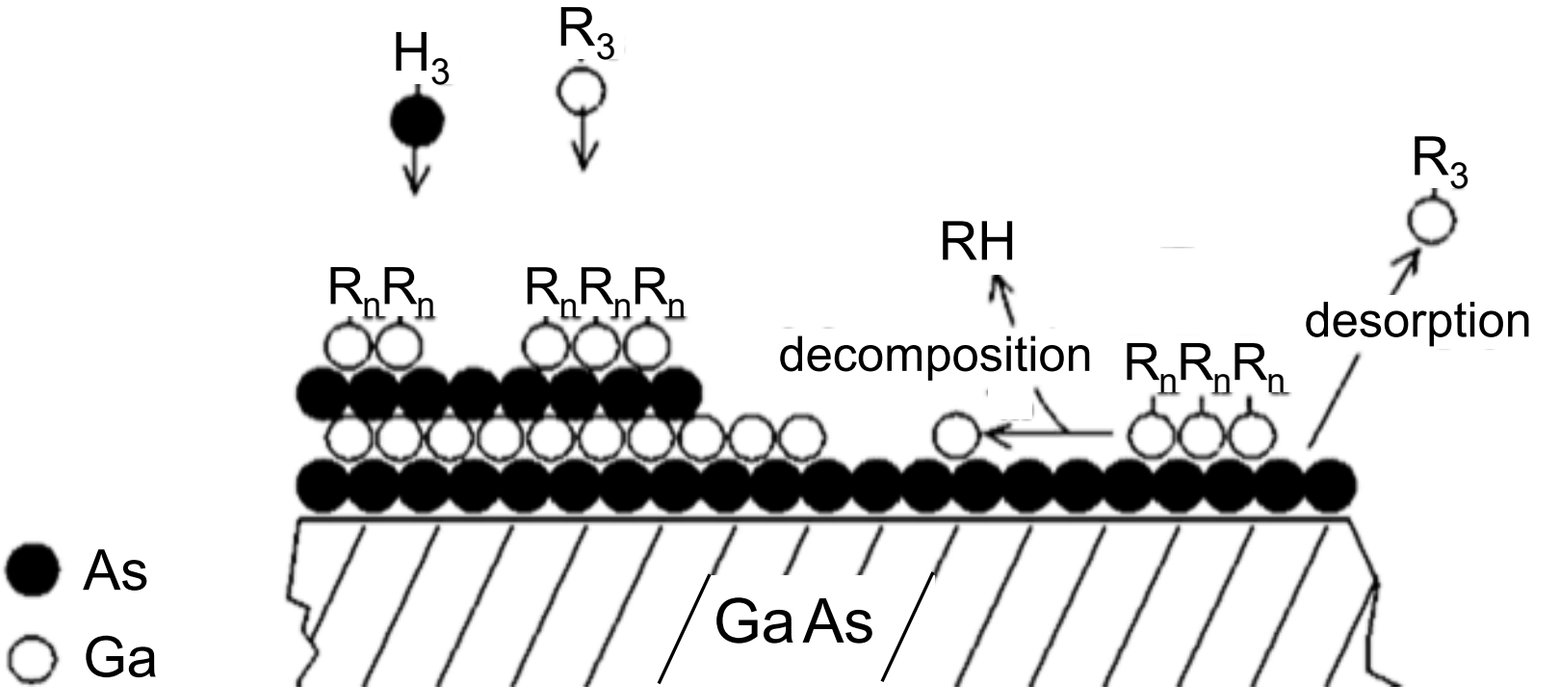
Reakcje na powierzchni podłoża:

$$AR_{3(g)} + BH_{3(g)} \rightarrow AB_{(s)} + 3RH_{(g)}$$

AR_3 - związek metaloorganiczny pierwiastka III grupy,

BH_3 - wodorek pierwiastka V grupy.

Przykład: $Ga(CH_3)_3 + AsH_3 \rightarrow GaAs + 3CH_4$

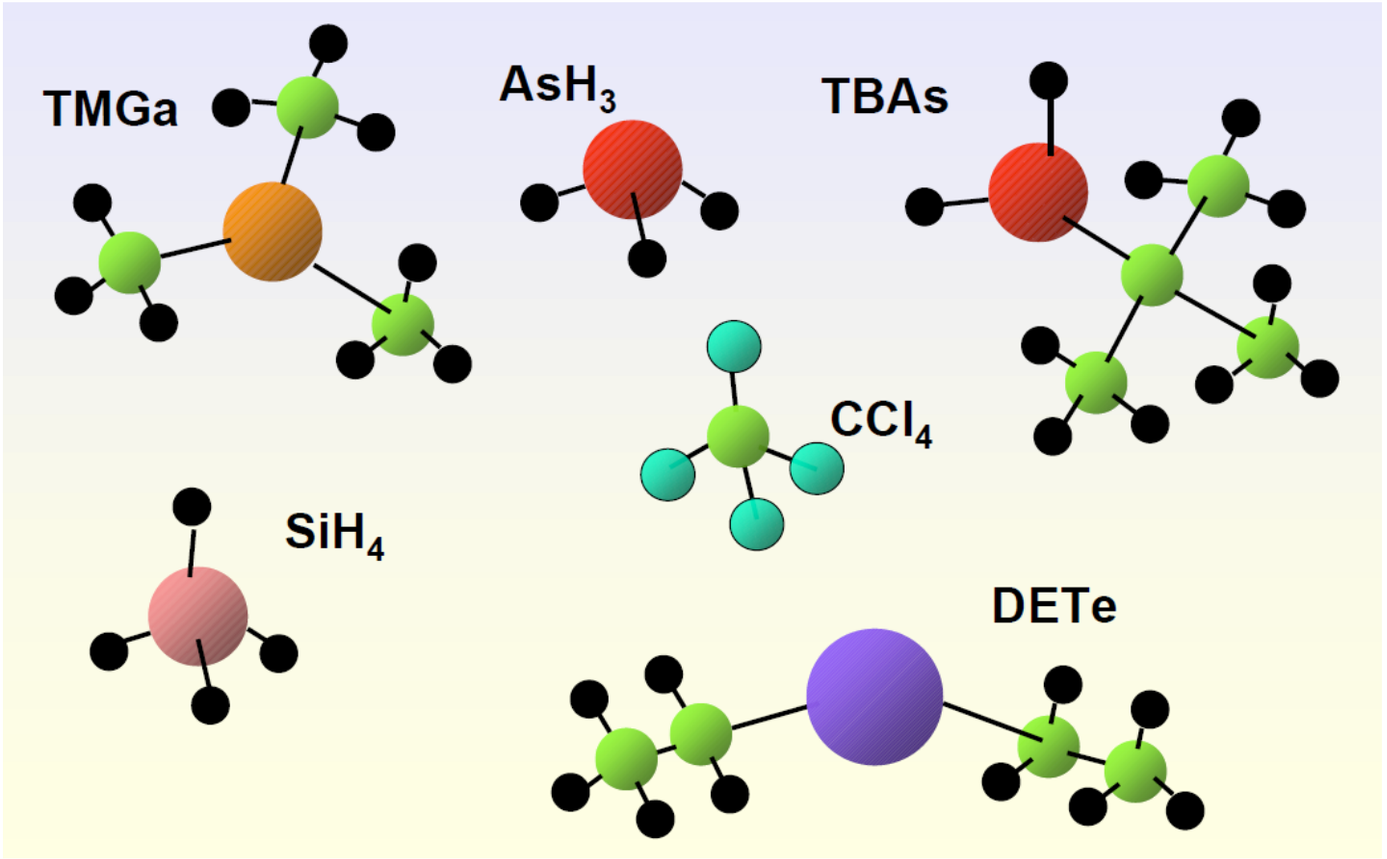


Model wzrostu warstw w technologii MOCVD:

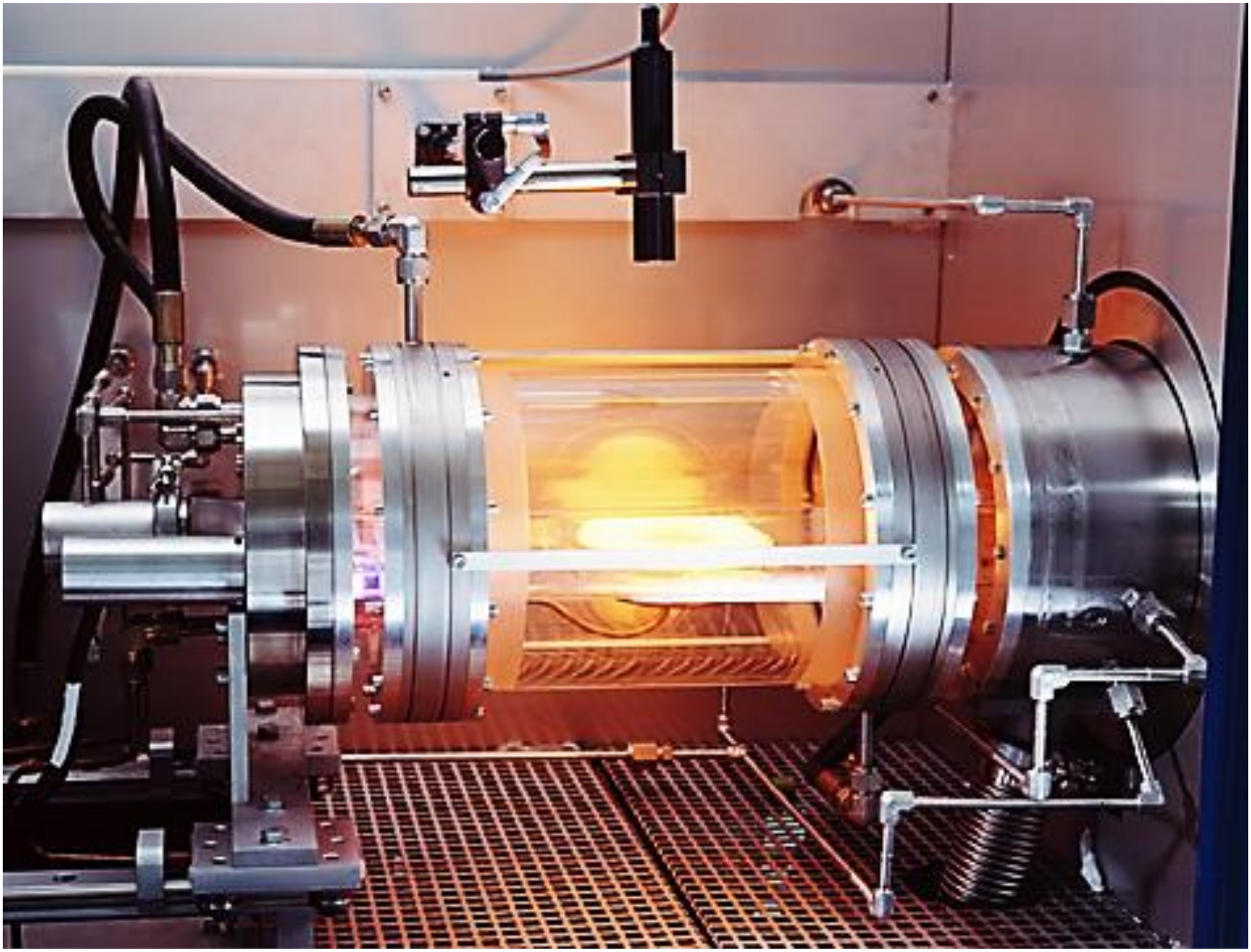
$R_3 = 3CH_3$, $R_n = nCH_3$, np. $(CH_3)_2$ lub $(CH_3)_3$

Najczęściej używane związki chemiczne:

- trójmetylek galu **$Ga(CH_3)_3$** (w skrócie **TMGa**),
- trójetylek glinu **$Al(C_2H_5)_3$** (w skrócie **TEAl**),
- trójbutylek arsenu **$As(C_4H_9)_3$** (w skrócie **TBAs**),
- bicyklopentadienyl magnezu **Cp_2Mg**,
- bimetylcyklopentadienyl magnezu **$(CH_3C_5H_4)_2Mg$**,
- arsenowodór **AsH_3**, krzemowodór **SiH_4**, amoniak **NH_3**,
- gaz transportujący, np. **H_2**, **N_2**.

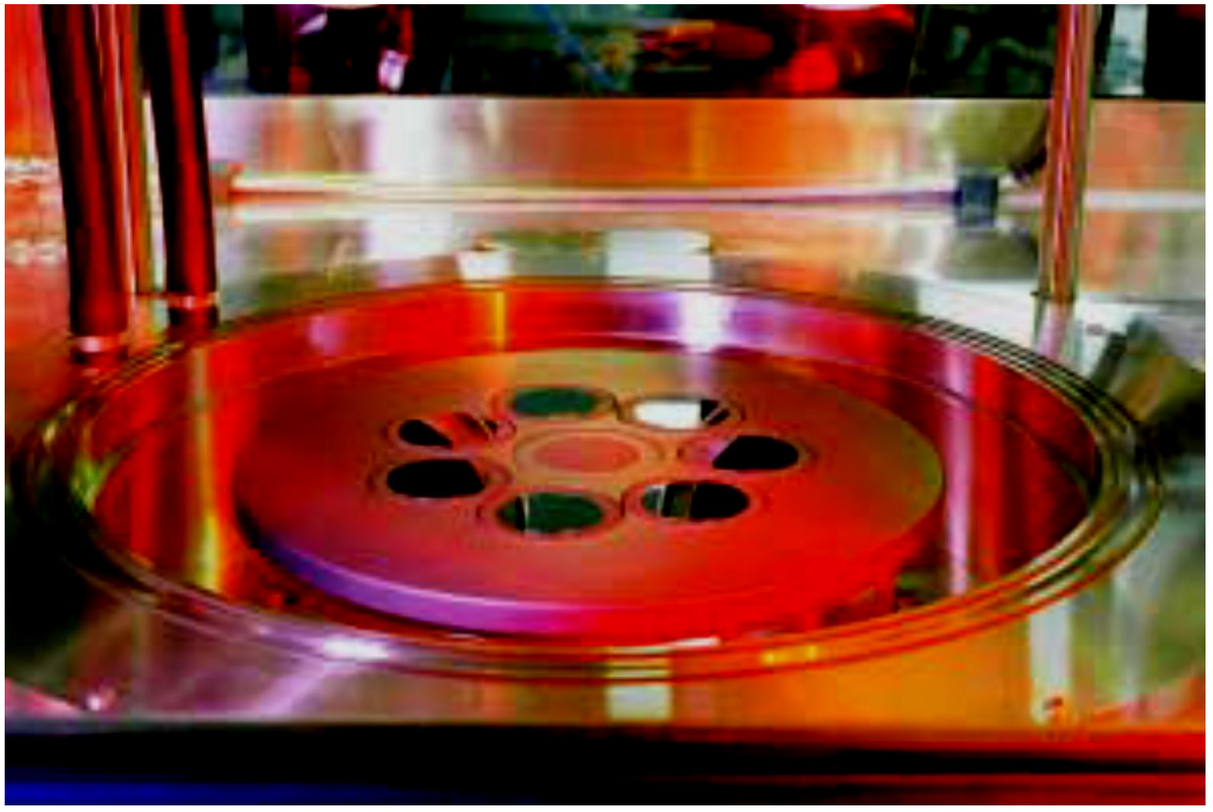


$$TMGa + AsH_3 \rightarrow GaAs + 3CH_4$$



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





Komory planetarne MOCVD

Podstawowe rodzaje technologii epitaksjalnych:

MBE = Molecular Beam Epitaxy,

SSMBE = Solid Source MBE,

GSMBE = Gas Source MBE,

HSMBE = Hydride Source MBE,

MOMBE = Metal Organic MBE,

CBE = Chemical Beam Epitaxy,

UHVALE = Ultra High Vacuum Atomic Layer Epitaxy,

SPE = Solid Phase Epitaxy,

LPE = Liquid Phase Epitaxy,

LPEE = Liquid Phase Electroepitaxy,

VPE = Vapour Phase Epitaxy,

CVD = Chemical Vapour Deposition,

PVD = Physical Vapour Deposition,

MOCVD = MetalOrganic Chemical Vapour Deposition,

MOVPE = MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy,

Photo-MOVPE (Nonthermal, light activated),

Plasma-MOVPE (Nonthermal, plasma activated).