

Plan

1. Przegląd struktur niskowymiarowych
 - a. studnie kwantowe, supersieci, wytwarzanie
 - b. druty kwantowe, kropki kwantowe; wytwarzanie
 - nanokryształy
 - struktury samorosnące
 - c. charakter widm optycznych
 - d. własności transportu
2. Fizyka heterozłącza
 - a. proste modele kwantowe
 - b. n-wymiarowy gaz elektronowy
3. Metoda ciasnego wiązania
4. Metoda orbitali wiążących
5. Teoria masy efektywnej
6. Metoda kp
7. Przybliżenie funkcji obwiedni
8. Symetrie funkcji falowych
9. Struktura energetyczna pasm przewodnictwa i walencyjnego
 - a. model jednopasmowy
 - b. modele wielopasmowe
 - c. oddziaływanie spin-orbita
 - d. podpasma
 - e. supersieci, minipasma
 - f. nanokryształy; układy 0-wymiarowe
10. Domieszkowane studnie kwantowe
Rzeczywisty gaz kwazi-2D
Lasery na studniach kwantowych
11. Inne struktury półprzewodnikowe
12. Struktury węglowe
 - nanorurki

- grafem

13. Opis przejść kwantowych
 - a. układy warstwowe
 - b. kropki kwantowe

14. Własności elektryczne struktur niskowymiarowych
 - a. rezonansowe tunelowanie
 - b. układy wielu barier w polu elektrycznym
 - c. oscylacje Blocha; poziomy Starka

15. Struktura energetyczna domieszek i ekscytonów
16. Wpływ pola magnetycznego
 - a. kwantowy efekt Hall'a

17. Elektronika pojedynczego elektronu
 - a. blokada kulombowska
 - b. tranzystor jednoelektronowy

literatura:

1. G.Bastard,
Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures,
Les edit.de physique 1990

2. C.Weisbuch, B.Vinter,
Quantum semiconductor structures AP, 1991

3. P. Harrison
Quantum Wells, Wires and Dots, Wiley 2000

4. I.M.Cydlikowski,
Elektrony i dziury w półprzewodnikach, PWN 1976

5. L.Banyai, S.W.Koch
Semiconductor quantum dots
WS 1993

6. L.Jacak, P.Hawrylak, A.Wojs
Quantum dots (Kropki kwantowe –wersja polska)
Springer 1998
7. H.T.Grahn (ed)
Semiconductor superlattices
WS 1995
8. T.Ando, et.al
Mesoscopic physics and electronics
Springer 1998
- 9. Nanotechnologie, PWN**
R.W. Kelsall, I.W. Hamley, M. Geoghegan
Tytuł oryginalny: Nanoscale Science and Technology

Wstęp

Kwantowe struktury półprzewodnikowe:

struktury półprzewodnikowe (złożone z jednego lub kilku różnych materiałów półprzewodnikowych), w których z powodu zaburzenia symetrii translacyjnej (periodyczności) w jednym lub w kilku kierunkach przestrzennych dochodzi do częściowej lub całkowitej dyskretyzacji widma energii (w pewnym zakresie energii pasm) co prowadzi do kwantowego charakteru obserwowanych w nich (tych strukturach) zjawisk fizycznych (widma optyczne, transport ładunku, itp)

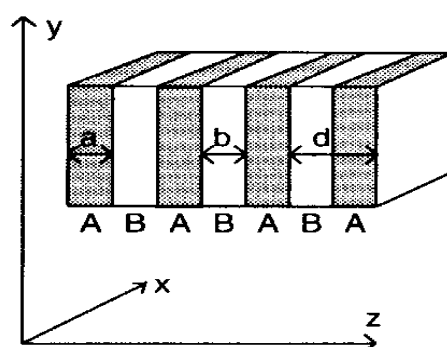
zaburzenie periodyczności - celowe – dokonywane w procesie fabrykacji struktur

najbardziej ogólny podział:

- Struktury 2-wymiarowe (2D):
otrzymywane z układów 3D przez zaburzenie symetrii translacyjnej w jednym kierunku przestrzennym

rozmiary poprzeczne – makroskopowe (> mikrometra)
rozmiary w kierunku zaburzonej symetrii transl. – mezo-nano

Studnie kwantowe (*struktury kanapkowe*)
Układy wielu barier
Supersieci

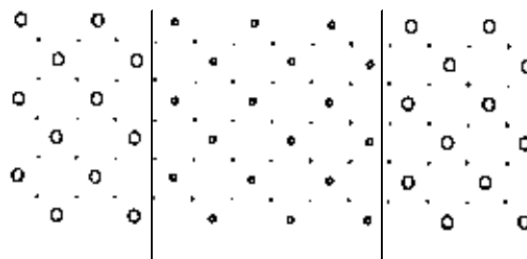


Kierunek z - dowolny krystalograficzny kierunek wzrostu, np. dla sieci w typie regularnym: (001) lub (111), rzadziej kierunki prostopadłe do płaszczyzn o wysokich indeksach...

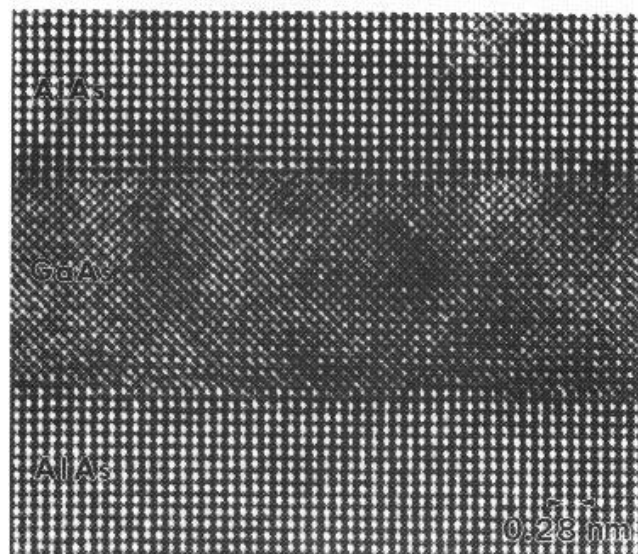
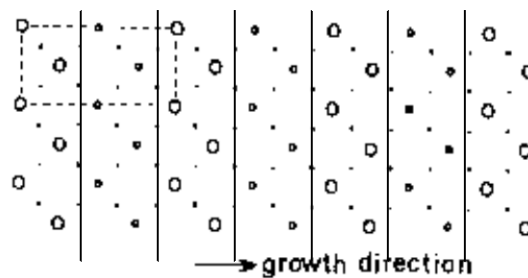
taka sama struktura krystaliczna – inne atomy, inne stałe sieci



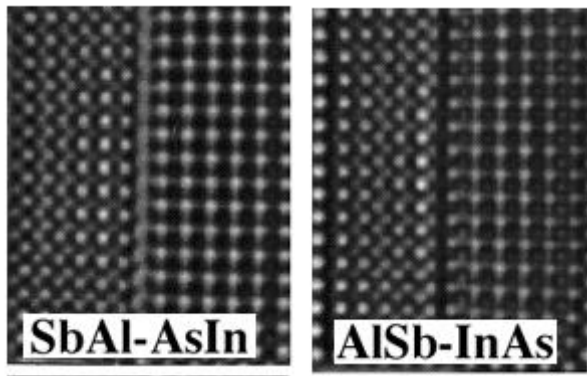
(b) quantum well



(c) superlattice



Wysokiej rozdzielczości obraz podwójnego heterozłącza AlAs/GaAs wykonany techniką TEM



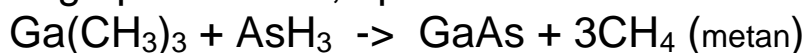
- Struktury 1-wymiarowe: **druty kwantowe**
zaburzenie symetrii translacyjnej w 2 kierunkach przestrzennych
(ale też np. nanorurki węglowe)
- Struktury 0-wymiarowe (0D):
kropki kwantowe
nanokrystaliny (nanokryształy)
wyspy kulombowskie

**Wymiarowość struktur =
wymiar gazu kwaziswobodnych elektronów =
ilość niezaburzonych wymiarów przestrzennych**

Techniki nakładania warstw

- Epitaksja z wiązek molekularnych (MBE)
molecular beam epitaxy
- MOPVE (MO epitaksja z fazy gazowej)
metalo-organic phase vapor epitaxy

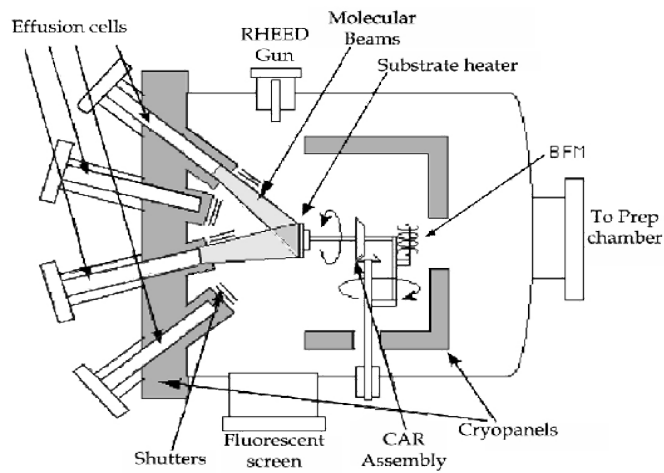
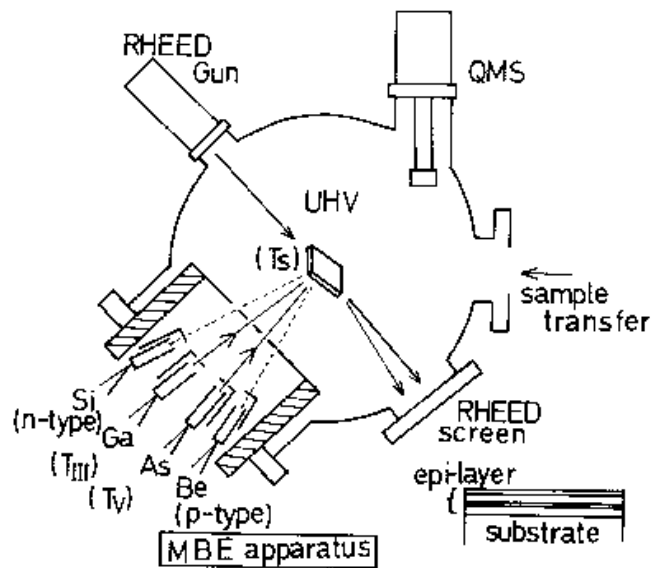
wprowadzenie związku metaloorganicznego i wodoru danego pierwiastka, np.:

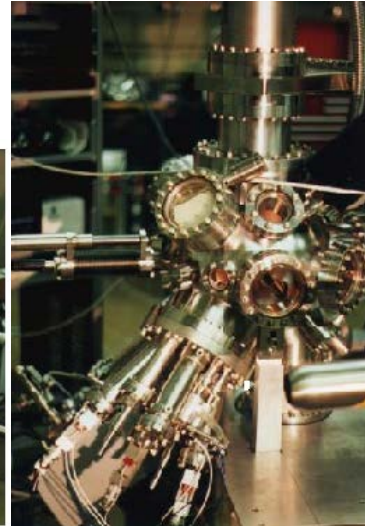


- CVD, MOCVD (chemiczne osadzanie z fazy gazowej)

tu – ciśnienia normalne lub podwyższone, wzrost odbywa się przez reakcje na powierzchni metalo-organicznych reagentów

MBE (~60/70, Bell Lab. J.R. Arthur | A.Y. Cho)
(temp > 10^3 C)





komora wzrostu



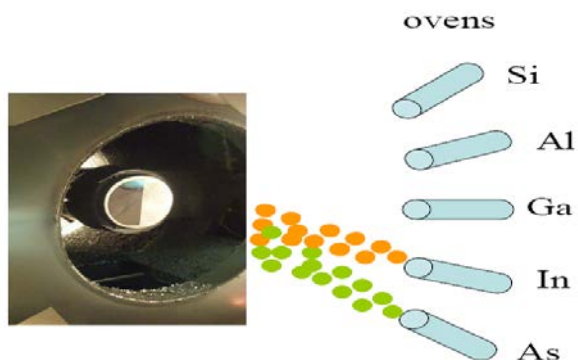
Parametry

Wysoka próżnia: 10^{-6} - 10^{-8} tora

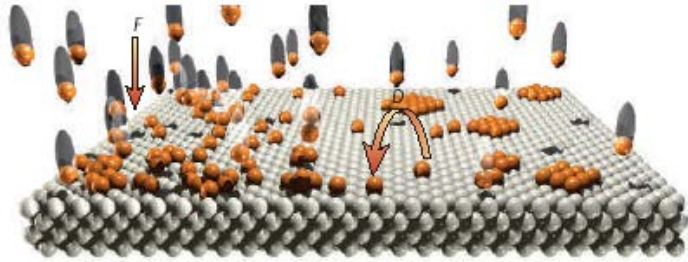
Temperatury: 10^2 - 10^3 K (dokł. 0.1 K)

Czasy otwierania przesłon z dokł. $< 10^{-1}$ s

MBE – szybkość wzrostu $1\mu\text{m} / \text{h} \sim 1\text{ML} / \text{s}$



- osadzanie pojedynczych atomów, dimerów molekularnych;
- czynniki determinujące charakter wzrostu:
 - * stopień (szybkość) dyfuzji powierzchniowej (migracji),
 - * strumień epitaksji,
 - * orientacja podłoża



- heteroepitaksja - podłoże o innej str. kryst. (inny kryształ)
- Homoepitaksja - podłoże o identycznej str. kryst.

- bezdefektowe, epitaksjalne nakładanie warstw możliwe tylko dla struktur krystalizujących w tych samych sieciach i o podobnych stałych sieciowych a

Taki proces nakładania „dopasowanych sieciowo” warstw nazywa się „**wzrostem pseudomorficznym**”

- Podstawowe grupy kryształów złożonych

III-V : GaAs, InAs, AlAs, InP

II-VI : ZnS, CdS, CdSe, HgS, ZnSe

Krystalizują podobnie jak C, Ge, Si (IV)

Struktura blendy cynkowej (diamentu) lub wurcytu

Wiązanie kowalencyjne:

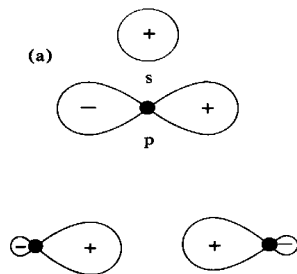
walencyjne elektrony atomowe – orbitale s i p

Hybrydyzacja sp^3 (ns^2np^x, ms^2mp^{4-x})

(4 elektrony obsadzające powłoki walencyjne)
energie orbitalne walencyjnych elektronów ns, np są porównywalne (kwazi-degeneracja):

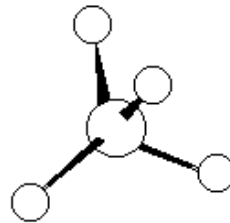
z orbitali s, p_x, p_y, p_z można utworzyć 4 orbitale hybrydowane - kierunkowe (których gęstości „wskazują” naroża tetraedru)

kombinacja $s+p$

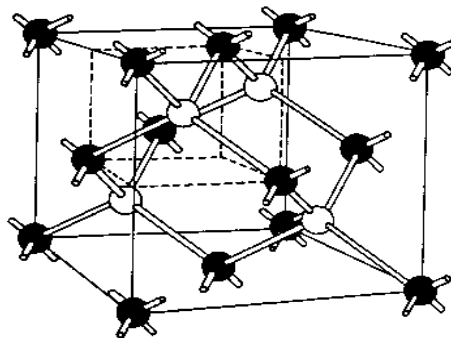
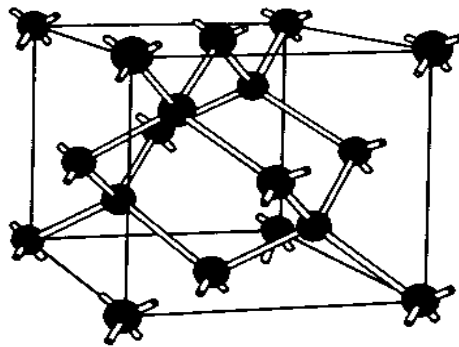


sp

kombinacja $s+p_x+p_y+p_z$



sp^3



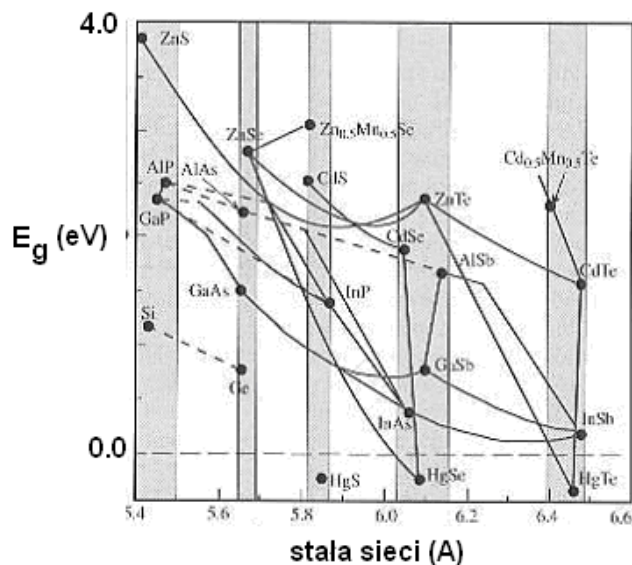
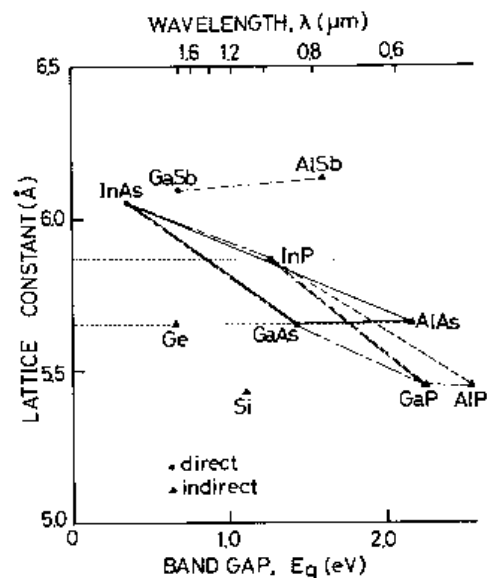
A unit cell of the diamond crystal structure (top) and the zinc blende crystal structure. The rods are meant to emphasize the tetrahedral bonds between each atom and its four nearest neighbors. These are also shown in Fig. 3-7 but here the emphasis is on the tetrahedral bonding.

epitaksjalny, dopasowany (bez deformacji sieci) wzrost jednego kryształu A na podłożu B wymaga identycznej struktury krystalicznej i bardzo zbliżonej stałej sieciowej

na podłożu zorientowanym (001) lub (111) - wzrost ułatwiony – każdy atom powierzchniowy dysponuje taką samą liczbą niewysyconych wiązań chemicznych (*dangling bonds*);

na podłożu o orientacji z wysokimi indeksami - wzrost utrudniony – deponowane atomy mogą trafiać w miejsca różniące się ilością niewysyconych wiązań (powierzchniowych); silna migracja z miejsc o słabszym wiązaniu = silna dyfuzja powierzchniowa

szerokość przerwy wzbronionej a stała sieci



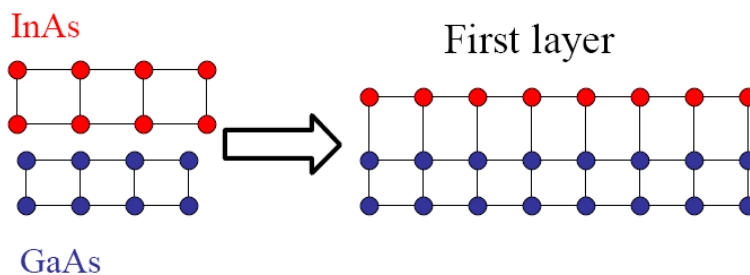
CVD – MOCVD – nie w próżni, lecz pod ciśnieniem gazów ~ 2-100 kPa; odkładanie warstw z powodu reakcji chemicznych (na powierzchni substratu) składników (zawierających atomy tworzące osadzany kryształ) – szybsze od MBE ale mniejsza dokładność nanoszenia...

kryształy mieszane, np: $Ga_{(1-x)}Al_xAs$
 x – objętościowa waga Al w stosunku do Ga

tu: dla $x < 0.4$ prosta przerwa (ważne dla zastosowań optycznych)

- Naprężenia spowodowane niezgodnością stałych sieciowych mogą być źródłem defektów ale też ciekawych efektów (formowanie wysp i struktur o różnym stopniu samoorganizacji)

np. stała sieci InAs > GaAs ... (podłoże z GaAs)



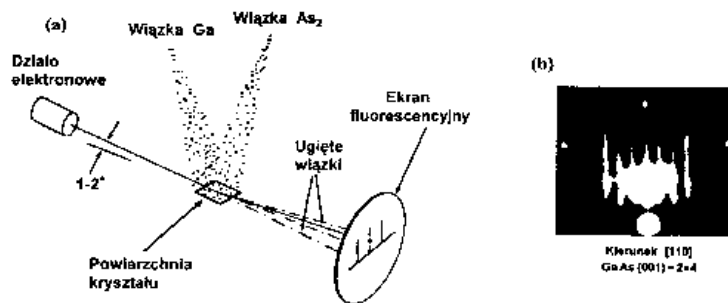
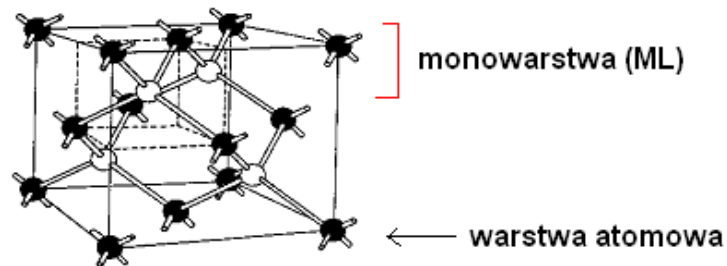
- naprężenia powstają w sieci nakładanej warstwy niedopasowanej do podłoża;
- energia naprężeń może być zmniejszona przez "dyslokacje niedopasowania";
- istnieje *krytyczna grubość*, dla której energia potrzebna do utworzenia dyslokacji jest większa od energii naprężenia w warstwie...
- rozluźnianie naprężeń w niezbyt grubych warstwach przez poprzez migrację atomów i tworzenie „wysp” – kropki kwantowe

Kontrola grubości warstw epitaksjalnych

1. Makroskopowy pomiar grubości d warstw otrzymanych w skończonych czasach t epitaksji
 - założenie liniowego (w czasie) wzrostu

2. RHEED (reflection high energy electron diffraction) (~20 KeV)

kontrola z dokładnością do pojedynczej monowarstwy (ML)



Rysunek 11. Układ eksperymentalny wykorzystywany do badania procesu RHEED podczas epitaksji warstw GaAs z wiązek molekularnych (a) oraz przykładowy obraz dyfrakcyjny elektronów odbitych od powierzchni GaAs (b) [12].

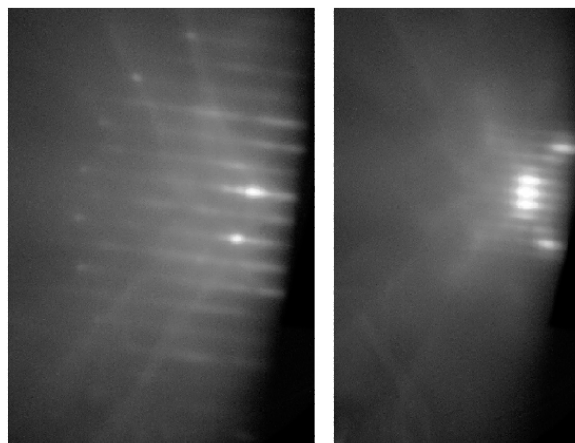
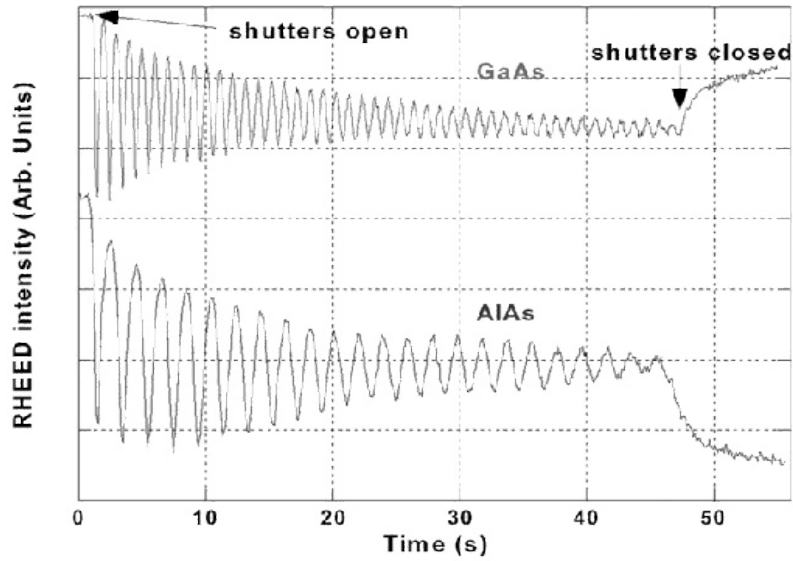
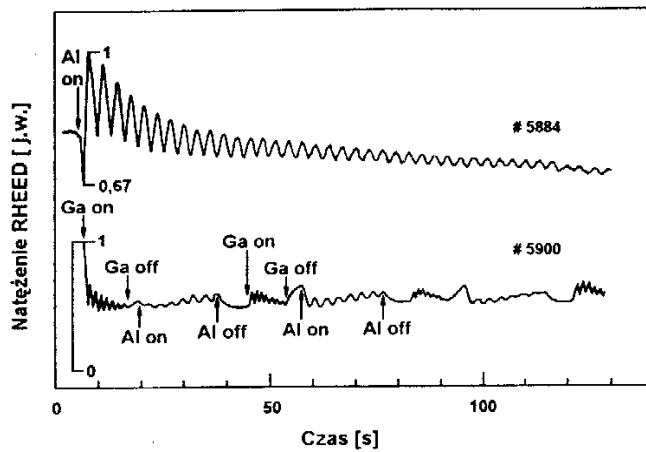


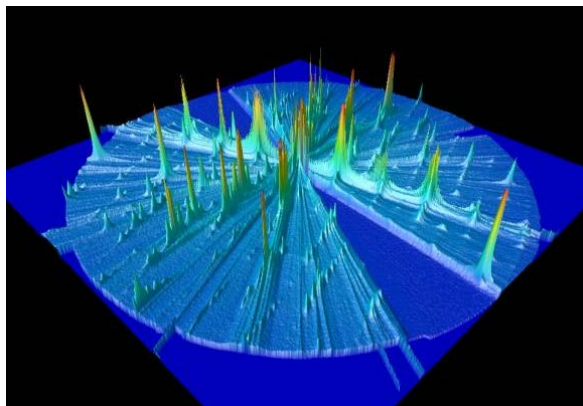
Figure 6.3: 2x (left [110] direction and 4x (right, [010] direction) diffraction patterns from a 2x4 reconstructed (001) GaAs surface



Słabnięcie intensywności spowodowane stopniową utratą ogniskowania dla danego kąta dyfrakcji, spowodowaną wzrostem kolejnych warstw



Rysunek 12. Oscylacje natężenia elektronów w wiązce odbitej uzyskane dla kierunku [100] na powierzchni krystalograficznej (001) arsenku galu podczas wzrostu heterostruktury *AlAs*—*GaAs* [13].



1993 (Neave, Joyce, Dobson, Norton)
 zaobserwowane oscylacje intensywności RHEED
 odpowiadające pojedynczym warstwom

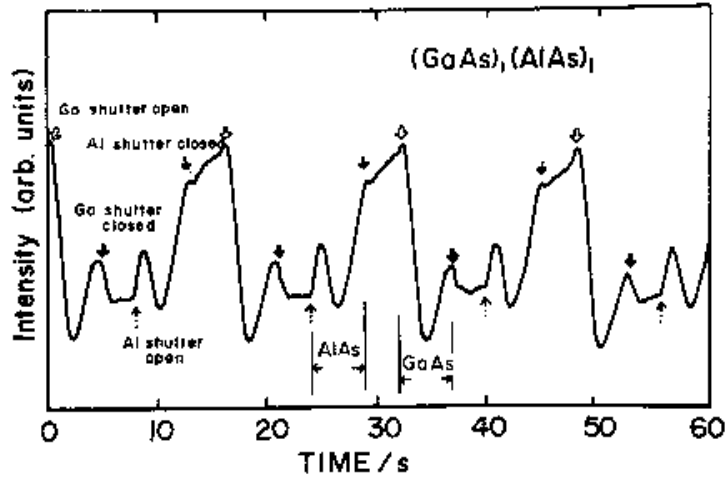


Fig. 1.10: RHEED intensity oscillations of the specular beam during monolayer superlattice growth (from Ref. 28).

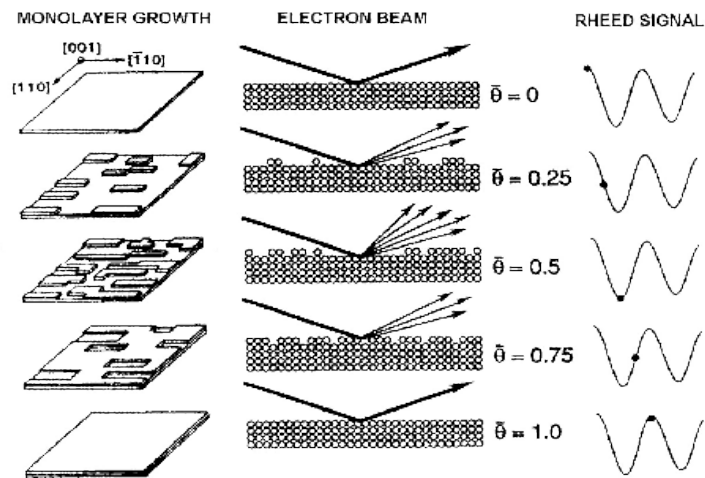
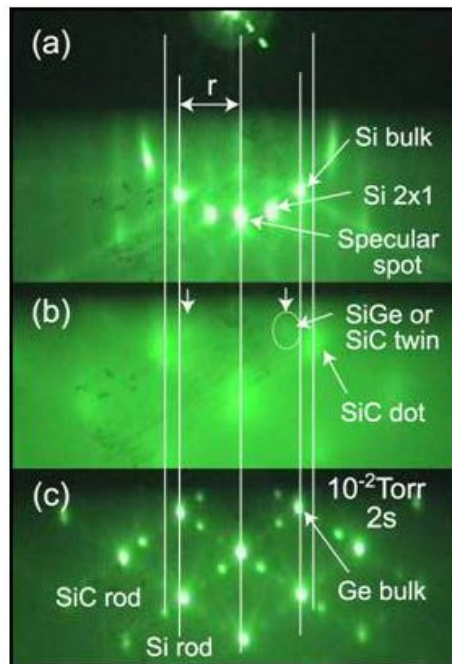


Figure 6.5: Mechanisms of RHEED intensity oscillations during growth of a monolayer.

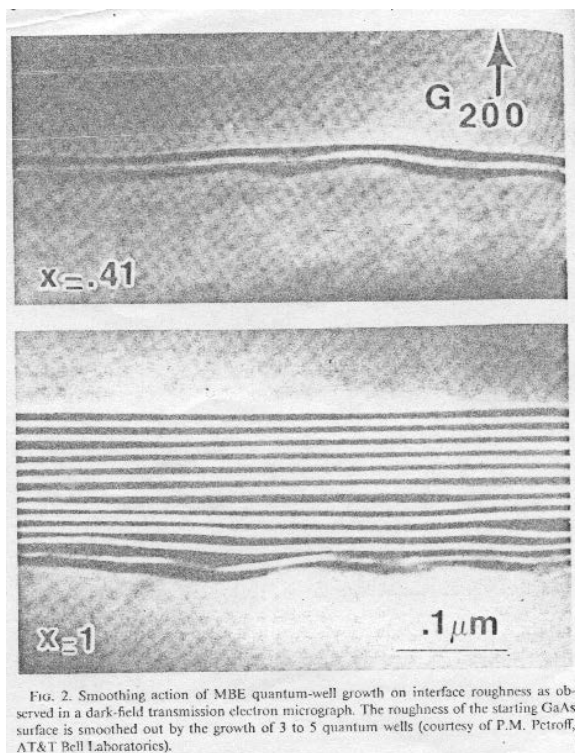
wyjaśnienie oscylacji natężenia wybranego prążka (plamki) (pod wybranym kątem) w czasie wzrostu warstw

Inne przykłady



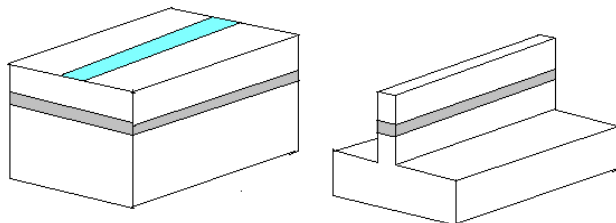
inna metoda:
analiza maksimów dyfrakcyjnych przy nisko-kątowym odbiciu promieni rentgenowskich

obraz mikroskopowy cienkich warstw epitaksjalnych (QW)

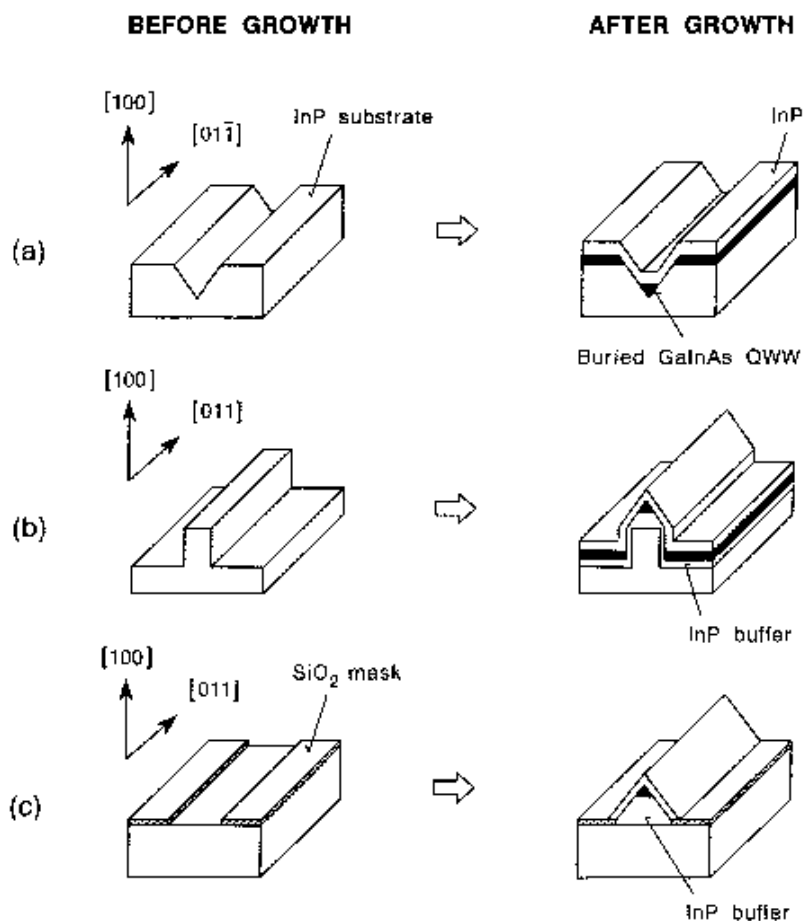


Techniki wytwarzania struktur 1D

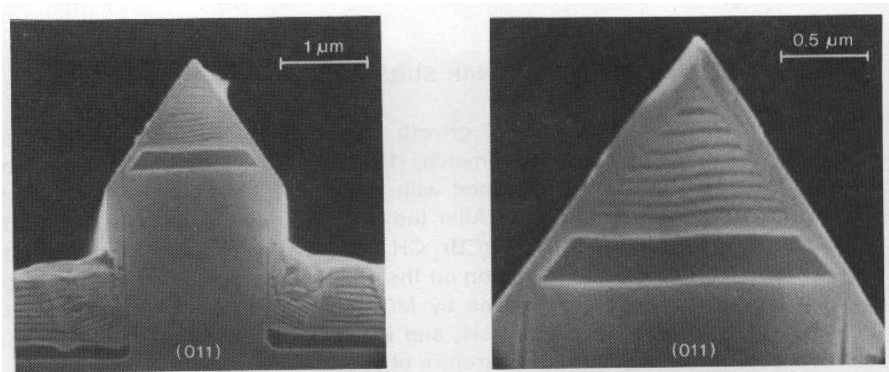
- litografia + wytrawianie ze struktury studni kwantowej



Inne sposoby wytwarzania:

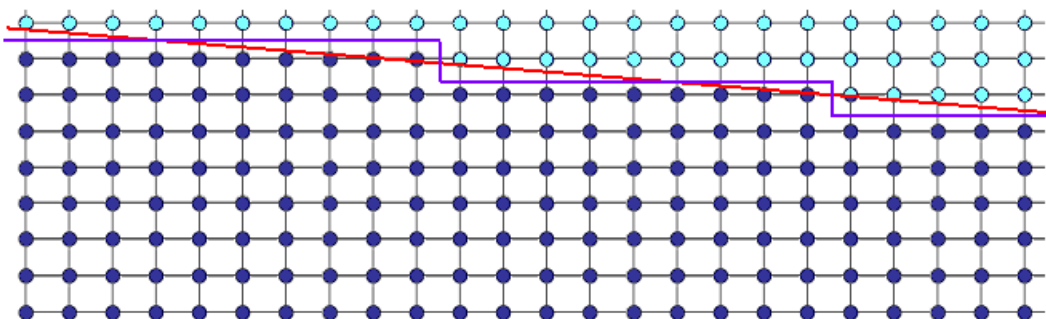
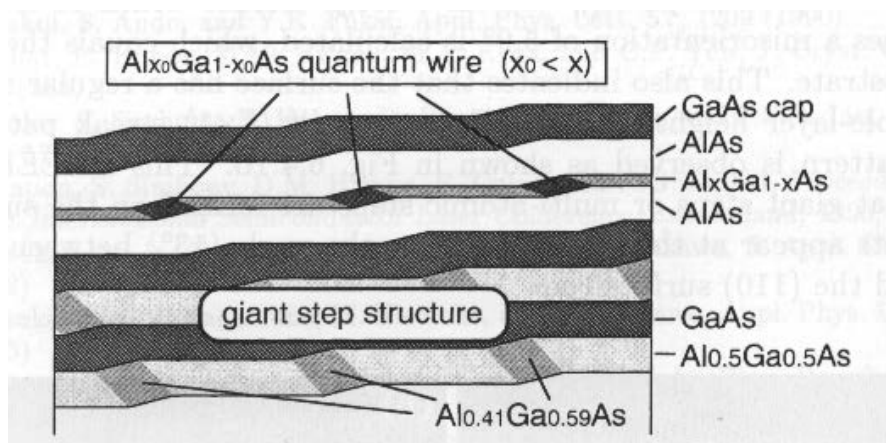


1. Examples for the fabrication of buried GaInAs/InP QWWs by one-step MOVPE. Buried GaInAs QWW (black) (a) grown on $[01\bar{1}]$ oriented V-groove etched in (100) InP substrate, (b) grown on $[011]$ oriented rectangular mesa and (c) selectively grown within a stripe open in a dielectric mask deposited on the InP substrate.

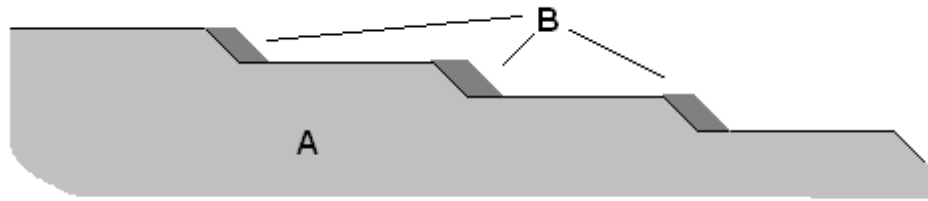


Naturalny wzrost QWW na tzw. podłożu „przeorientowanym”

np. płaszczyzna (110) „przeorientowana o kilka % w kierunku (111) daje tzw. *gigantyczne uskoki*

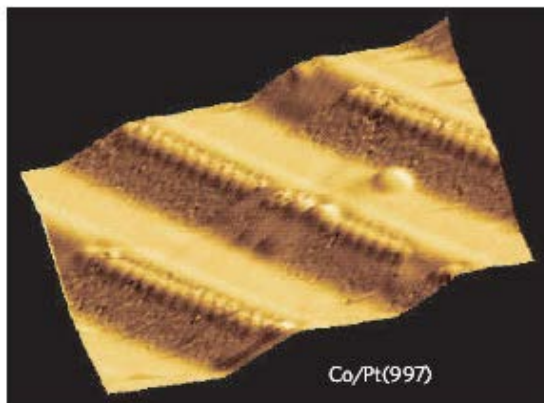


„stopnie” – wzbogacone w niewysyczone wiązania
= miejsca początkowego wiązania atomów warstwy nakładanej

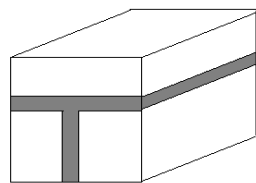


miejsca początkowego, pseudomorficznego wzrostu materiału B na podłożu A

„równoległe stopnie” i charakterystyczna struktura wolnych, niesparowanych elektronów (*dangling bonds* – *niewysyczone wiązania*) wzdłuż stopni, daje możliwość uzyskania nawet łańcuchów jednoatomowych
 np.: atomy kobaltu na powierzchni (997) platyny tworzą jednoatomowe druty(!)



Druty kwantowe typu „T” (formalnie nie-druty)



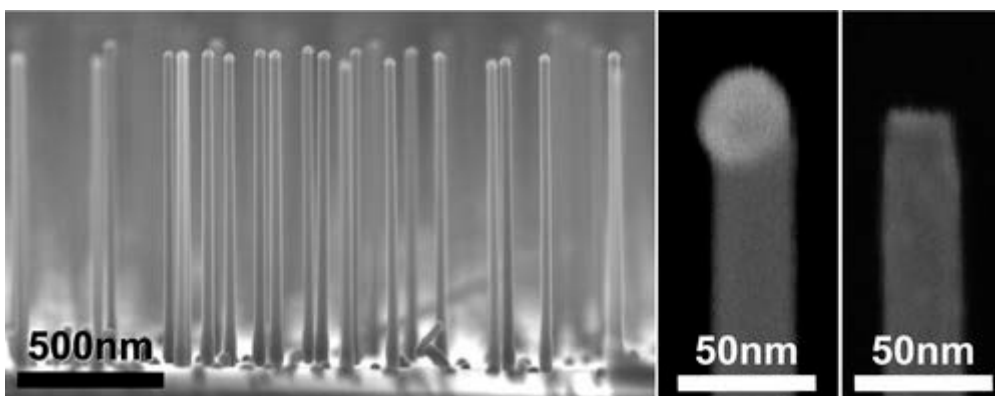
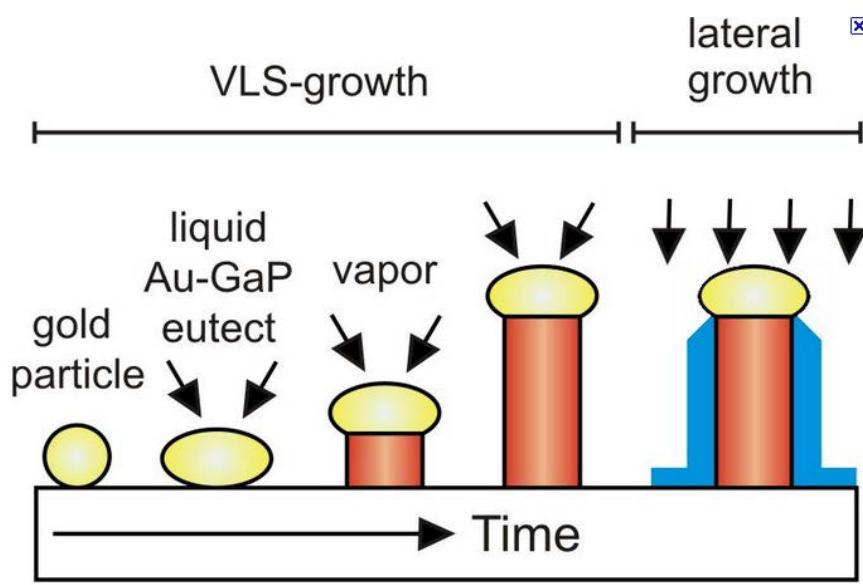
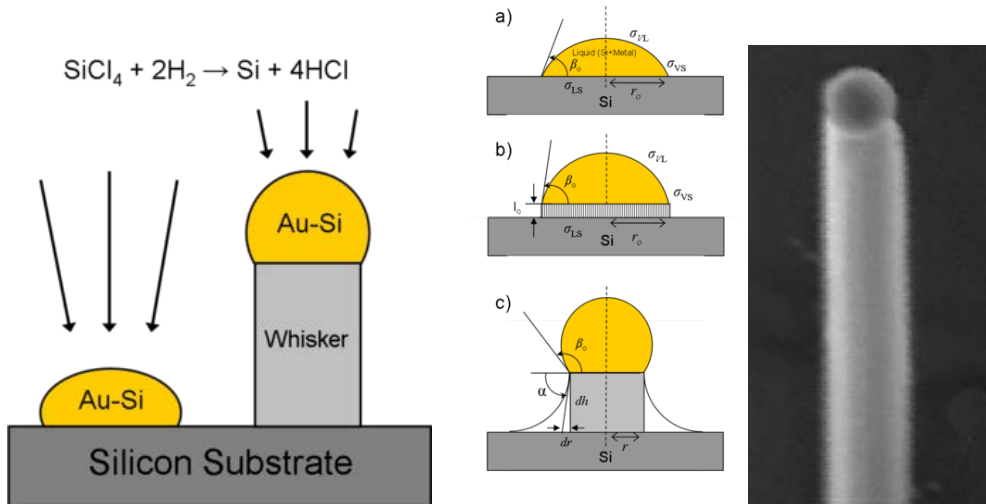
= miejsca (linie) o silniejszej „lokalizacji” w warstwie

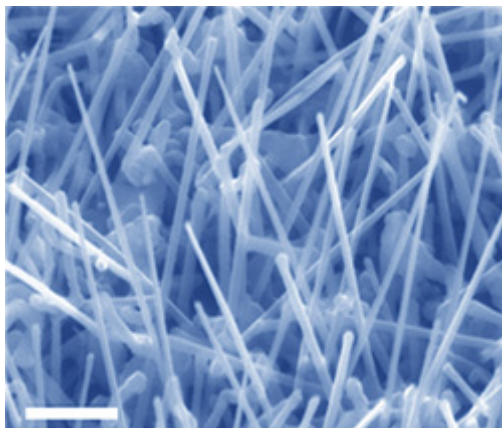
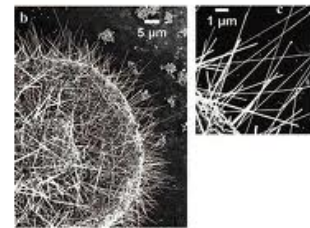
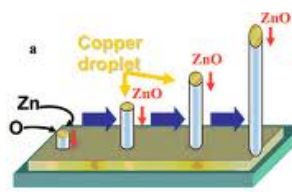
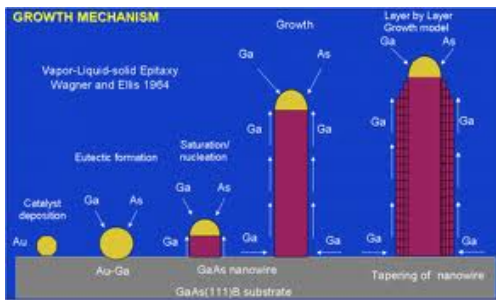
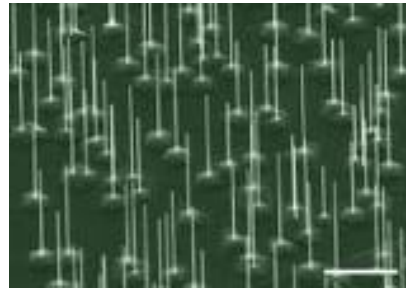
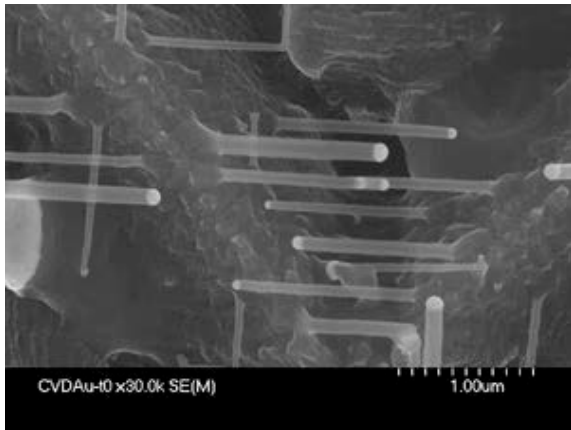
Technologia VLS (vapor, liquid, solid)

depozycja z fazy gazowej (CVD) jest na ogół bardzo wolna,

w metodzie VLS kropla ciekłego metalu (metal zdeponowany wpierw z fazy gazowej w wysokiej temperaturze) działa jak katalizator krystalizacji – na podłożu – pod kroplą;

możliwy wzrost wielu warstw





nanodrutki InP

Wytwarzanie układów 0D

- litografia + wytrawianie z układu 2D lub 1D

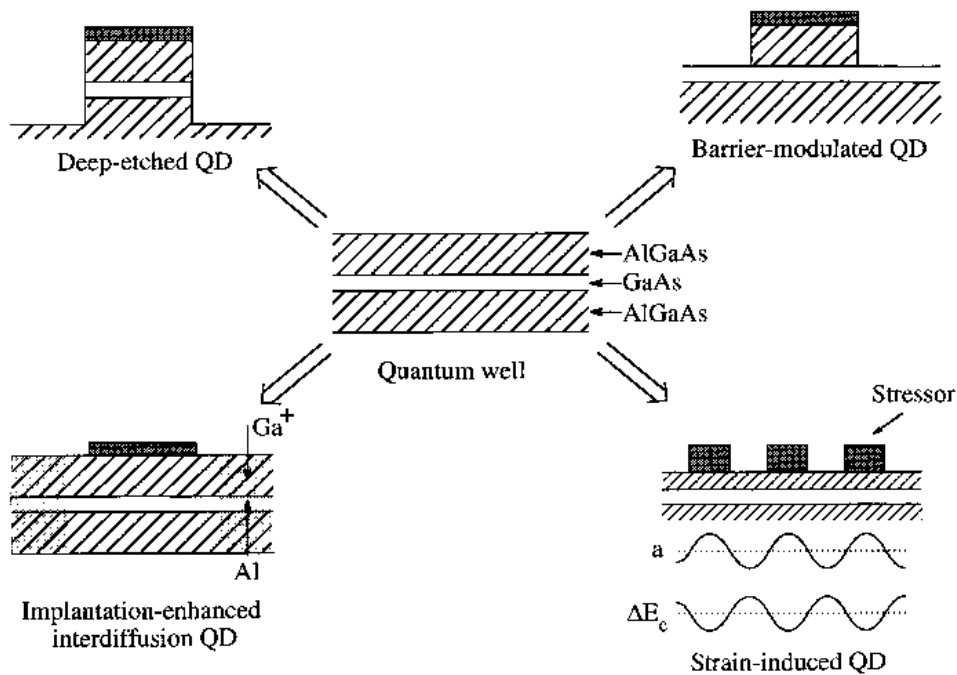


Fig. 1. Etch/lithography techniques for fabricating quantum dots in quantum well structures.

techniki „naturalne”

- wywołane naprężeniami:
lokalna zmiana stałej sieciowej prowadzi do lokalnej deformacji „szerokości” przerwy, tzn. do fluktuacji potencjału ograniczającego kwaziswobodny ruch elektronów
- naturalne fluktuacje grubości warstwy QW

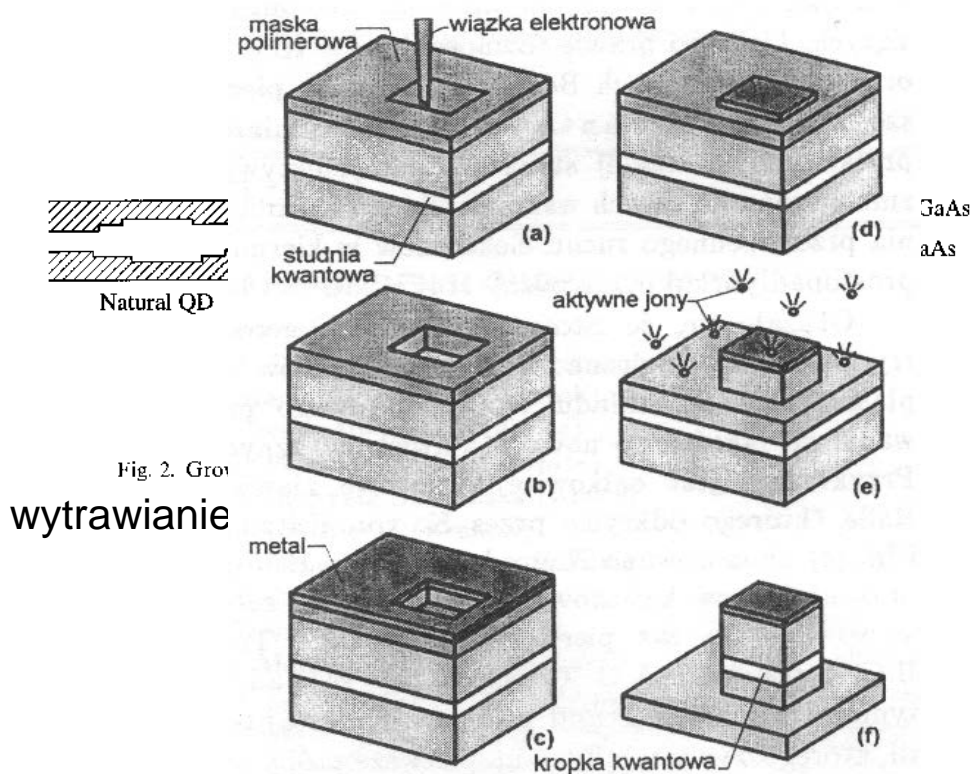
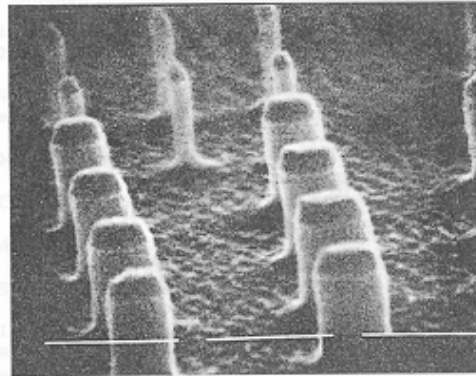
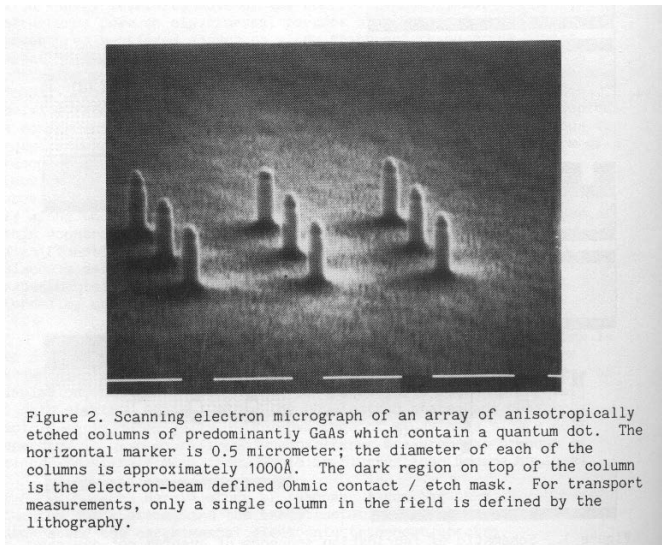


Fig. 2. Growth of a quantum dot

typowe rozmiary ~ 1000 Å



znaczne nieregularności „brzegu” ~ nawet 100Å

możliwość tworzenia sieci 2D