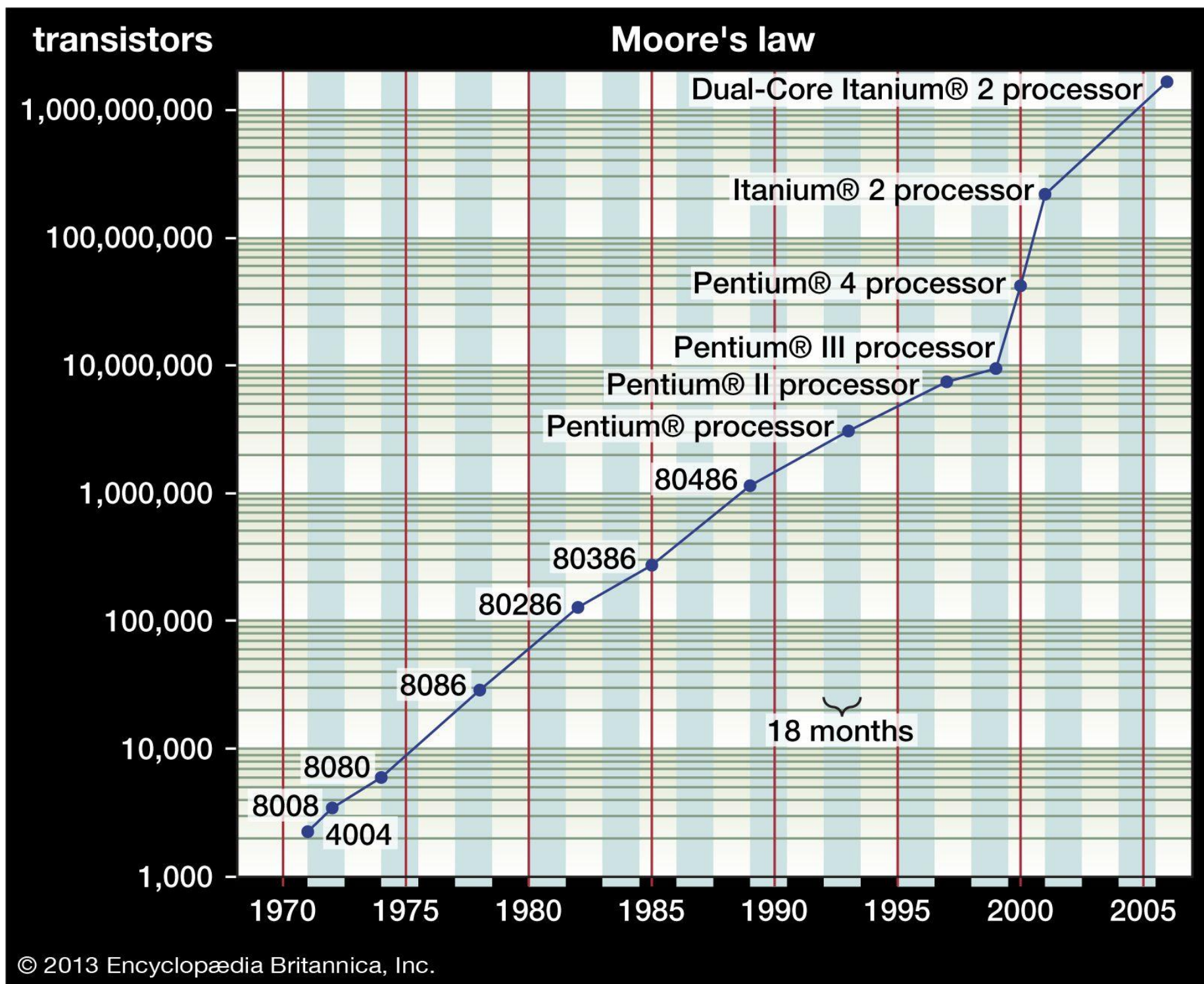
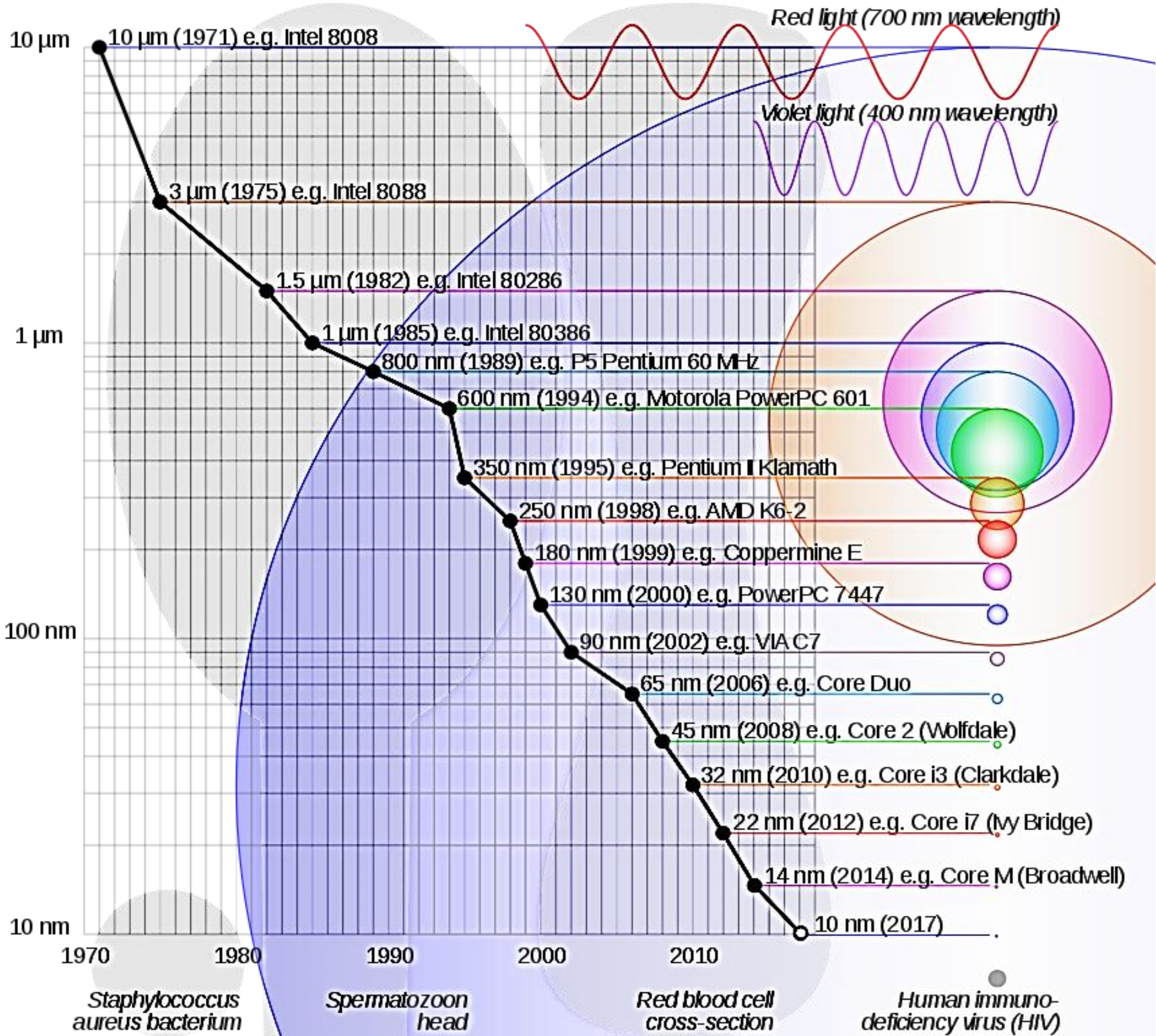


## NANOTECHNOLOGIA W ELEKTRONICE

Gordon E. Moore zauważył, że liczba tranzystorów w komputerowym chipie podwajała się około co 18...20 miesięcy



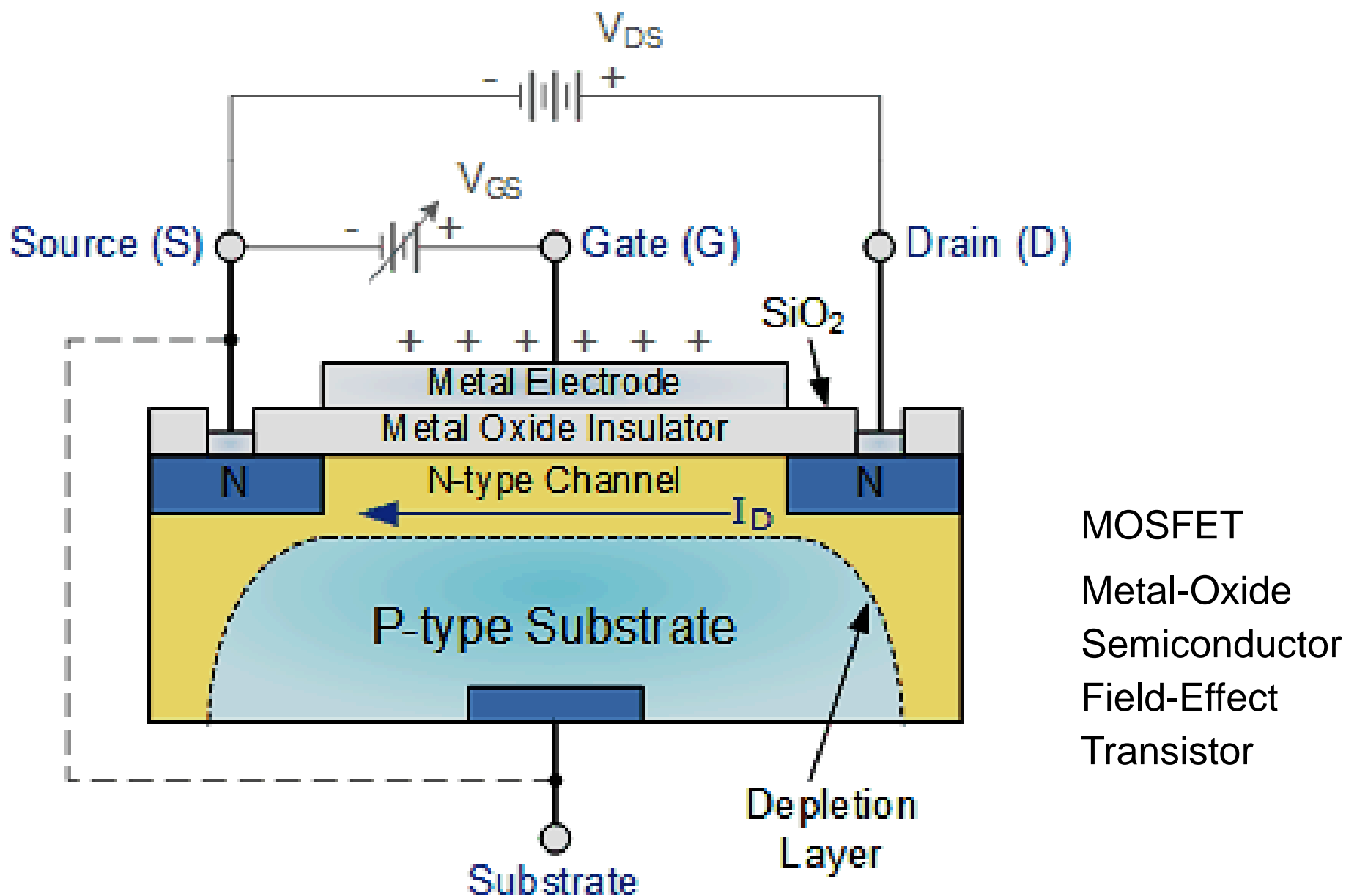


Przykładowe prawo Moore'a dla okresu 1970 - 2017

## Fizyczne ograniczenia tradycyjnej elektroniki półprzewodnikowej

Konsekwencje zmniejszania wymiarów półprzewodników:

- zwiększenie natężenia pola na izolacji elementów, np. grubość izolacji bramki tranzystora polowego 100 nm, przy 5 V →  $E = 5 \cdot 10^5$  V/mm (granica wytrzymałości), zmniejszenie grubości izolacji do 20 nm →  $E = 2,5 \cdot 10^6$  V/mm,
- wpływ nierównomierności rozkładu domieszek na powtarzalność własności półprzewodników, np. przekrój poprzeczny kanału tranzystora  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ , liczba atomów domieszki  $\approx 500 \pm 50$  → rozrzut własności  $\pm 10\%$ , w 0,01 tego przekroju ( $0,1 \mu\text{m} \times 0,1 \mu\text{m}$ ), liczba atomów domieszki  $\approx 5 \pm 3$  → rozrzut własności  $\pm 60\%$ ,
- problem odprowadzania ciepła, np. bramka tranzystora w procesorze, wydzielane ciepło minimum  $10^{-5}$  W, przy  $10^6 \dots 10^7$  tranzystorów → 10...100 W (Pentium IV wytwarza 80 W), przy mniejszej masie procesora lub większej liczbie tranzystorów, obecne systemy chłodzenia są nieskuteczne,
- zjawiska kwantowe w elementach o małych wymiarach, zmniejszenie wymiarów poniżej 50...10 nm, połączone zwykle z tworzeniem się innych struktur powoduje istotne zmiany własności (np. obniżenie temperatury topnienia, niezależność przewodności od długości i średnicy nanoprzewodu).



### Przykładowe elektroniczne nanoelementy kwantowe

- rezonansowa dioda tunelowa,
- tranzystory jednoelektronowe.

Zastosowanie kropki kwantowej do budowy nanoelementów elektronicznych.

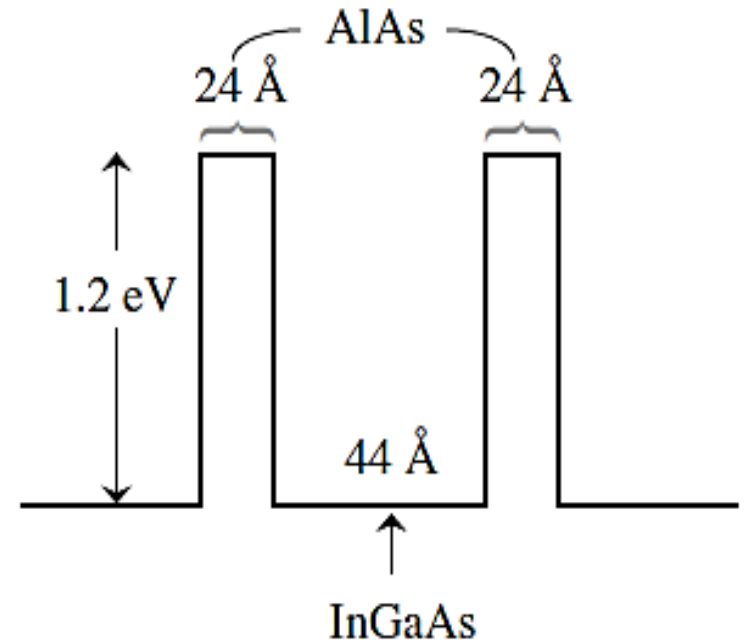
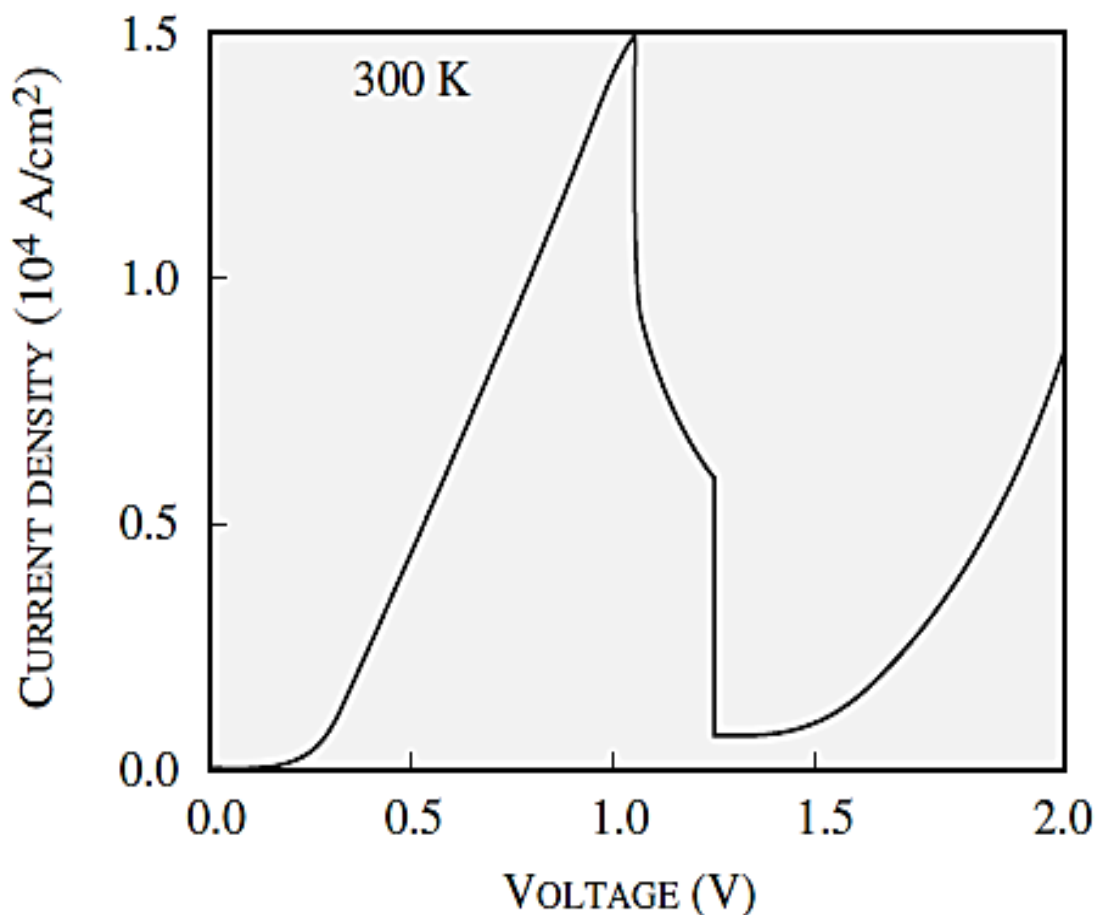
## Rezonansowa dioda tunelowa

Pole elektryczne prostopadłe do warstw złącz półprzewodników może wywołać prąd płynący przez kolejne warstwy.

Zjawisko to nosi nazwę **transportu wertykalnego** i bazuje na tunelowaniu rezonansowym.

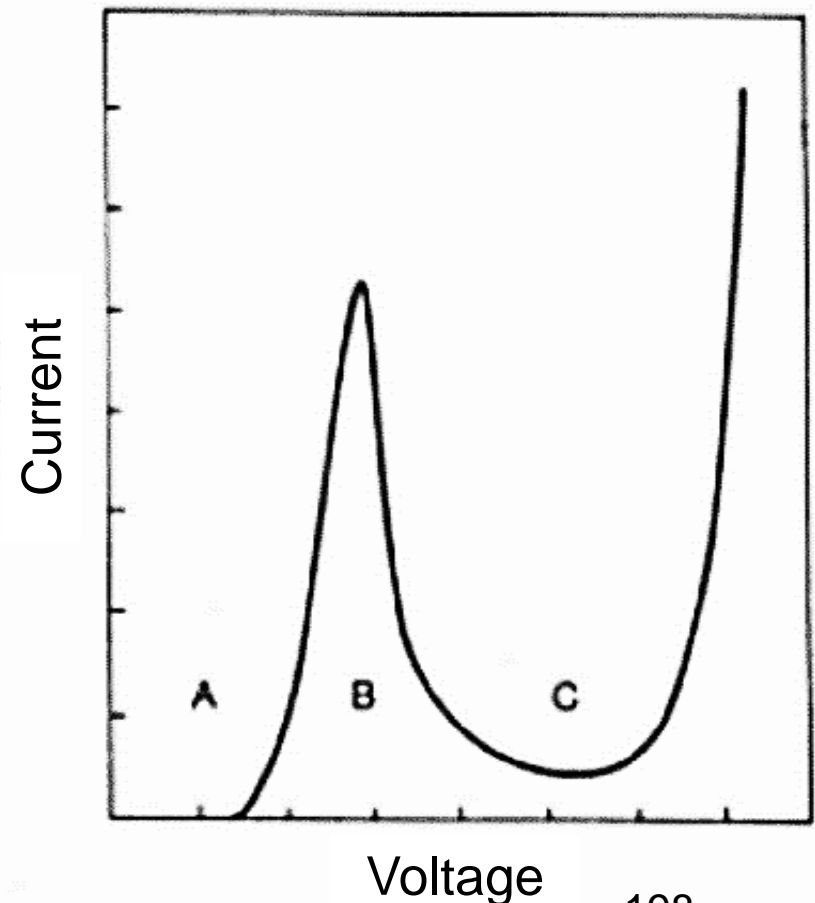
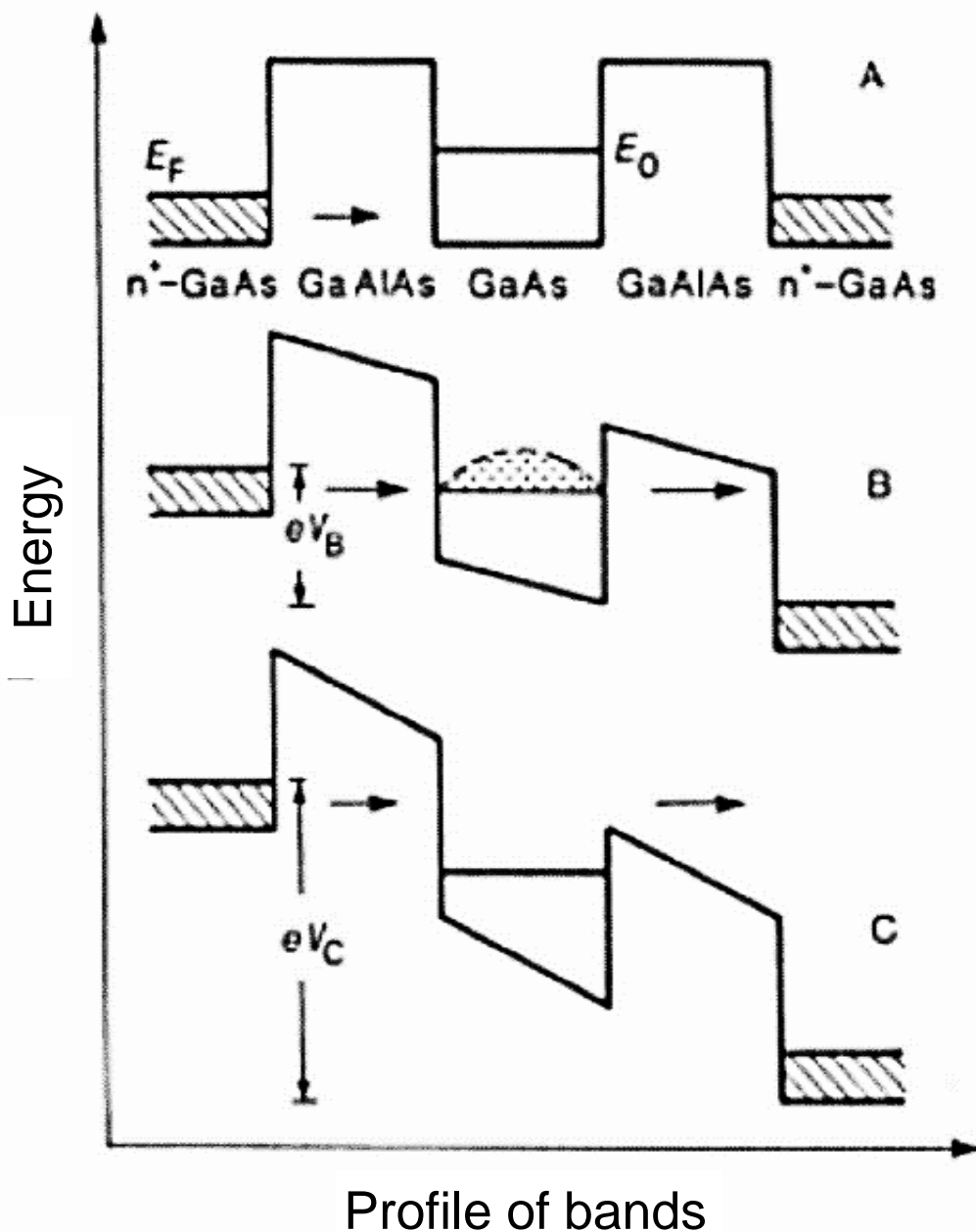
Na rysunku przedstawiono typową charakterystykę prądowo-napięciową dla rezonansowej struktury z podwójną barierą.

W temperaturze pokojowej występuje pik przy napięciu  $\cong 1$  V), związany z rezonansowym tunelowaniem elektronów.



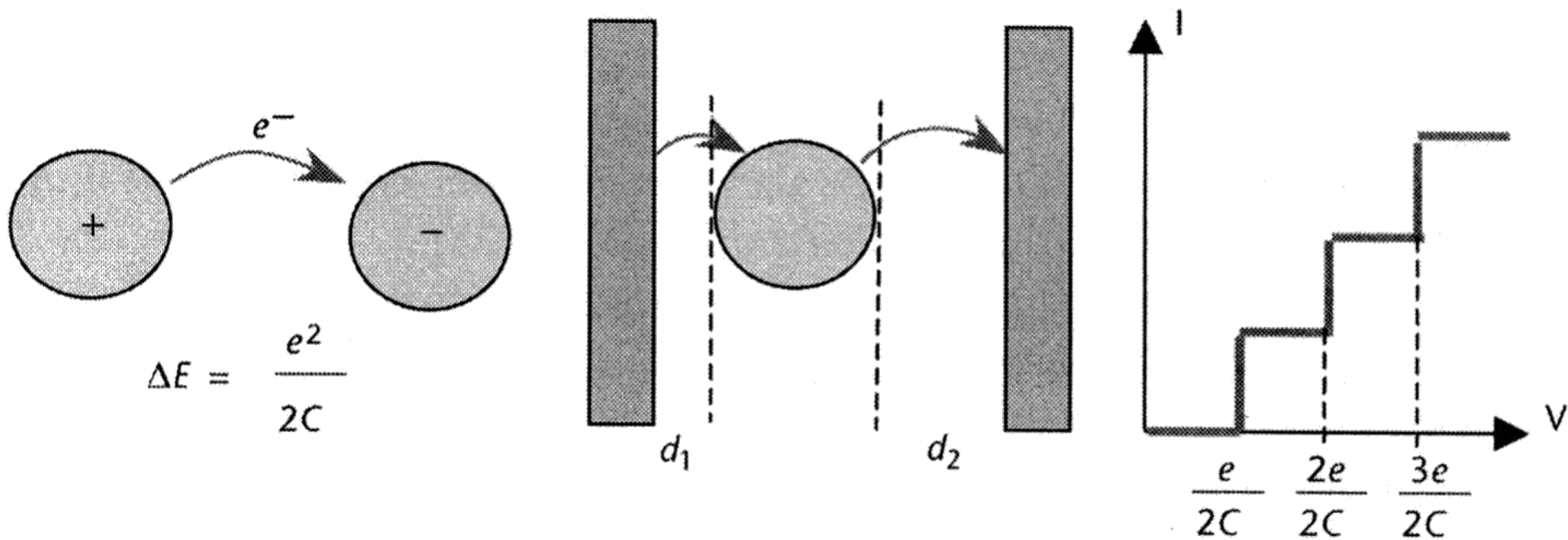
Zwiększenie napięcia (punkt C), powoduje, że wszystkie elektrony wychodzą z obszaru rezonansowego. Natężenie prądu zmniejsza się przy rosnącym napięciu (ujemna rezystancja różniczkowa).

Dalsze zwiększanie napięcia powoduje obniżenie drugiej bariery potencjalnej poniżej  $E_0$  i wzrost prądu emisji termoelektronowej.



## ***Tranzystor jednoelektronowy***

- miniaturyzacja tranzystora polowego (FET),
- poniżej pewnych wymiarów przejście w tranzystor jednoelektronowy (SET),
- ujawniają się efekty związane z energią ładowania elektrostatycznego,
- SET jest podwójnym złączem tunelowym z bardzo małą elektrodą centralną (wyspą),
- energia elektrostatyczna związana ze znajdującym się na niej elektronem nadmiarowym jest większa od energii termicznej, co powoduje zablokowanie przepływu prądu,
- przyłożenie pewnego napięcia (bramkującego) do wyspy powoduje odblokowanie układu,
- prąd płynie na zasadzie sekwencyjnego przepuszczania pojedynczych elektronów,
- na wyspie może przebywać więcej elektronów, tzn. pojawiają się nowe kanały tunelowe,
- charakterystyki  $i = f(u)$  układu mają wtedy postać schodów.



## Charakterystyka tranzystora jednoelektronowego

### Zjawisko blokady kulombowskiej:

- rozmiar wyspy, a tym samym jej pojemność  $C$ , muszą być wystarczająco małe,
- przejście elektronu z kontaktu metalowego na wyspę wymaga dostarczania mu dość dużej energii  $\Delta E$ , większej od jego energii termicznej:

$$\Delta E \simeq \frac{e^2}{2C} \quad \Delta U \simeq \frac{\Delta E}{e} = \frac{e}{2C}$$

- jeżeli napięcie będzie mniejsze od  $\Delta U$ , to elektron nie przejdzie na wyspę, wskutek sił odpychających działających z jej strony.



Energia termiczna elektronów w temperaturze 300 K:

$$E_T = \frac{3}{2}kT = 1,5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \simeq 0,6 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

gdzie:  $k$  - stała Boltzmannna [J/K].

Warunek przekroczenia blokady Coulomba:

$$\Delta E \geq E_T \quad \Delta E \geq 0,6 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

$$\frac{e^2}{2C} \geq 0,6 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

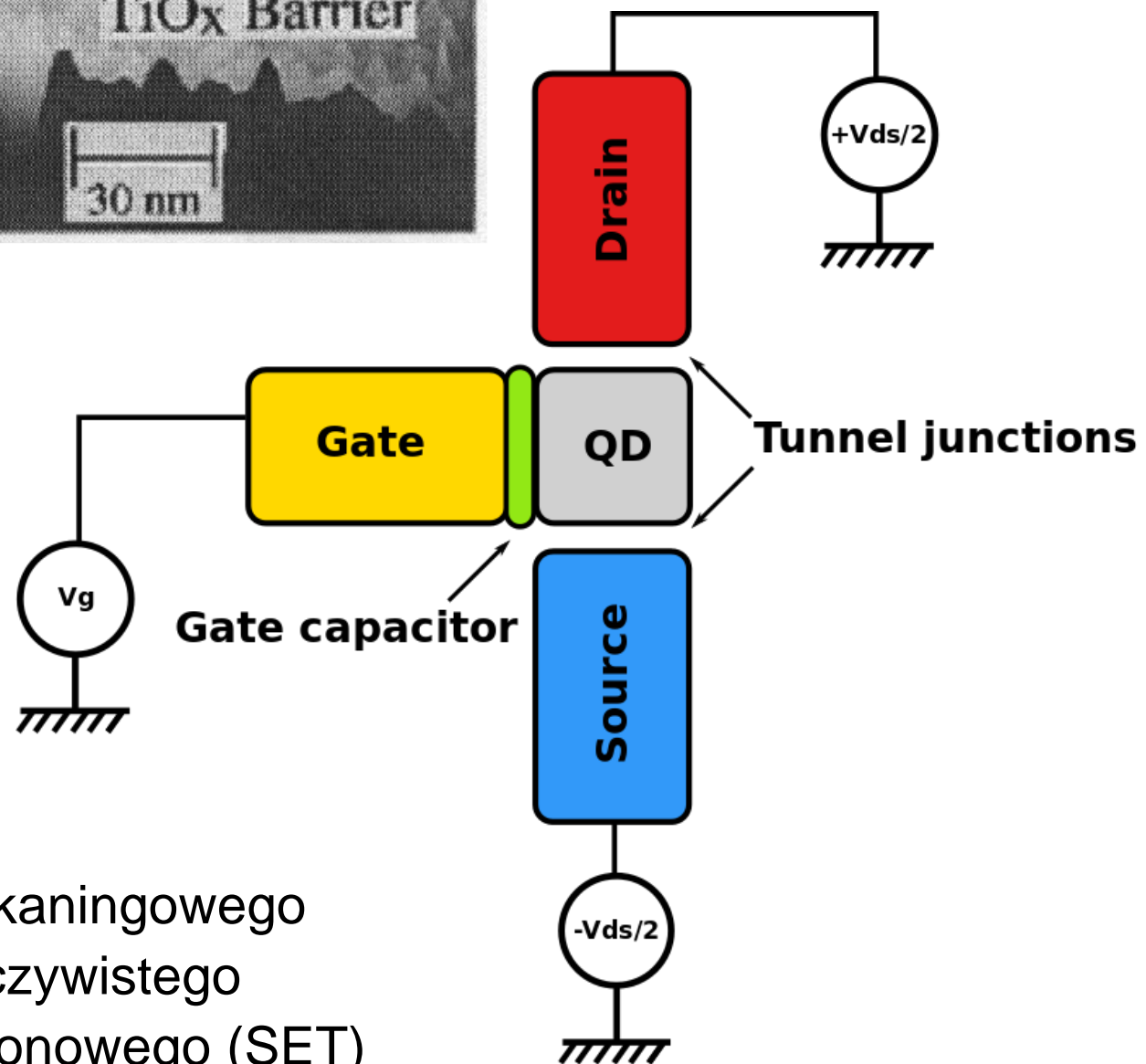
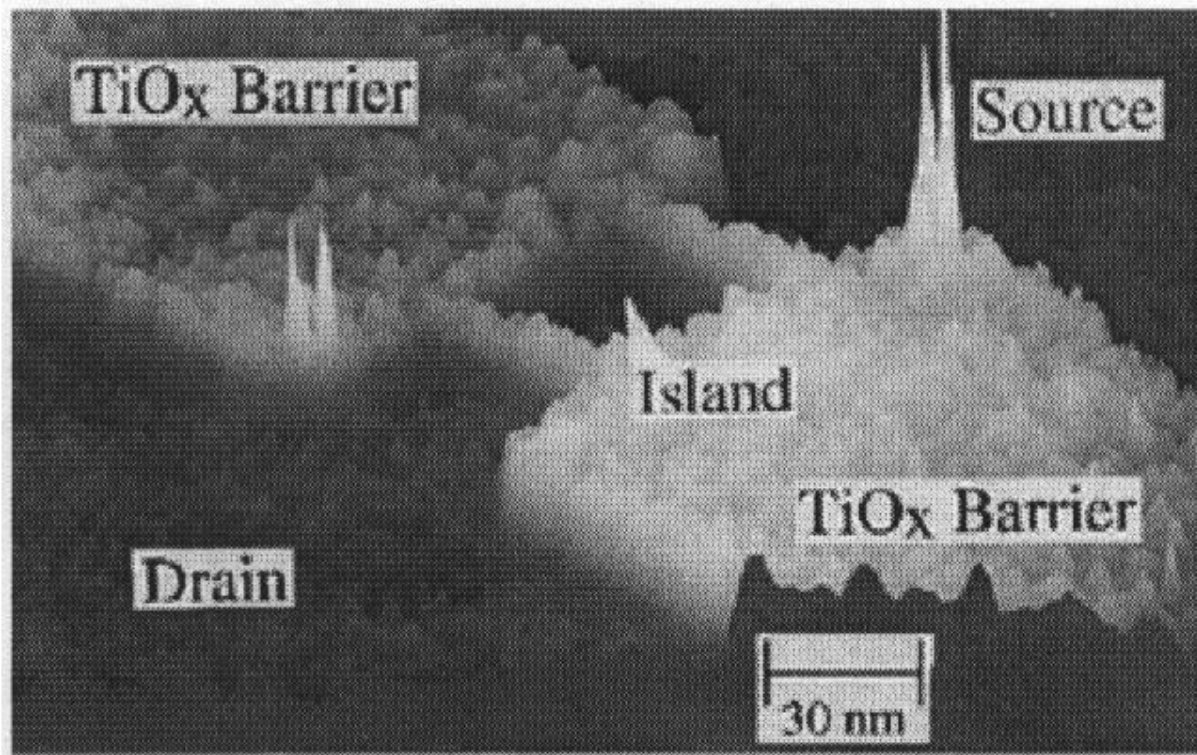
Stąd:

$$C \leq \frac{e^2}{2 \cdot \Delta E} \simeq \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-20}} \quad \frac{\text{A}^2\text{s}^2}{\text{VAs}} = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F}$$

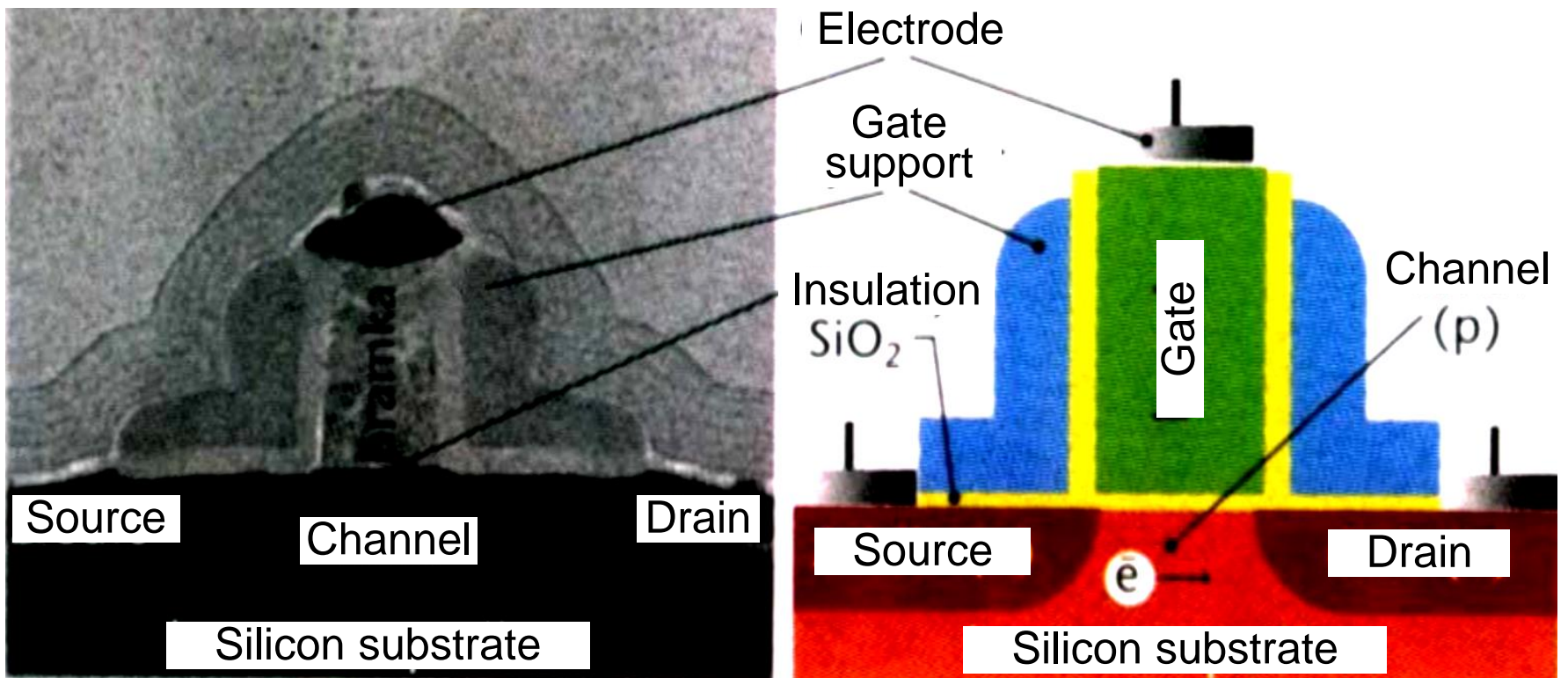
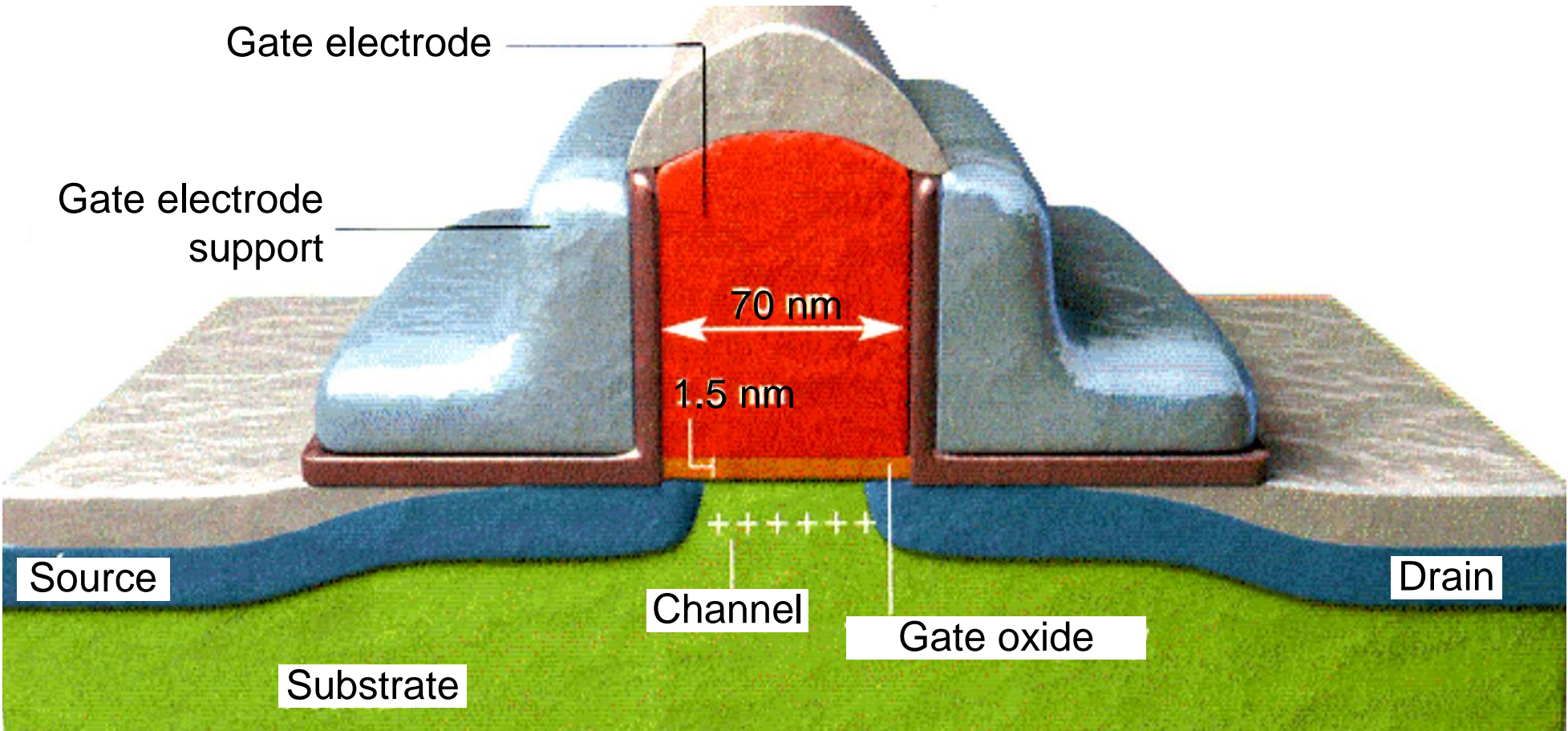
$$C \leq \simeq 2 \cdot 10^{-18} \text{ F} \quad \simeq 2 \text{ aF}$$

Napięcie spełniające warunek Coulomba:

$$\Delta U \geq \frac{\Delta E}{e} = \frac{e}{2C} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-18}} = 0,04 \text{ V} = 40 \text{ mV}$$



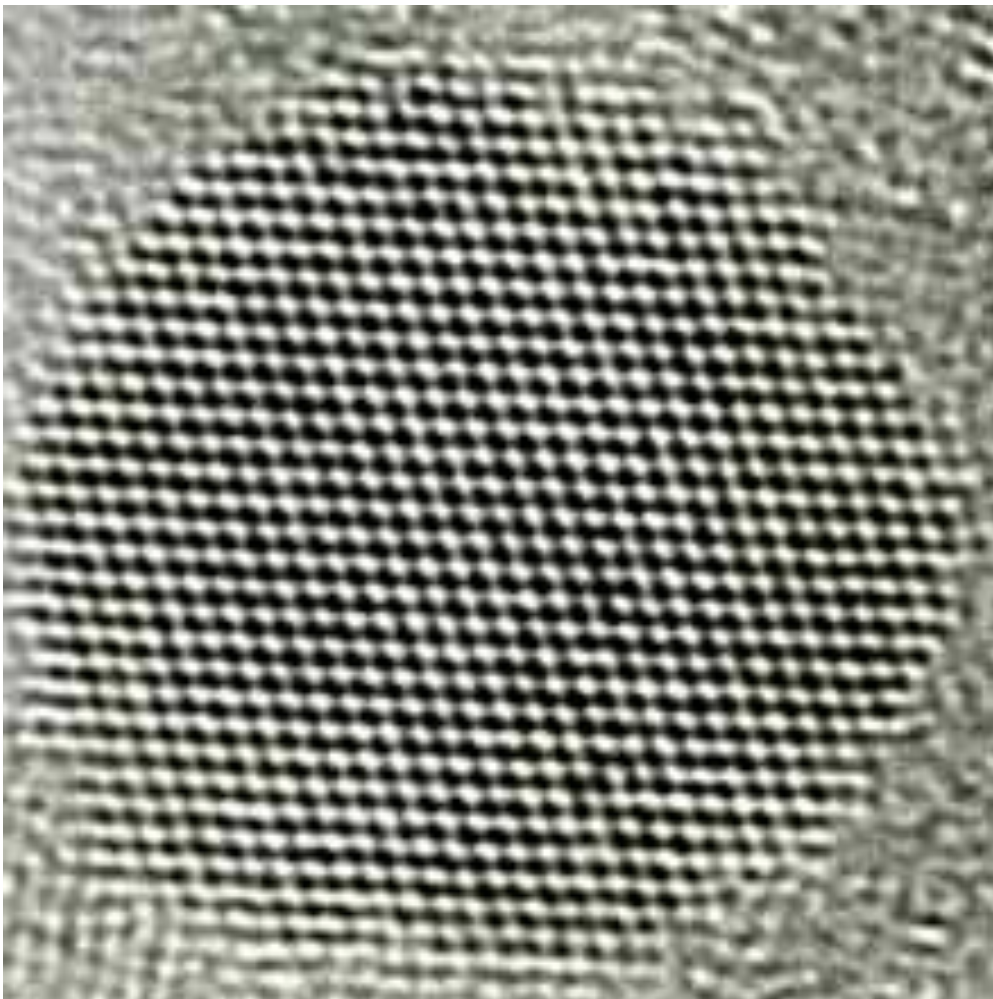
Obraz z oscyloskopu skaningowego tunelowego (STM) rzeczywistego tranzystora jednoelektronowego (SET) i jego schemat



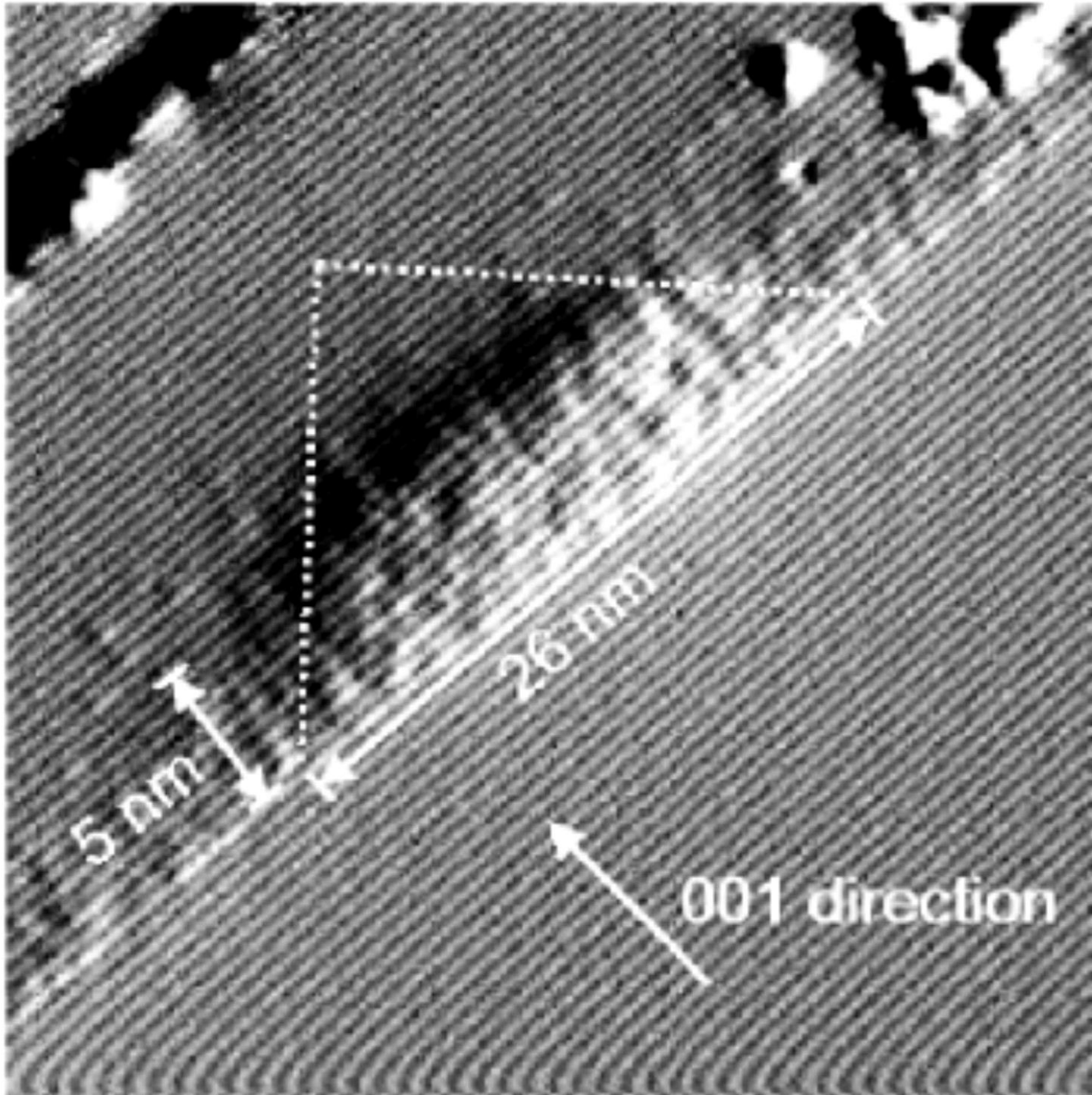
Technologie MOSFET 70 nm i 32 nm

## Kropka kwantowa

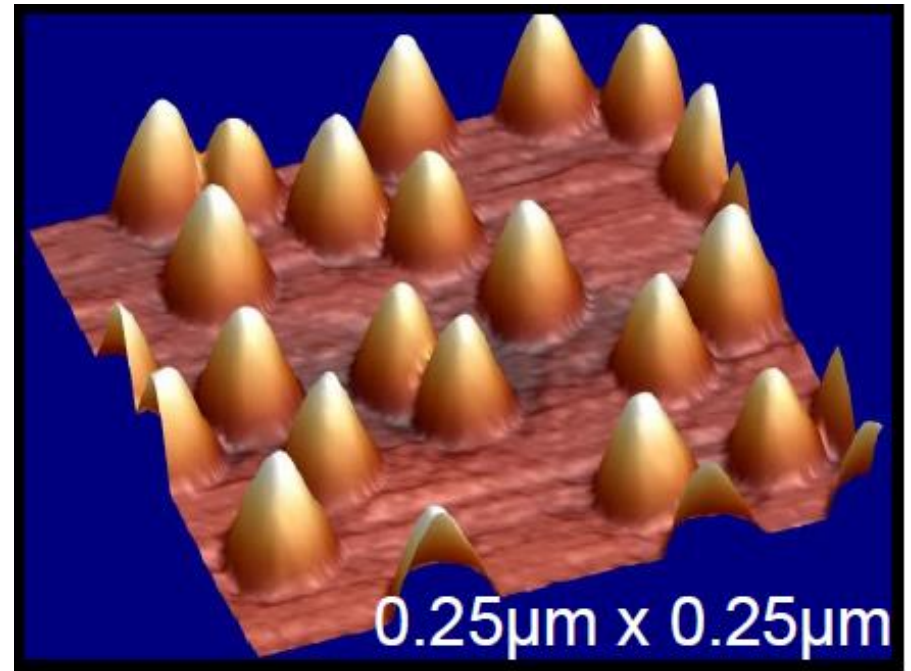
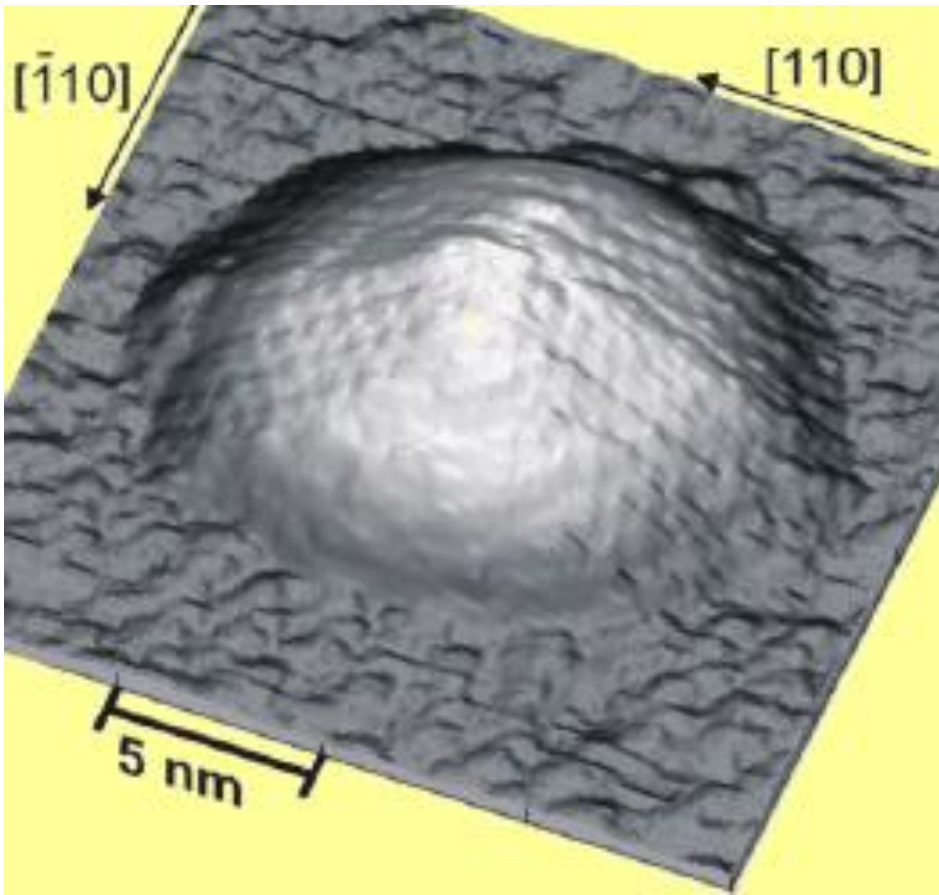
- niewielki rejon przestrzeni ograniczony w 3 wymiarach barierami potencjału, wewnątrz spułapkowana cząstka (elektron) o długości fali porównywalnej z rozmiarami kropki,
- nanocząstka odseparowana od otoczenia, uwięzione w niej elektrony mają określone poziomy energetyczne,
- system obliczeń kwantowych (komputer kwantowy) wymaga regularnie rozmieszczonych nanoobjektów separowanych nanoodstępami.



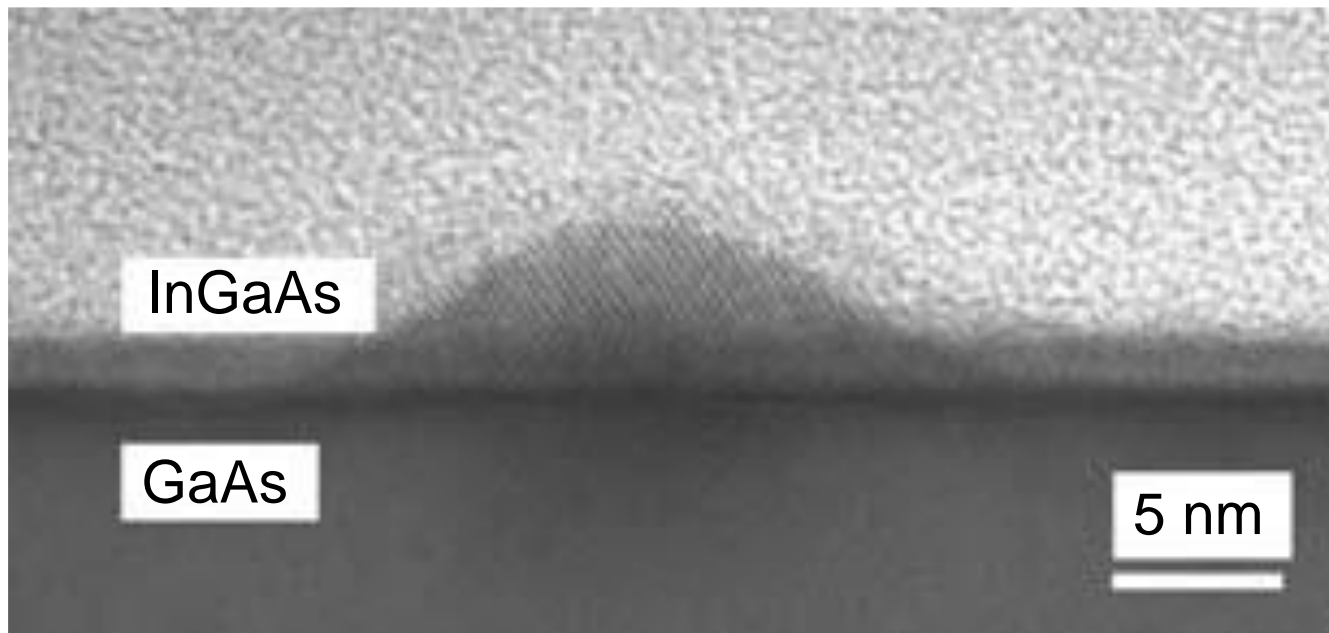
Obraz kropki kwantowej uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego

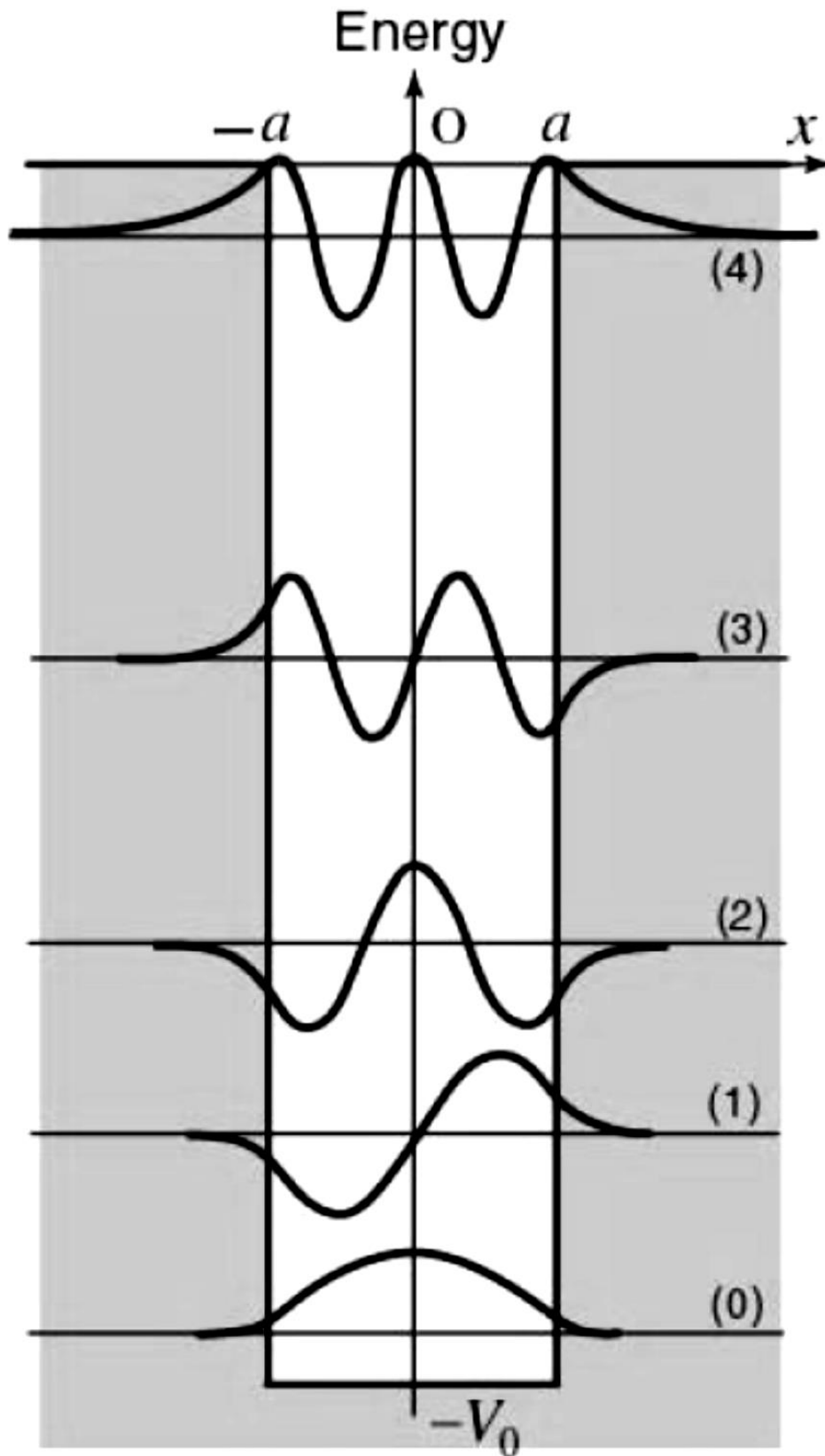


Obraz kropki kwantowej z InAs uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego



Przykładowe obrazy kropek kwantowych





Dyskretne poziomy  
energii elektronów  
w kropce kwantowej

## Technologie, które umożliwiły rozwój nanoelektroniki

### ***Epitaksja ze strumienia cząstek (MBE) i pokrewne (CVD)***

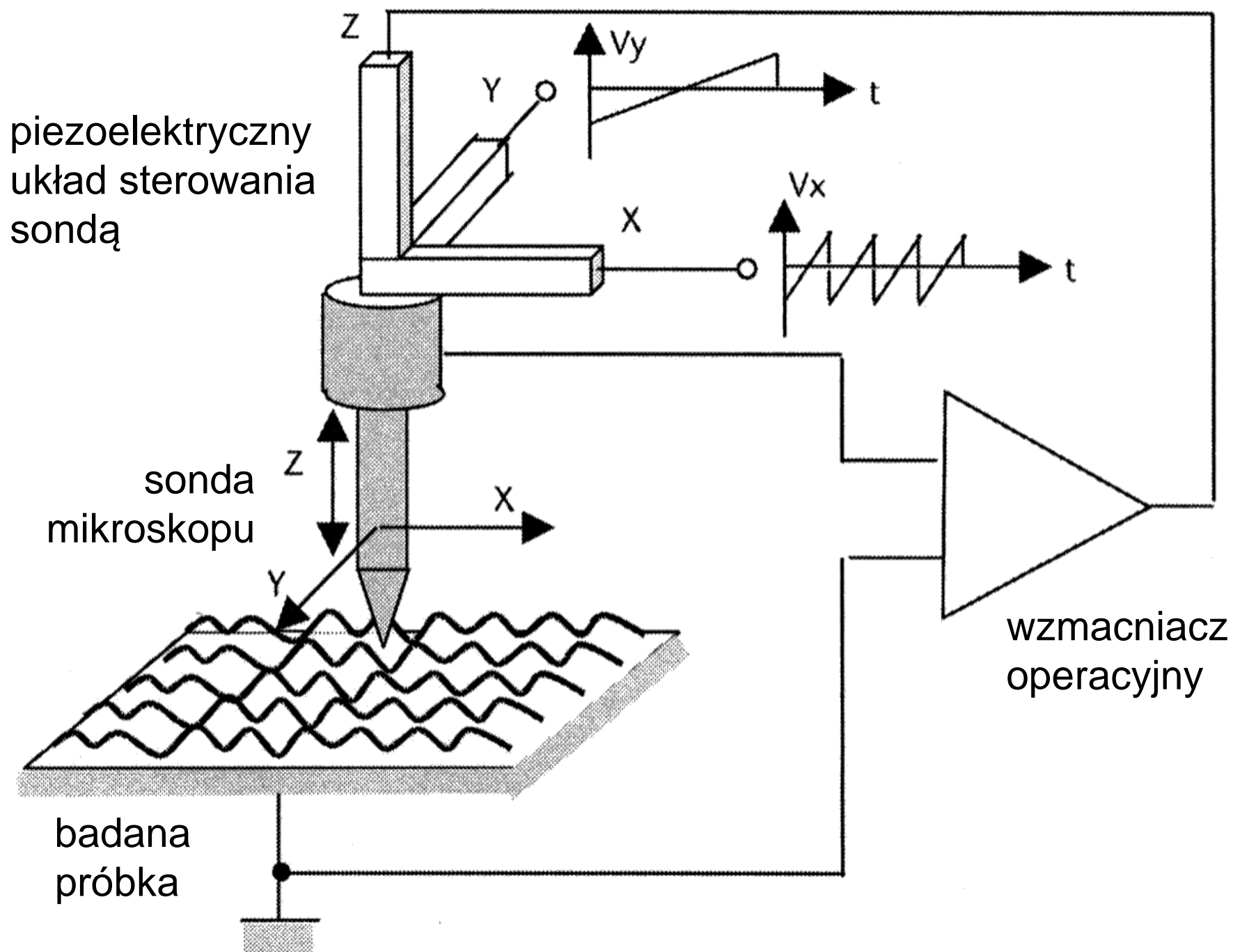
- proces zautomatyzowany,
- umożliwia tworzenie warstw z metali, półprzewodników i dielektryków,
- dokładność grubości do pojedynczych atomów (dziesiąte części nanometra),
- umożliwia tworzenie wymienionych wyżej nanoelementów kwantowych,
- matrycę (sieć) kropek kwantowych wykonuje się technologią MBE, proces polega np. na samoagregacji InAs w postaci nanowysp na powierzchni warstwy GaAs.

### ***Mikroskopy***

#### Mikroskop skaningowy tunelowy STM (1981)

- fizyczna podstawa STM - wykorzystanie zjawiska tunelowania elektronów z powierzchni próbki do przewodzącego ostrza mikroskopu,





Uproszczony schemat mikroskopu skaningowego tunelowego

- ostrze mikroskopu (sonda) ma na końcu jeden atom,
- odległość między sondą i badaną powierzchnią jest taka, jak odległości międzyatomowe, tj.  $0,1 \div 0,3$  nm,
- funkcje falowe elektronów atomu sondy i najbliższego atomu badanej powierzchni, będą nakrywać się na siebie,
- elektrony mogą przechodzić z ostrza sondy do atomu powierzchniowego i odwrotnie, zależnie od znaku napięcia,
- prawdopodobieństwo tunelowania  $P$  określa wzór:

$$P \sim \exp\left(-\frac{2}{h} z \sqrt{2meU}\right)$$

gdzie:

$h$  - stała Plancka,

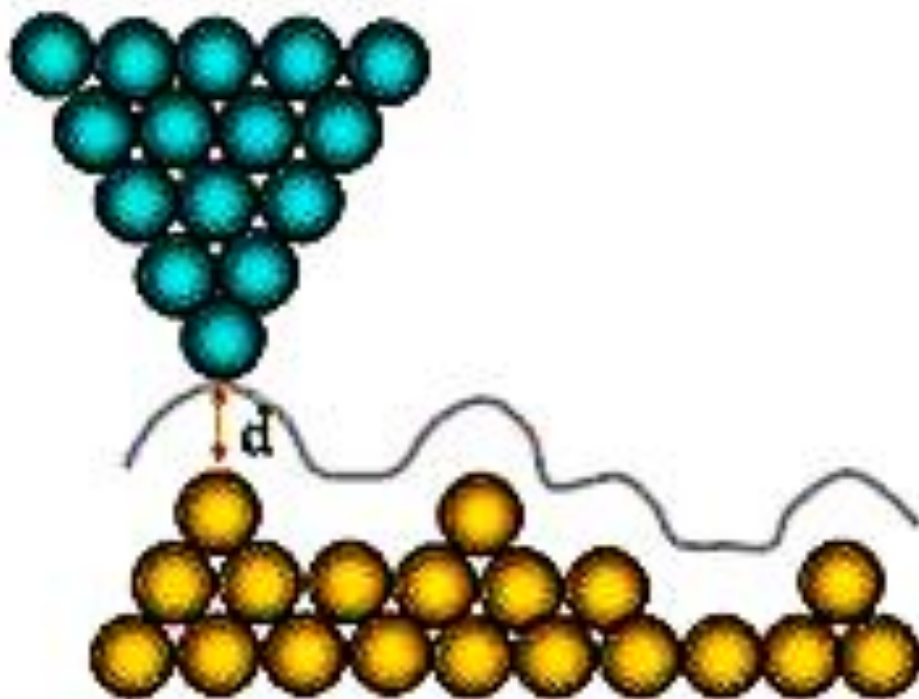
$m$  - masa elektronu,

$e$  - ładunek elektronu,

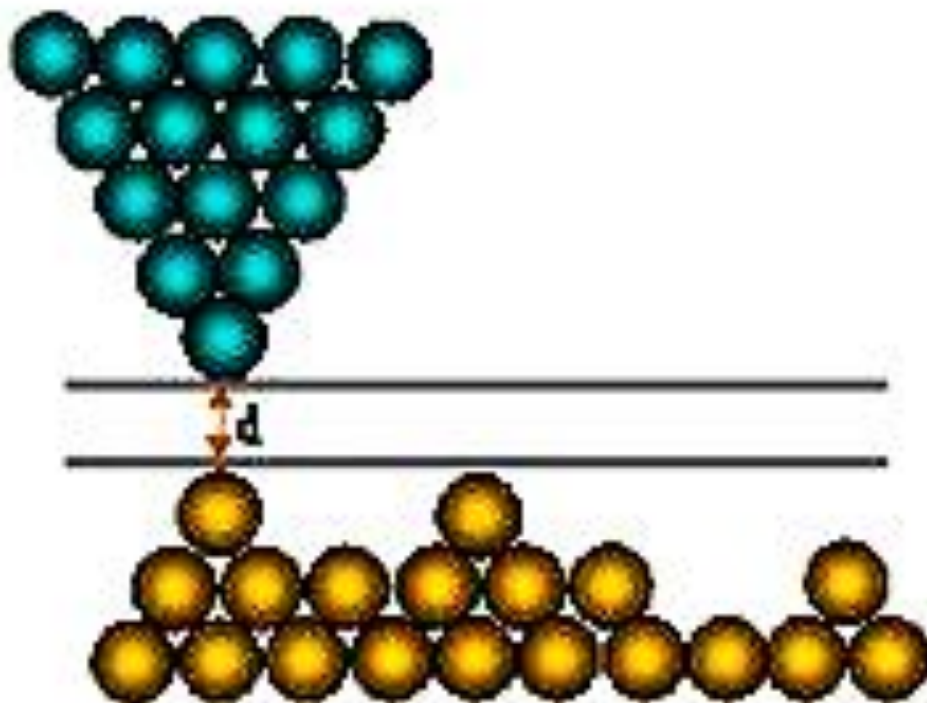
$U$  - przyłożone napięcie,

$z$  - odległość między ostrzem a badaną powierzchnią,

- prąd tunelowy jest proporcjonalny do prawdopodobieństwa tunelowania, które eksponencjalnie zależy od  $z$ ,
- możliwe jest uzyskanie informacji o strukturze powierzchni za pomocą piezoelektrycznego układu sterującego sondą.



Zasada działania  
mikroskopu skaningowego  
tunelowego  
odwzorowującego strukturę  
powierzchniową z  
zastosowaniem stabilizacji  
prądu



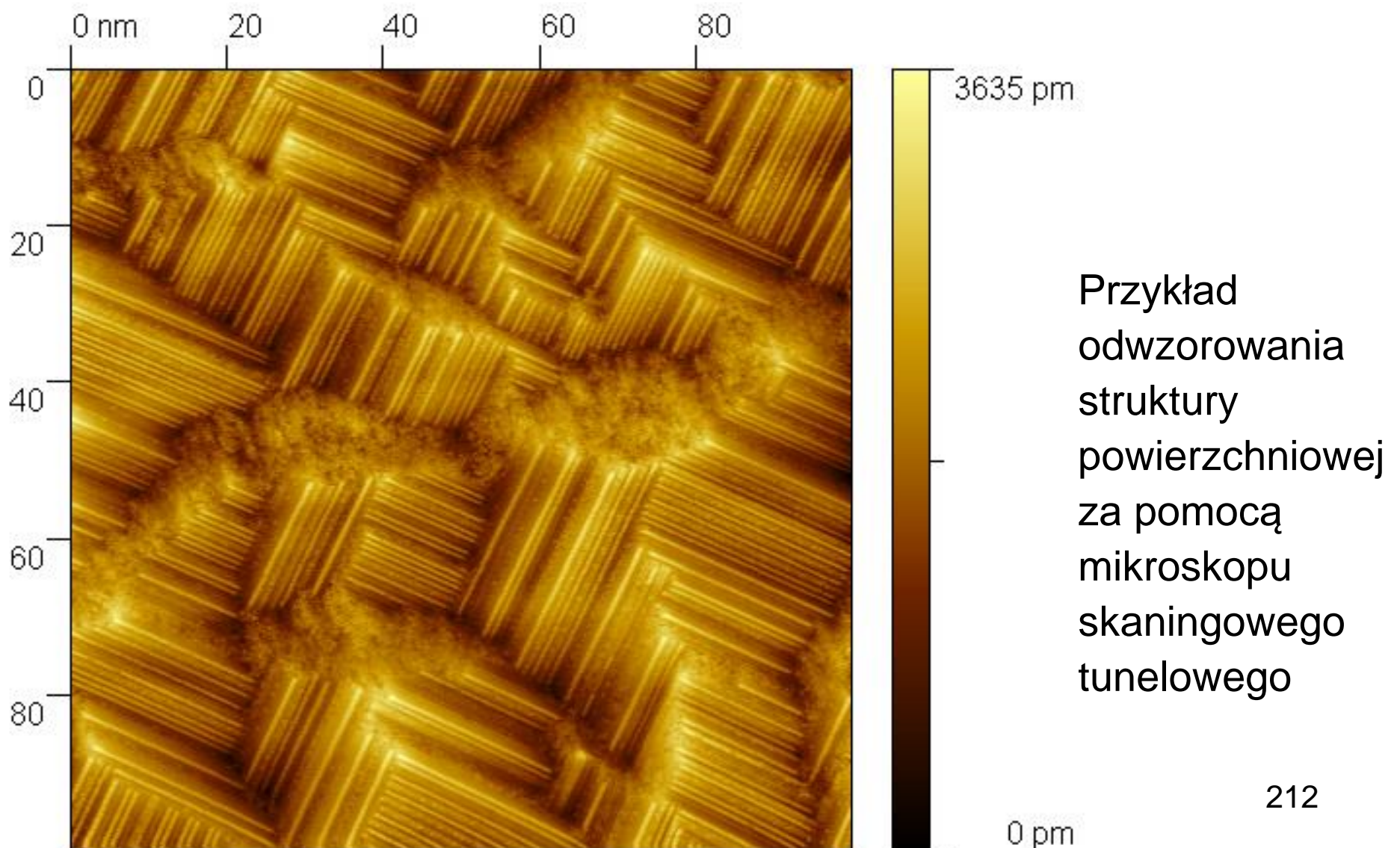
Zasada działania  
mikroskopu  
skaningowego  
tunelowego  
odwzorowującego  
strukturę powierzchniową  
przez pomiar prądu

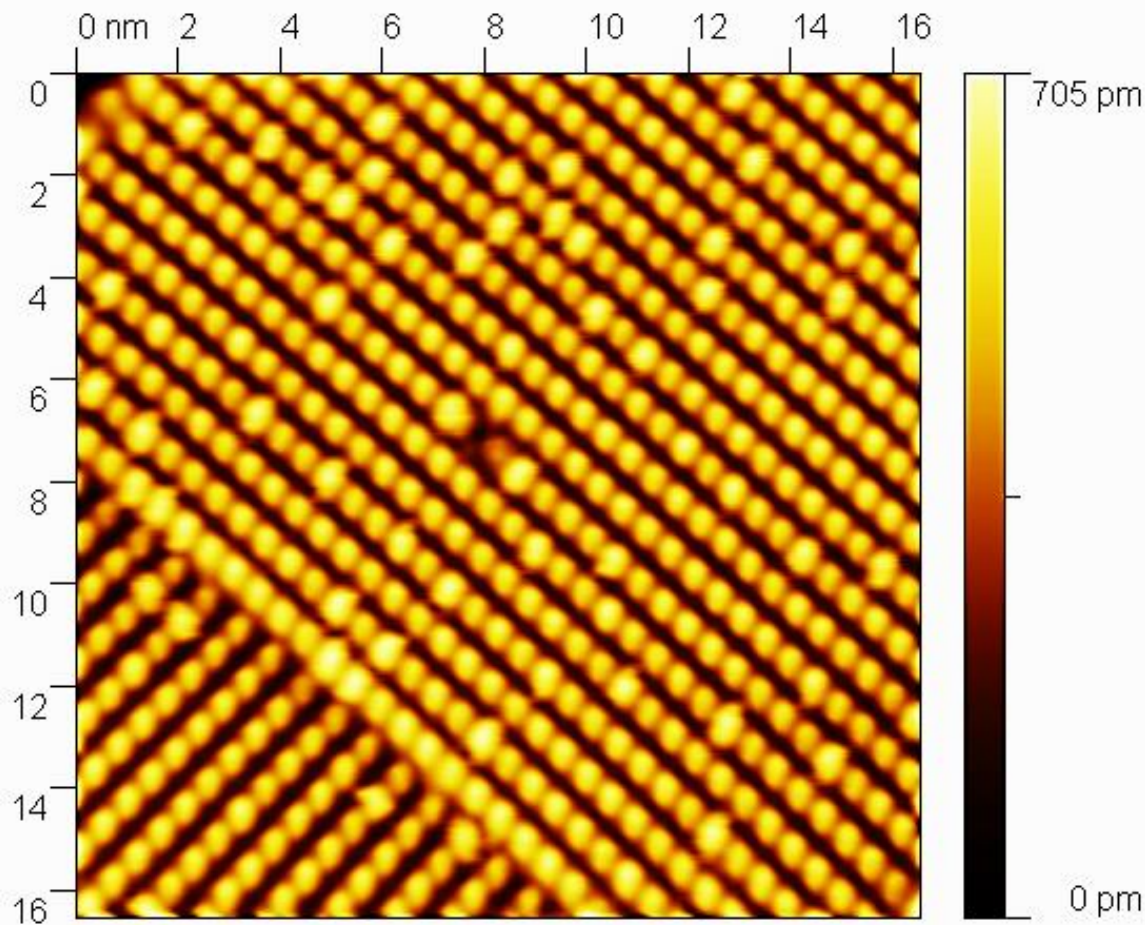
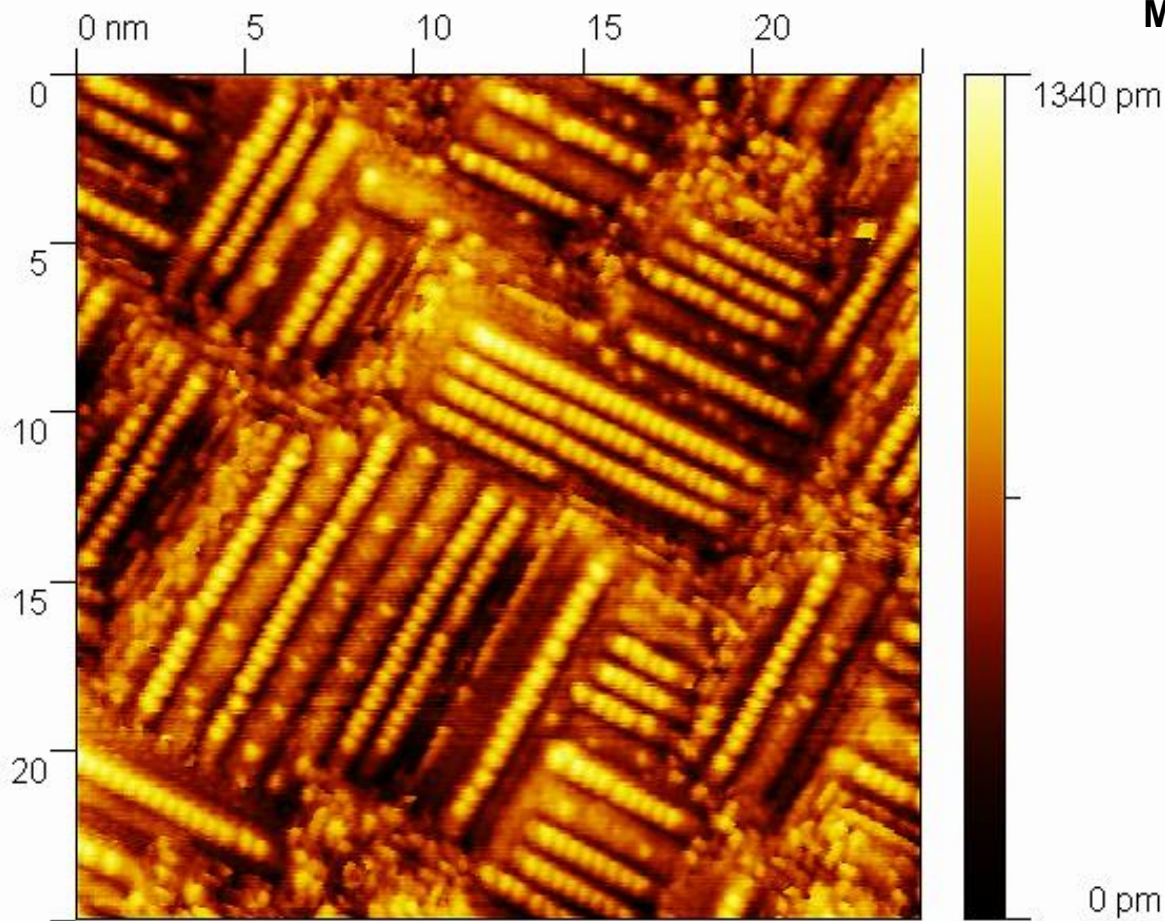
Zdolność rozdzielcza metody STM osiąga:

- pionowa:  $0,01 \div 0,05$  nm,
- pozioma: około 0,3 nm.

To pozwala „zaobserwować” rozmieszenie atomów na powierzchni i rozróżnić obszary o różnym składzie atomowym.

Ograniczeniem techniki STM są wymagania, żeby badana próbka miała dobre przewodnictwo elektryczne.

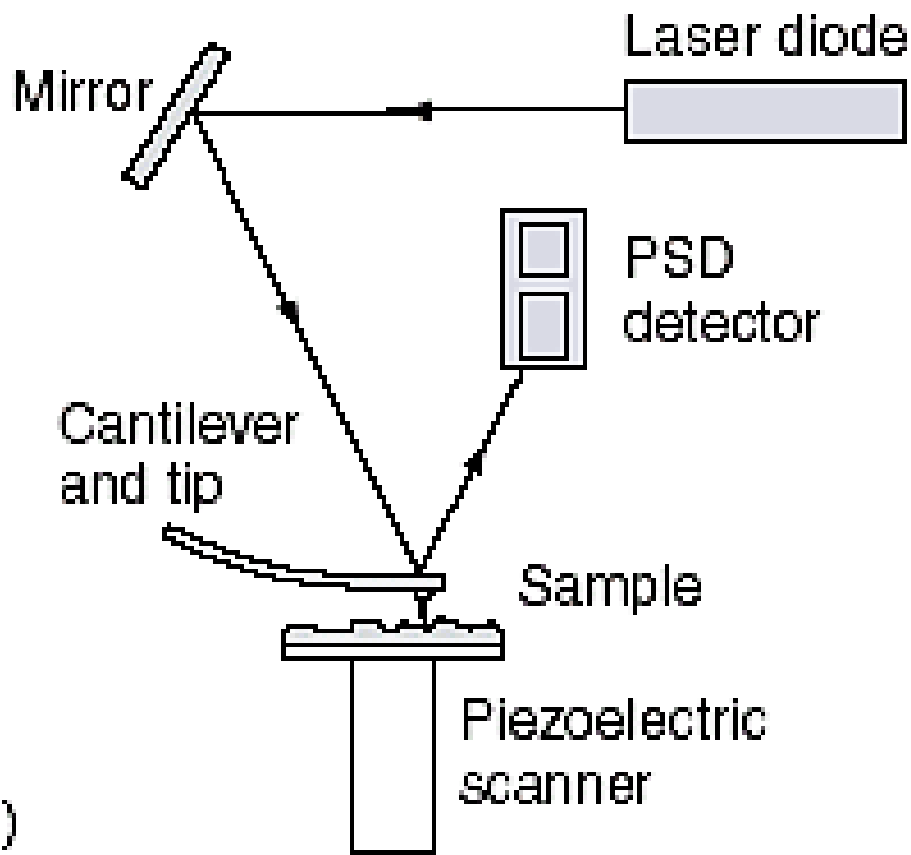




Przykłady odwzorowania struktury powierzchniowej za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego

## Mikroskop sił atomowych AFM (1986)

- sonda mikroskopu skanuje badaną powierzchnię rejestrując siłę oddziaływania międzyatomowego w funkcji położenia,
- AFM można wykorzystywać w wysokiej próżni, w normalnej atmosferze lub gdy badana próbka jest zanurzona w cieczy,
- ostrze sondy AFM jest umieszczone na końcu dźwigni o długości od 100 do 200  $\mu\text{m}$ ,
- dźwignia ugina się w wyniku działania sił między sondą a badaną powierzchnią,
- koniec ostrza przesuwają się wzdłuż powierzchni (lub próbka przesuwa się pod ostrzem),
- ugięcie dźwigni zazwyczaj mierzy się za pomocą wiązki lasera, która trafia do fotodetektora po odbiciu od powierzchni dźwigni,
- każde odchylenie dźwigni wywołuje zmianę pozycji plamki lasera na detektorze,
- możliwe jest wyznaczenie zmiany położenia dźwigni z dokładnością poniżej 1 nm,
- występuje wiele typów oddziaływań, które są źródłem sił działających na dźwignie AFM,

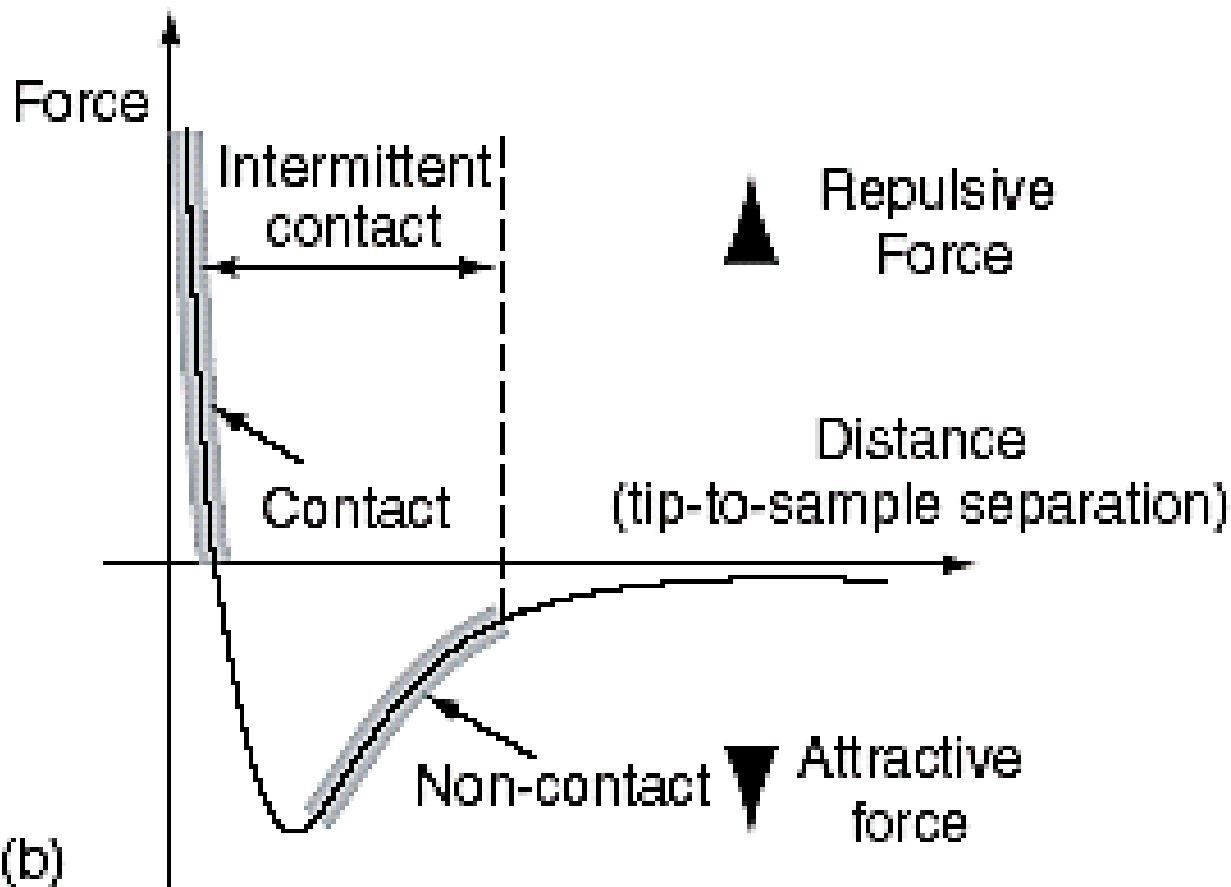


(a)

Mikroskop sił atomowych:

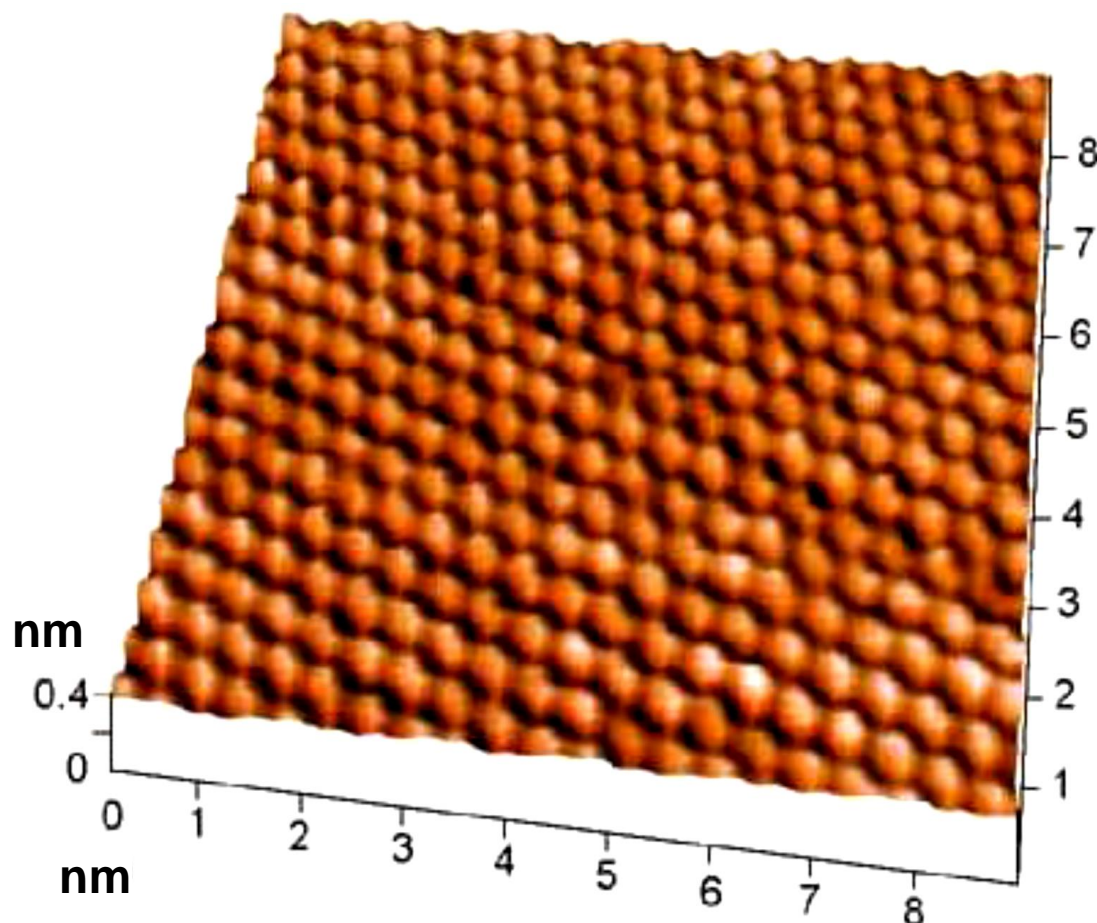
(a) schemat budowy

(b) wykres oddziaływania atomów ostrza i próbki



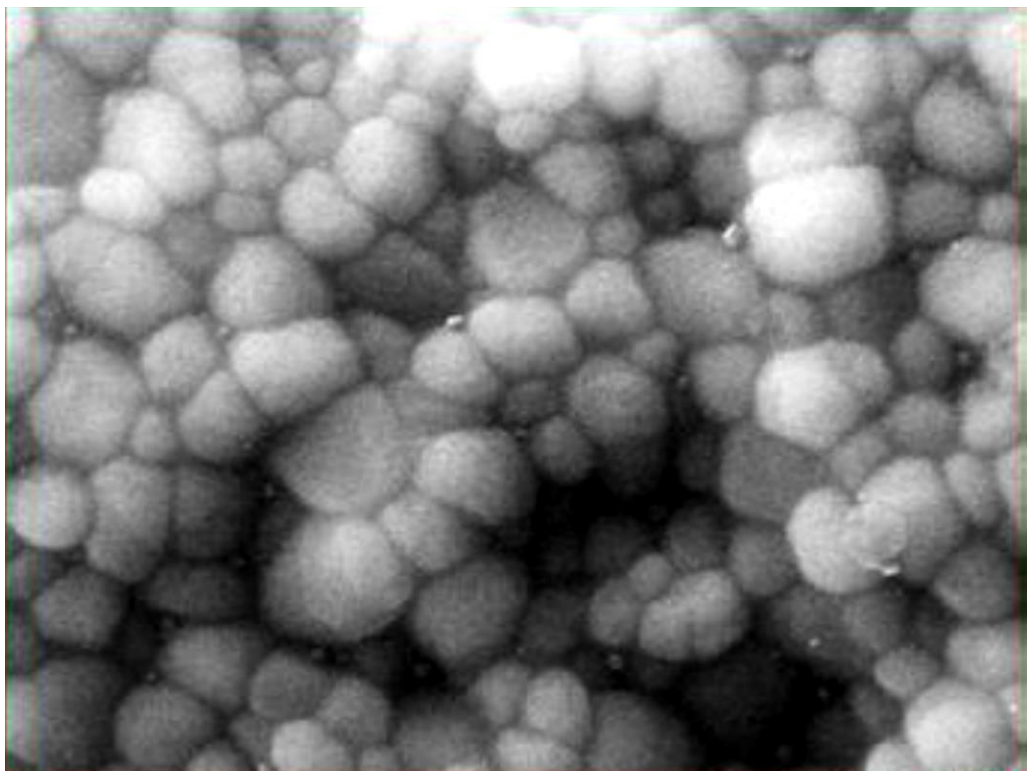
(b)

- dominujące są przyciągające oddziaływania van der Waalsa oraz odpychanie elektrostatyczne (rys. na poprzedniej stronie),
- gdy sonda znajduje się w odległości kilku dziesiątych nanometra od próbki działające na nią siły są siłami odpychającymi,
- ten efekt powstaje wskutek nakładania się chmur elektronowych ostrza i powierzchni próbki,
- region bezkontaktowy (rysunek) występuje w przedziale odległości ostrze - próbka od 1 do kilkudziesięciu nanometrów,
- dla takich odległości oddziaływania są głównie przyciągające, co jest wynikiem dominacji oddziaływań van der Waalsa.

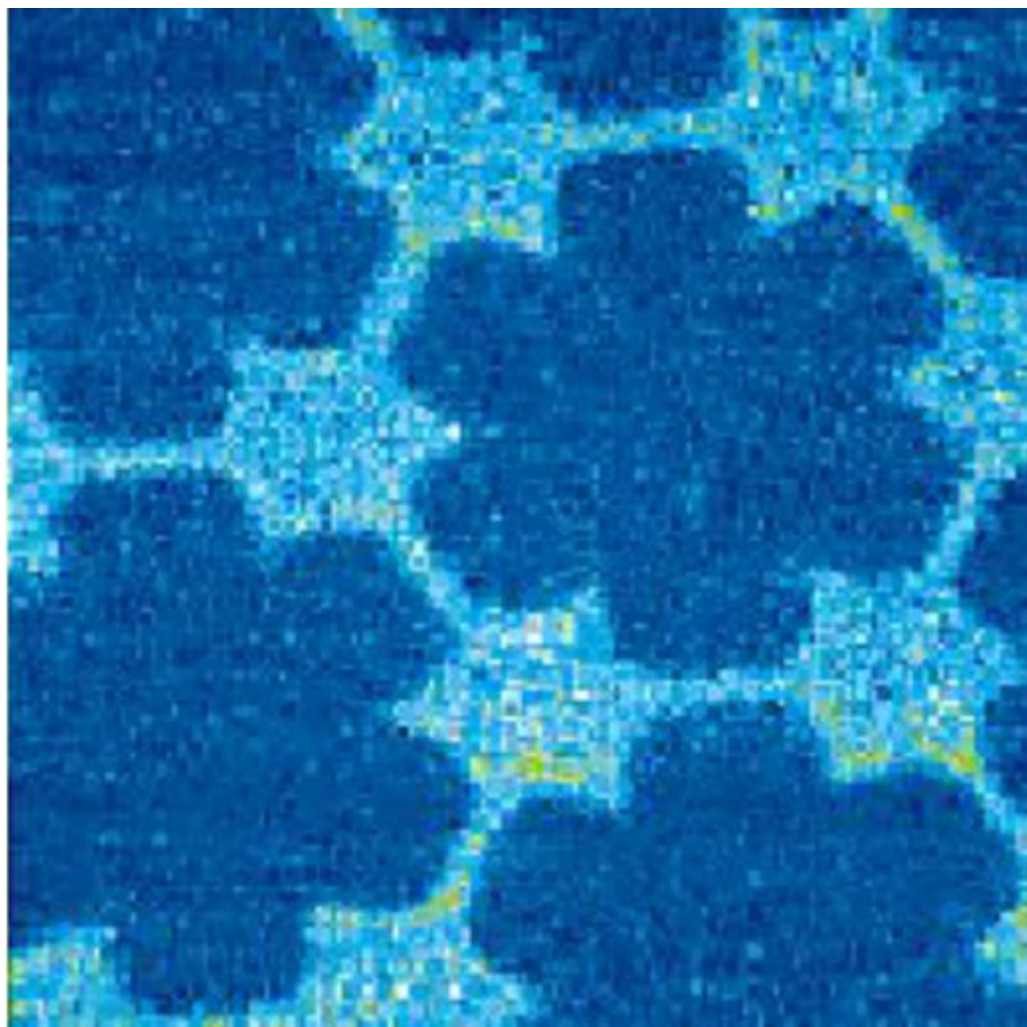


Obraz struktury  
powierzchni  $\text{MoTe}_2$





Obraz powierzchni  
materiału  
ceramicznego  
(szerokość 500 nm)



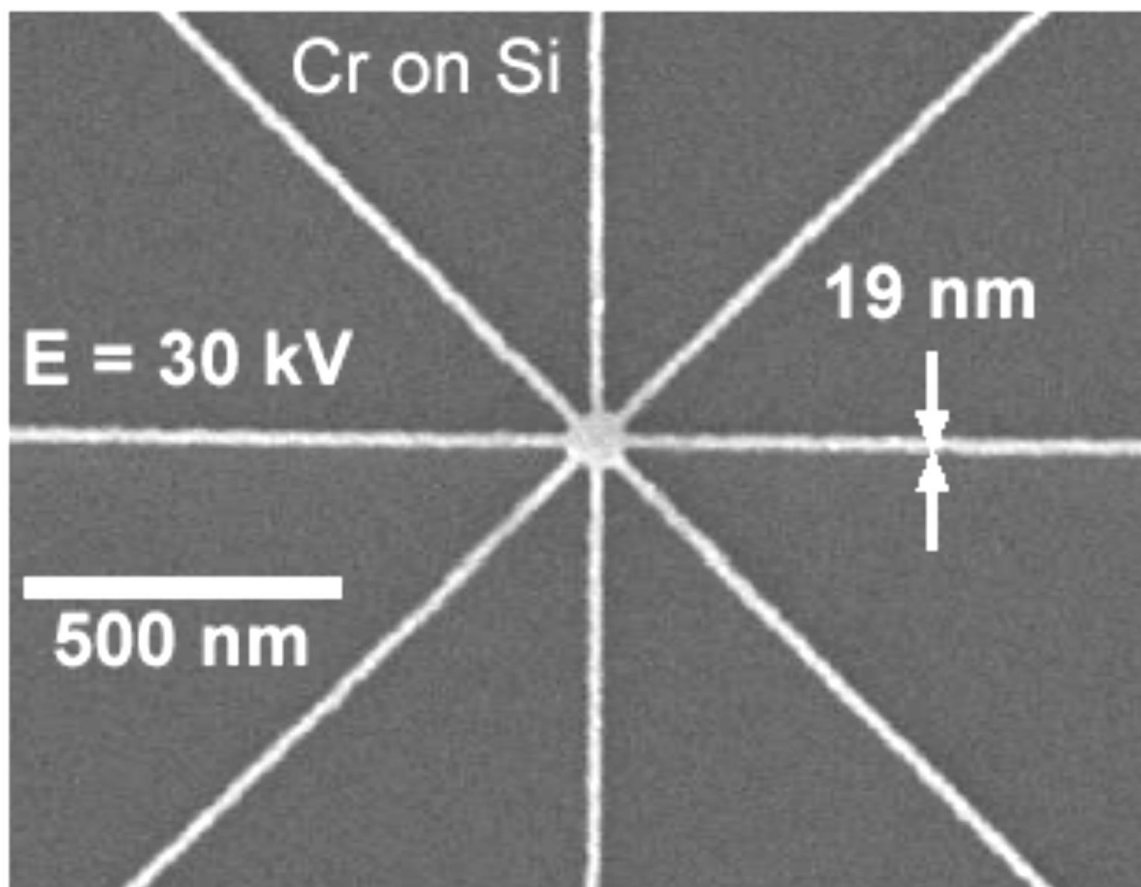
Zaadsorbowana  
warstwa organiczna  
na elektrodzie Au

## ***Litografia z zastosowaniem strumienia elektronów***

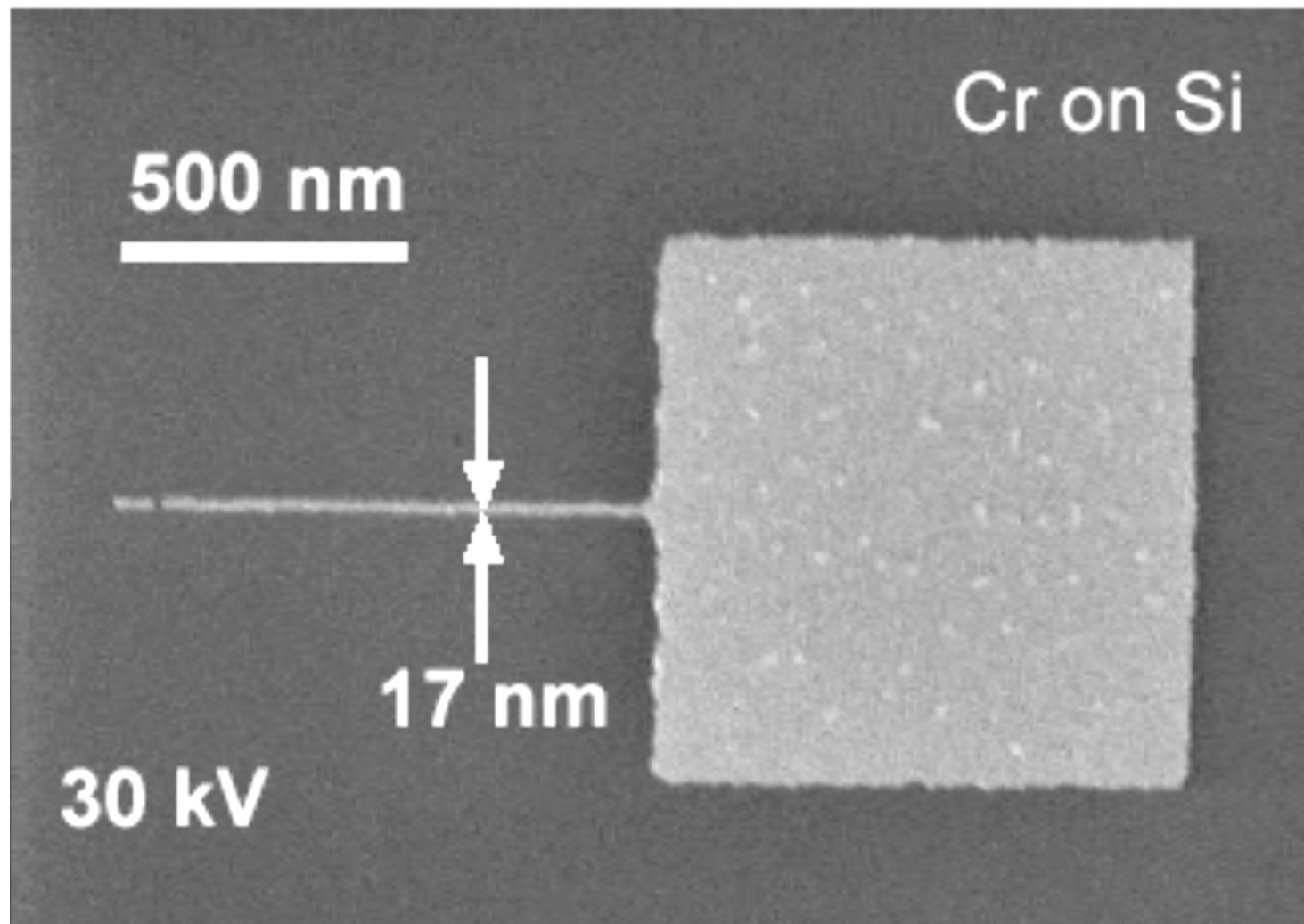
- litografia jest procesem odwzorowywania masek układu elektronicznego na podłożu i nakładanych warstwach,
- rozdzielczość w procesie litografii zależy od długości fali i od możliwości skupienia wiązki roboczej,
- zastosowanie światła widzialnego na granicy ultrafioletu  $\lambda = 360 \text{ nm}$  pozwala uzyskać rozdzielczość  $\approx 1 \text{ }\mu\text{m}$ ,
- zastosowania promieni X jest zbyt skomplikowane i niebezpieczne,
- strumień elektronów o energii 10 keV ma długość fali  $\lambda = 0,12 \text{ nm}$  i pozwala uzyskać rozdzielczość 1...10 nm,
- litografia strumieniem elektronów wymaga próżni, co pozwala uniknąć zanieczyszczeń,
- litografię elektronową można prowadzić bez masek (sterowanie komputerowe strumieniem elektronów).

Parametry jednego z najnowszych urządzeń do litografii elektronowej:

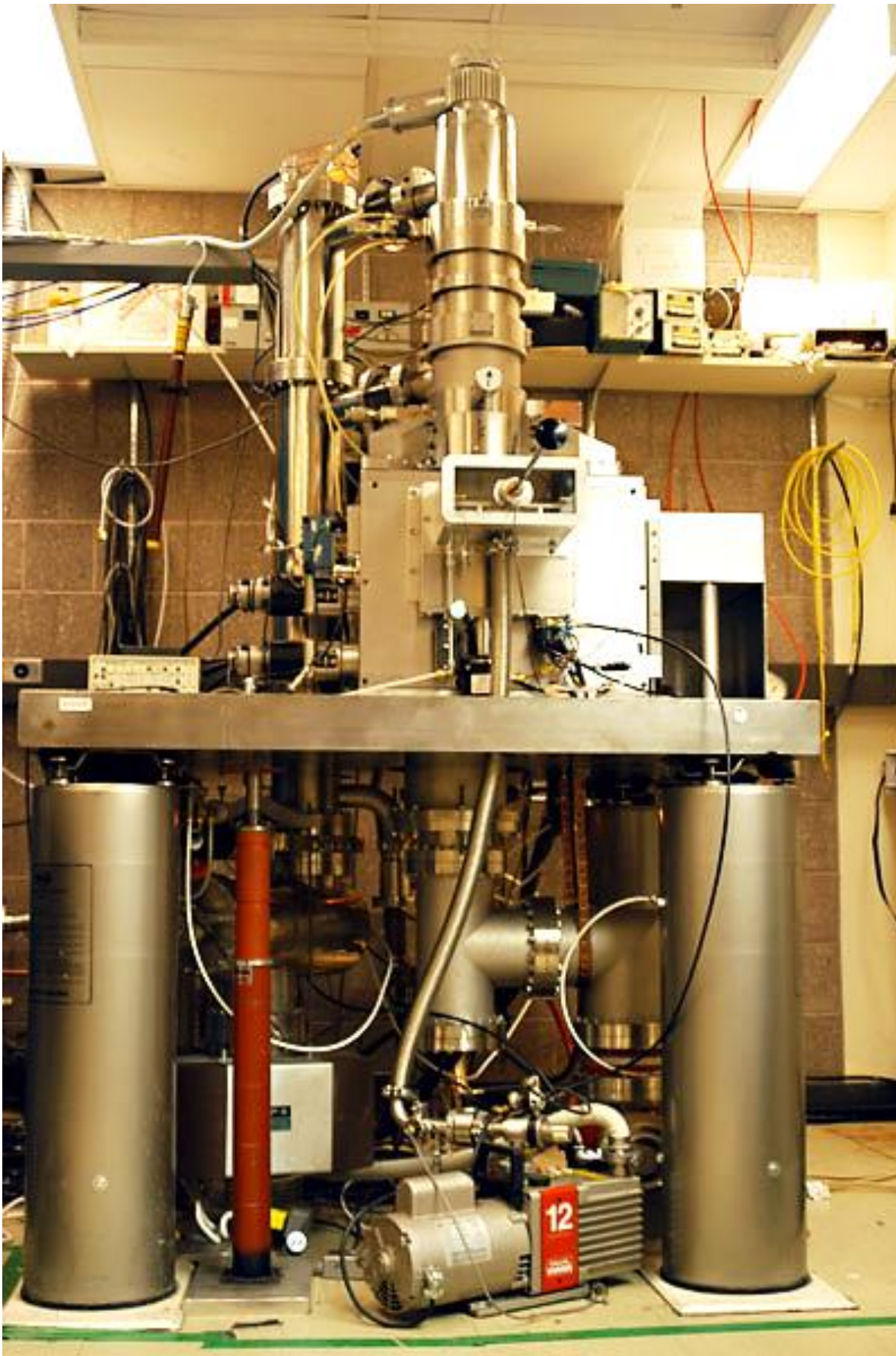
- napięcie przyspieszające: 1 – 30 kV,
- najmniejsza średnica strumienia elektronów: 3 nm,
- długość kroku przesuwu strumienia: 2 nm,
- prędkość przesuwu strumienia: 1 MHz,
- wymiary obrabianego pola: 50 – 300  $\mu\text{m}$ ,
- minimalna szerokość pojedynczej ścieżki: 17 nm.



Przykład  
zastosowania  
opisanej metody  
litografii  
elektronowej



Przykład zastosowania opisanej metody litografii elektronowej



Przykładowe  
nowoczesne  
urządzenie  
do litografii  
elektronowej