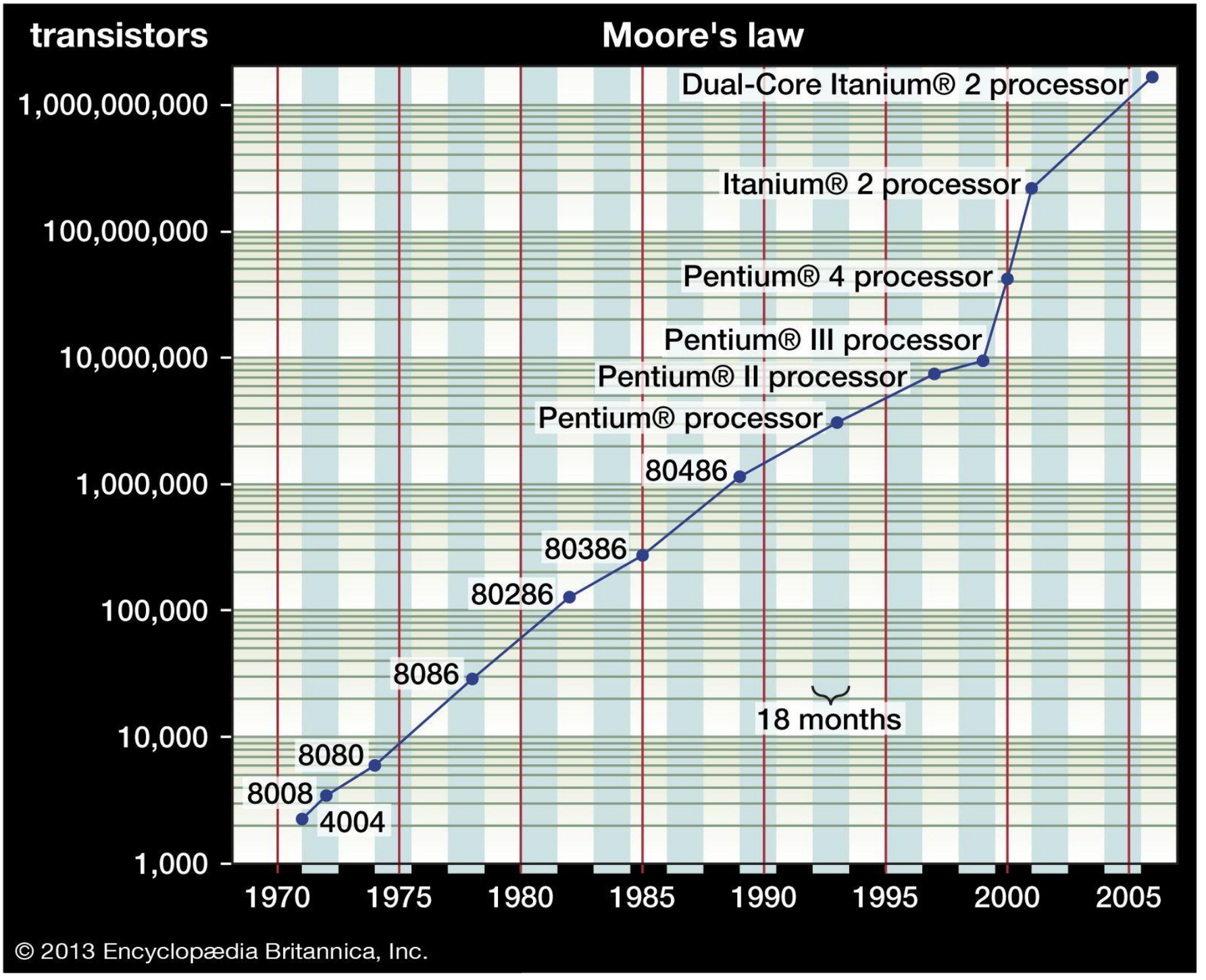
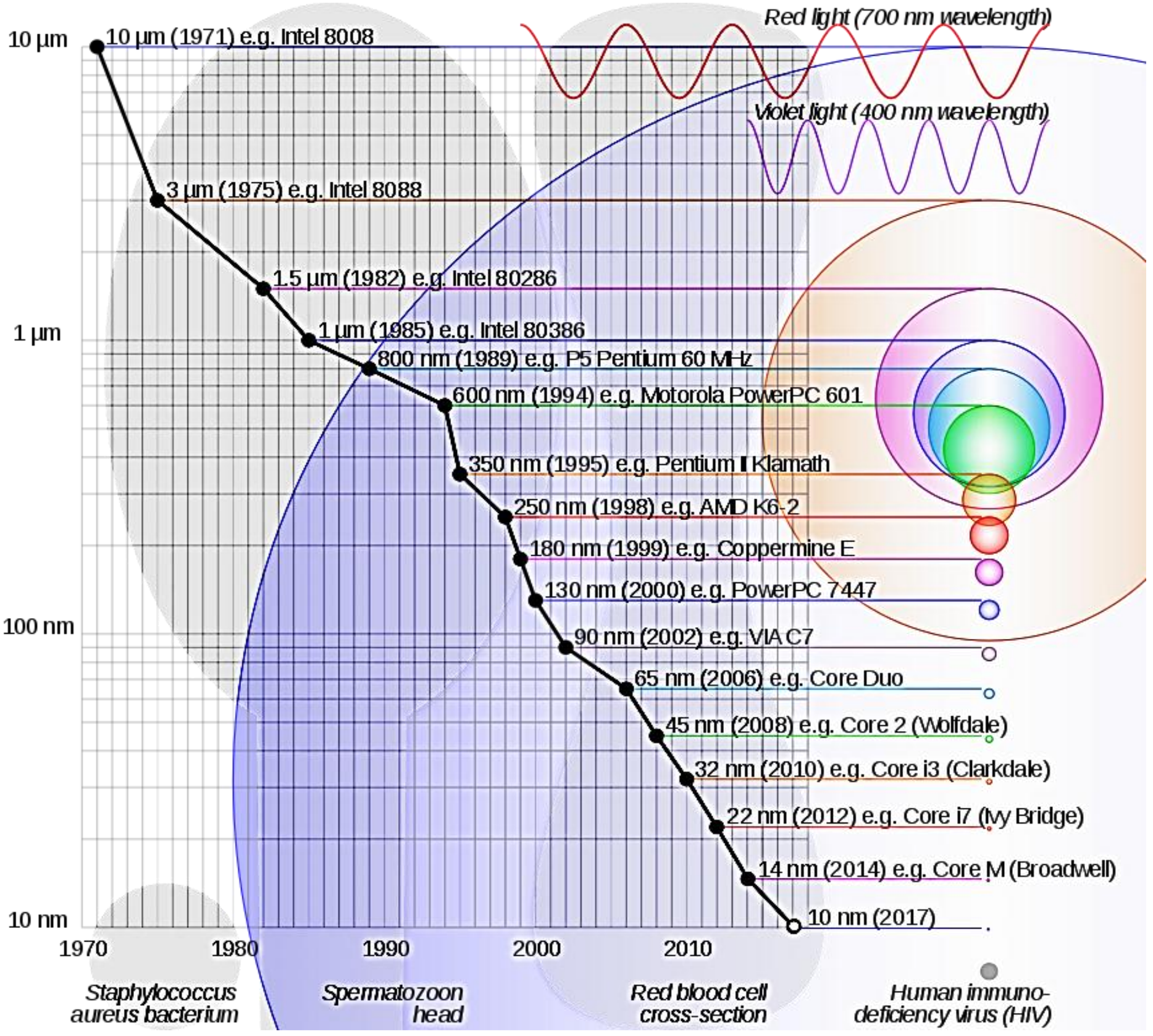
NANOTECHNOLOGIA W ELEKTRONICE

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



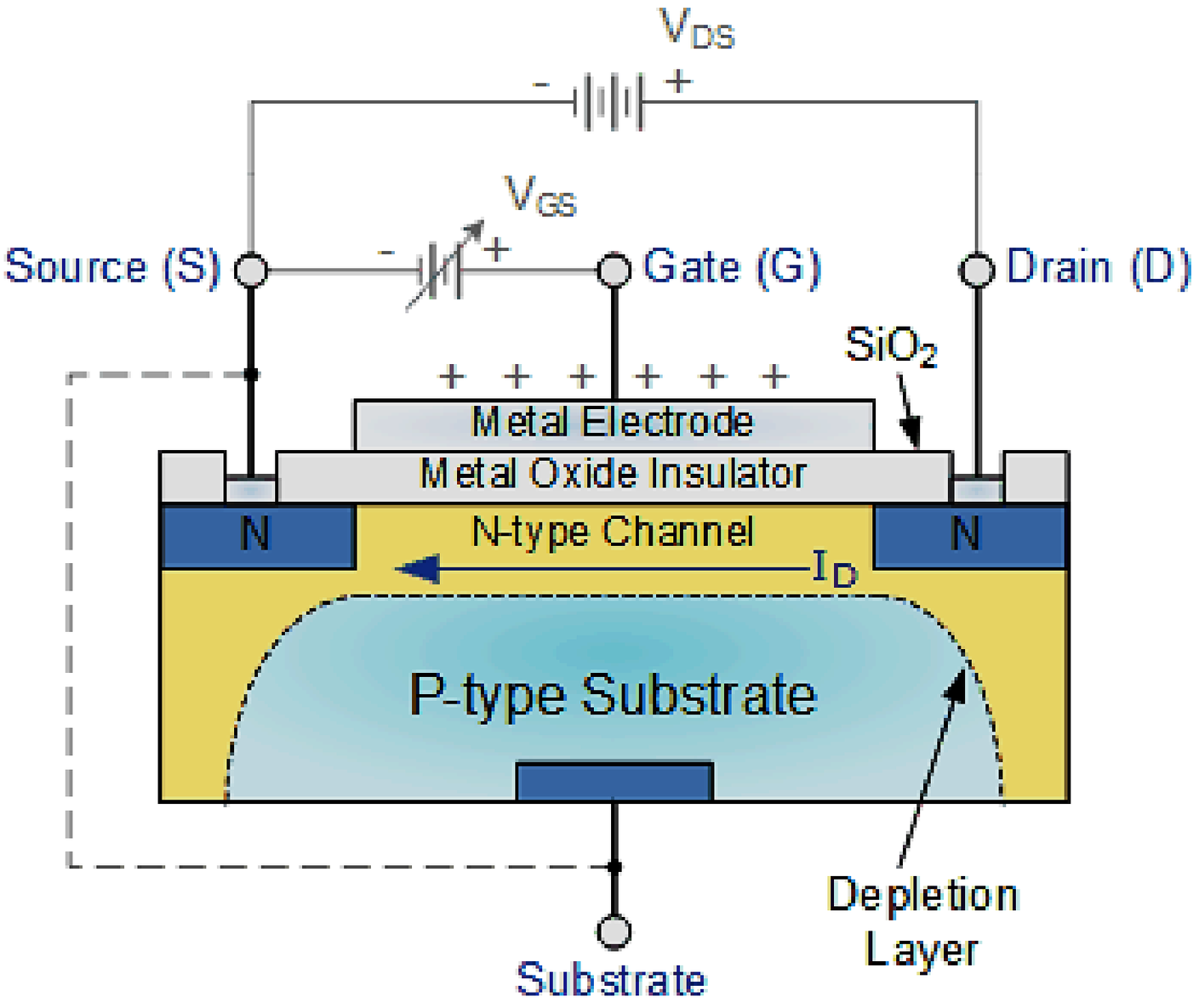


Przykładowe prawo Moore’a dla okresu 1970 - 2017

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 $\rightarrow$ E = $5 \cdot 10^5$ V/mm (granica wytrzymałości), zmniejszenie grubości izolacji do 20 nm $\rightarrow$ E = $2{,}5 \cdot 10^6$ V/mm,
- wpływ nierównomierności rozkładu domieszek na powtarzalność własności półprzewodników, np. przekrój poprzeczny kanału tranzystora 1 μm $\times$ 1 μm, liczba atomów domieszki $\approx$ 500 $\pm$50 $\rightarrow$ rozrzut własności $\pm$ 10 %, w 0,01 tego przekroju (0,1 μm $\times$ 0,1 μm), liczba atomów domieszki $\approx$ 5 $\pm$3 $\rightarrow$ rozrzut własności $\pm$60 %,
- problem odprowadzania ciepła, np. bramka tranzystora w procesorze, wydzielane ciepło minimum 10^{-5} W, przy 10^6...10^7 tranzystorów $\rightarrow$ 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).



MOSFET

Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor

Przykładowe elektroniczne nanoelementy kwantowe

- rezonansowa dioda tunelowa,
- tranzystory jednoelektronowe.

Zastosowanie kropki kwantowej do budowy nanoelementów elektronicznych.

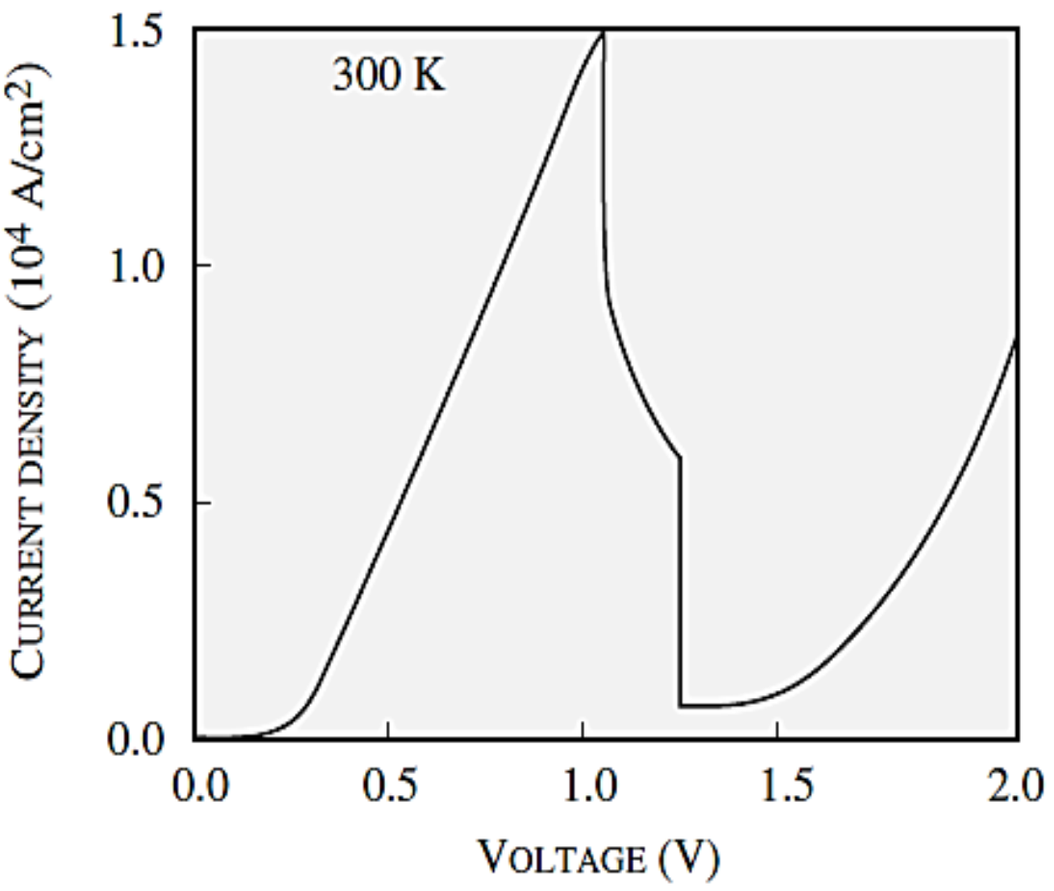
Rezonansowa dioda tunelowa

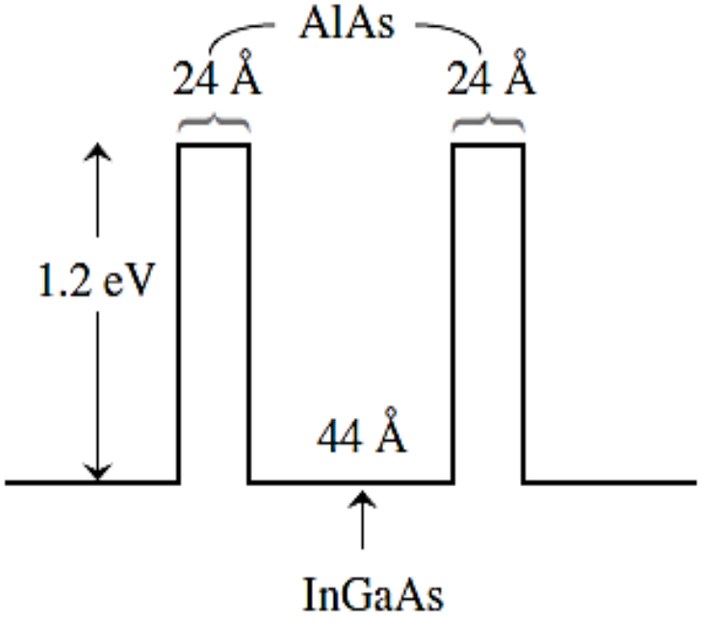
Pole elektryczne prostopadłe do warstw złącz półprzewodników może wywołać prąd płynący przez kolejne warstwy.

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

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

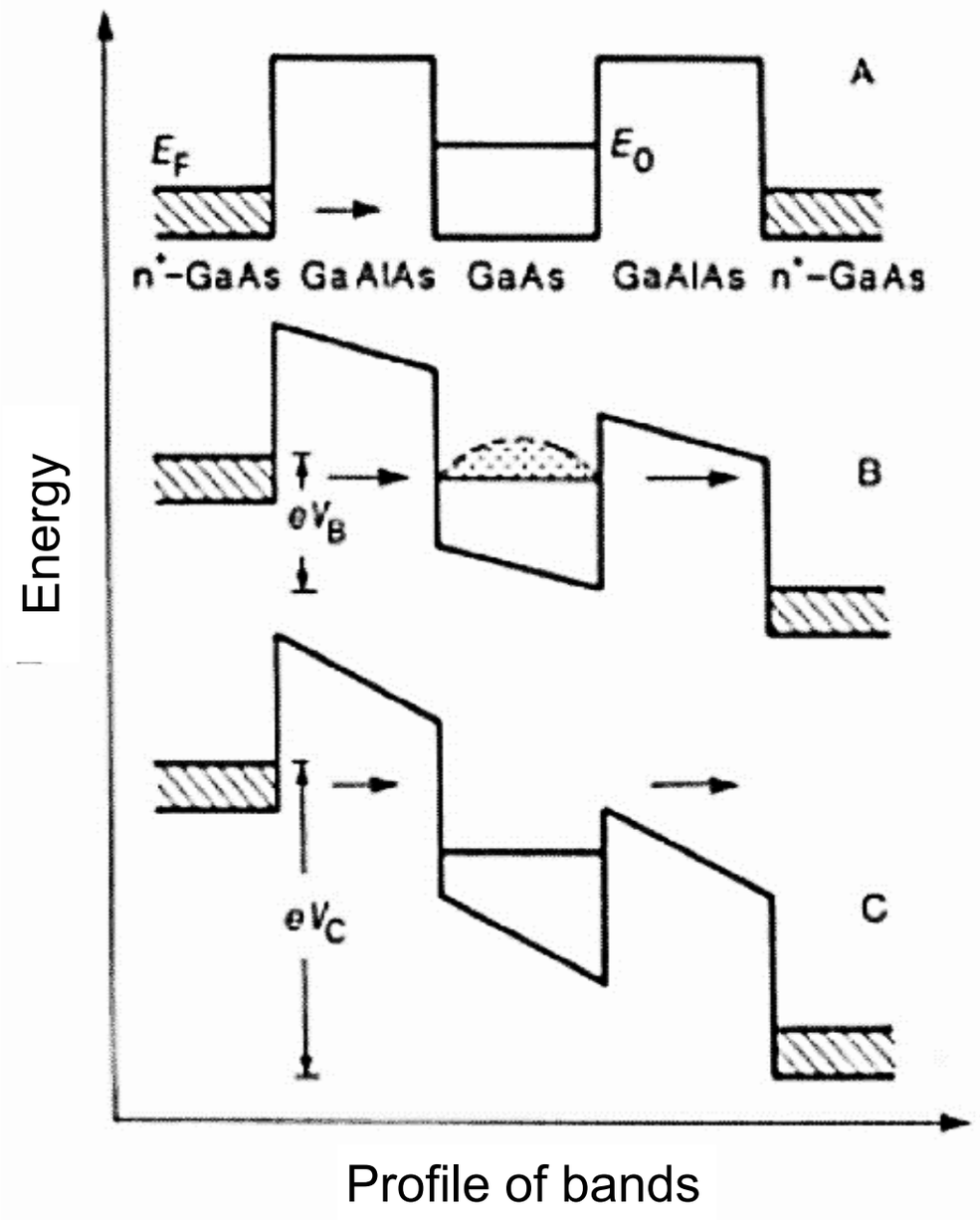
W temperaturze pokojowej występuje pik przy napięciu ≅ 1 V), związany z rezonansowym tunelowaniem elektronów.

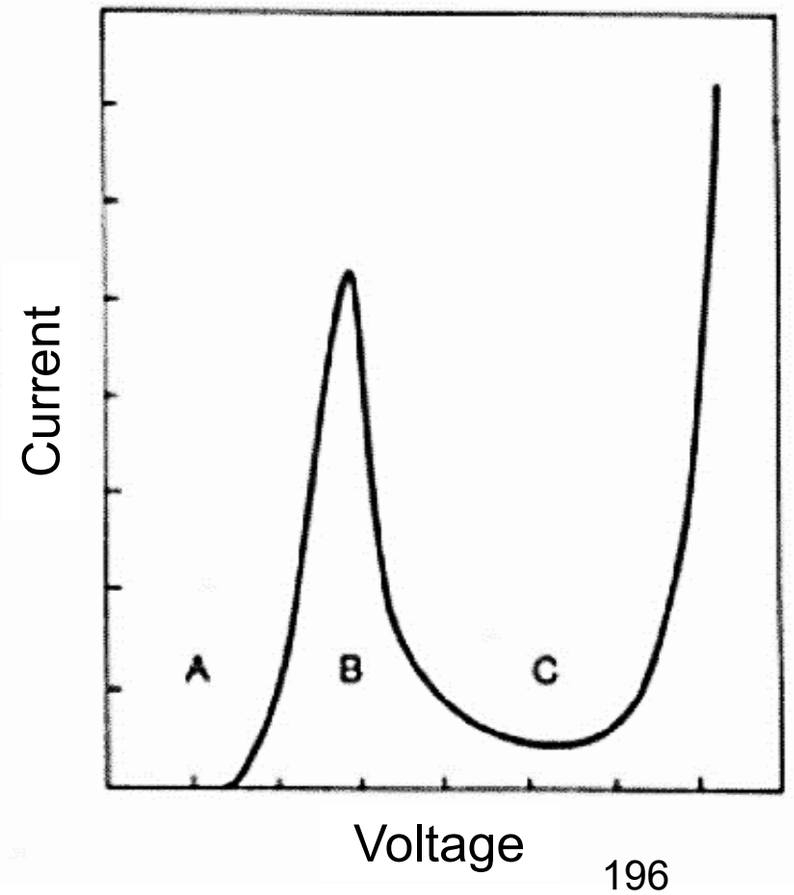




Zwiększenie napięcia (punkt C), powoduje, że wszystkie elektrony wychodzą z obszaru rezonansowego. Natężenie prądu zmniejsza się przy rosnącym napięciu (ujemna rezystancja różniczkowa).

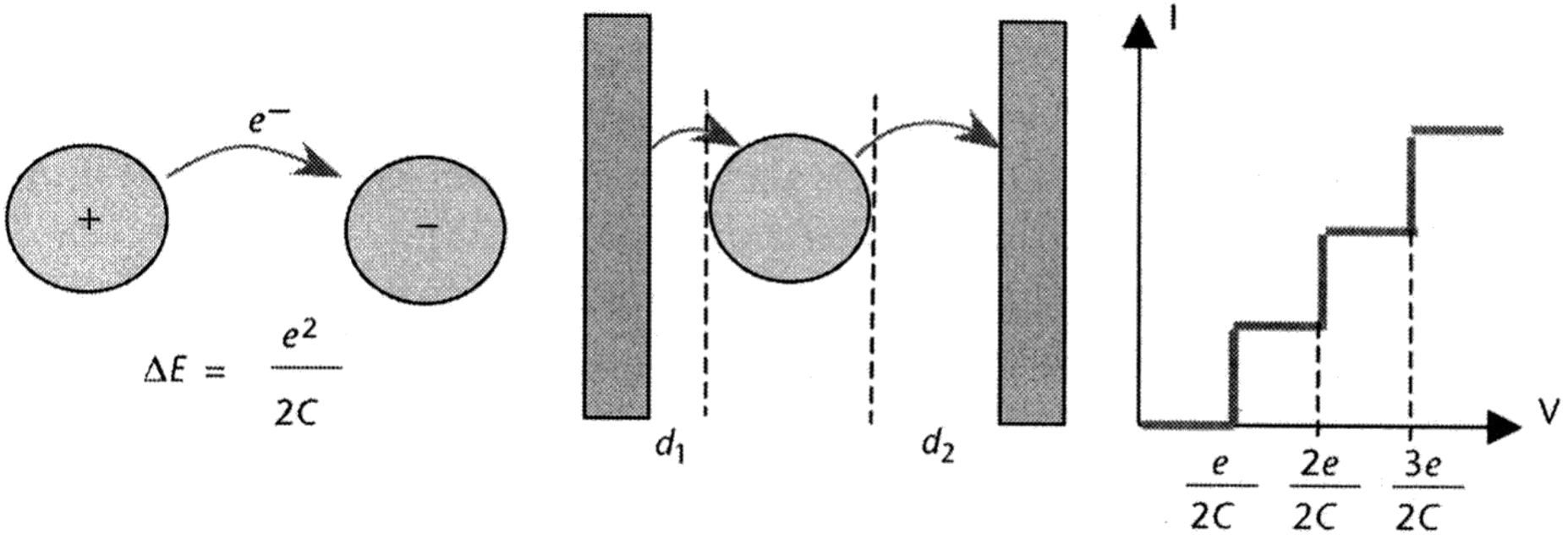
Dalsze zwiększanie napięcia powoduje obniżenie drugiej bariery potencjalnej poniżej E_0 i wzrost prądu emisji termoelektronowej.





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 ΔE, większej od jego energii termicznej:

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

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

Energia termiczna elektronów w temperaturze 300 K:

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

gdzie: *k* - stała Boltzmanna [J/K].

Warunek przekroczenia blokady Coulomba:

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

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

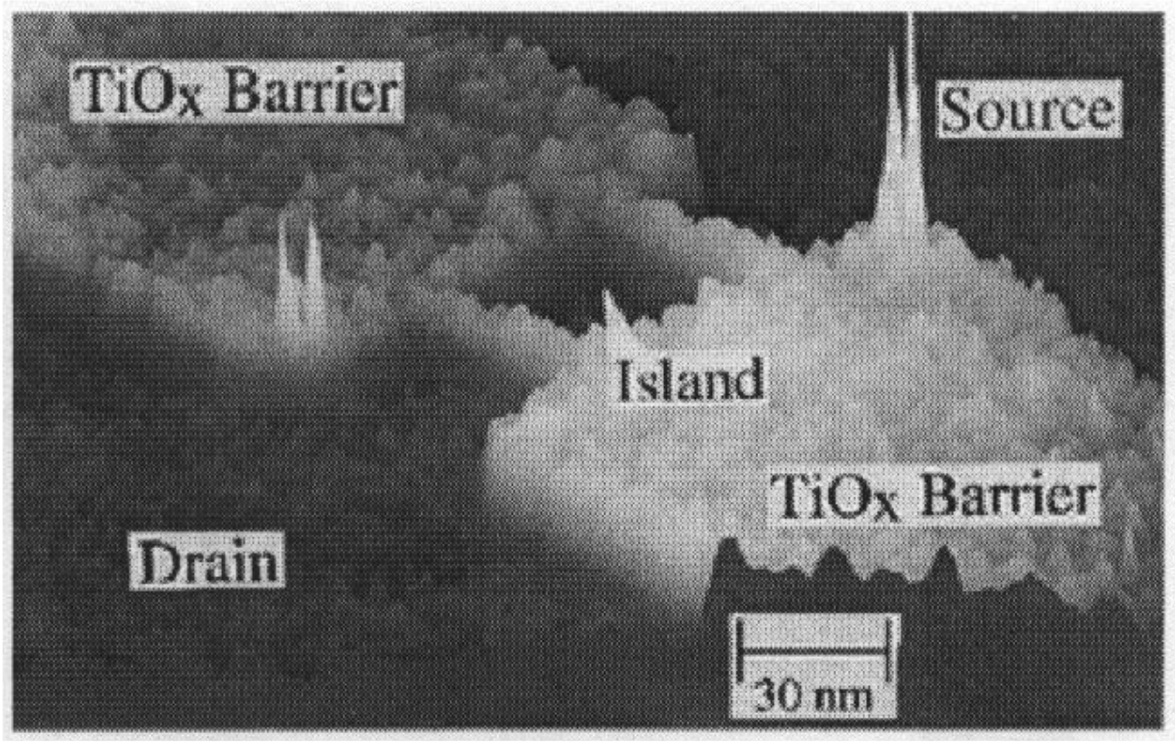
Stąd:

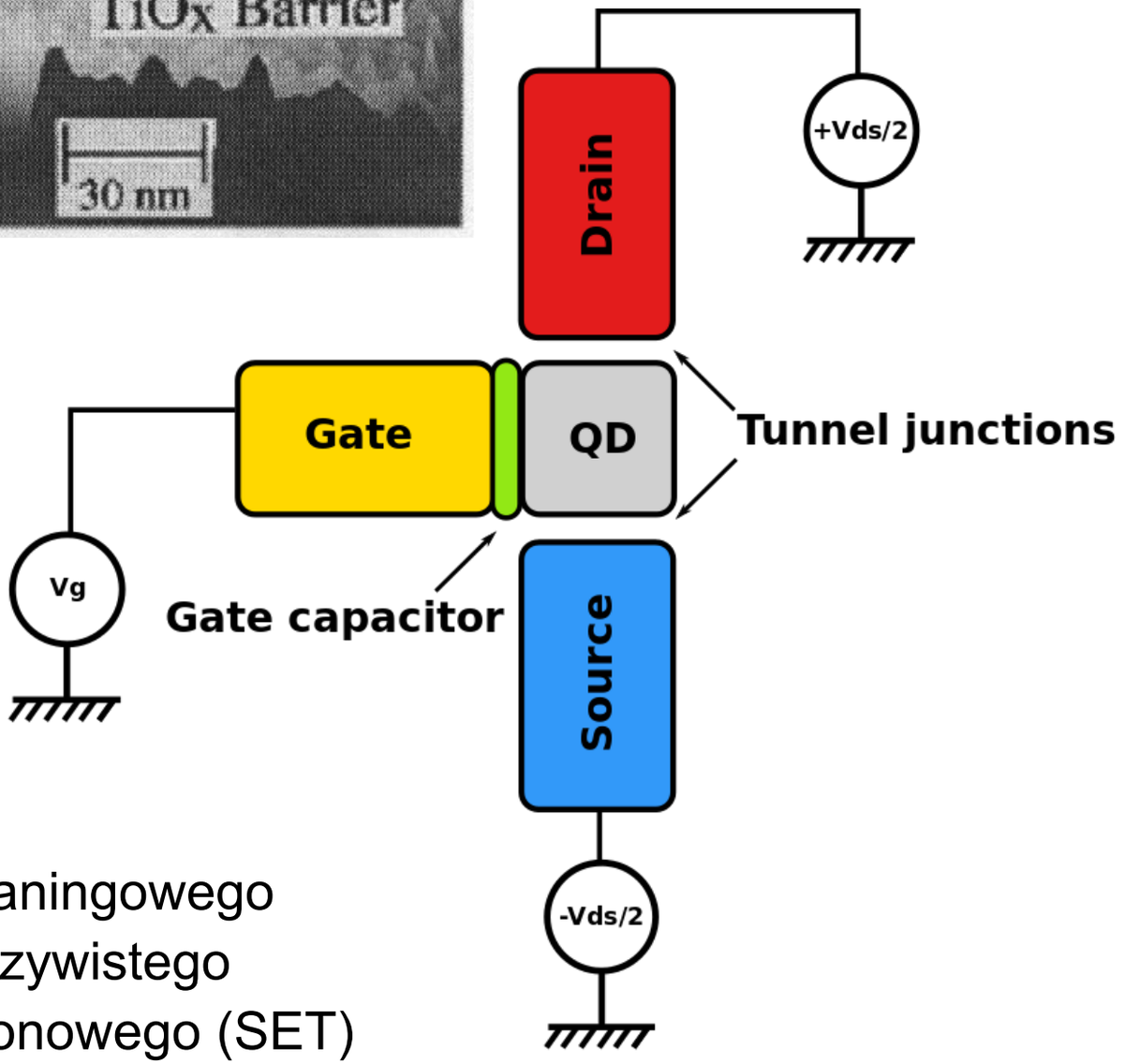
$$C \leq \frac{e^2}{2 \cdot \Delta E} \simeq \frac{(1{,}6 \cdot 10^{-19})^2}{2 \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-20}} \qquad \frac{\mathrm{A^2 s^2}}{\mathrm{VAs}} = \frac{\mathrm{As}}{\mathrm{V}} = \mathrm{F}$$

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

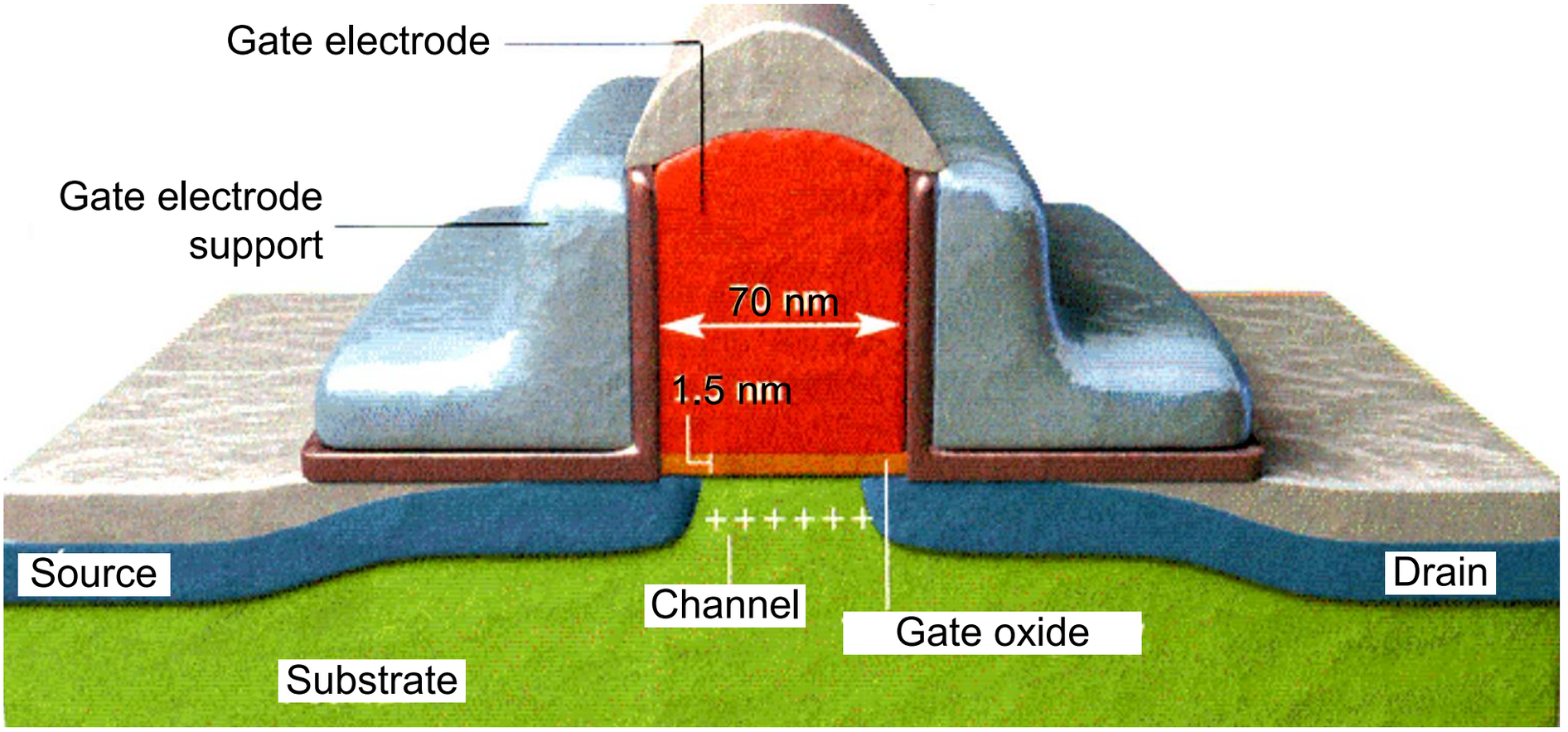
Napięcie spełniające warunek Coulomba:

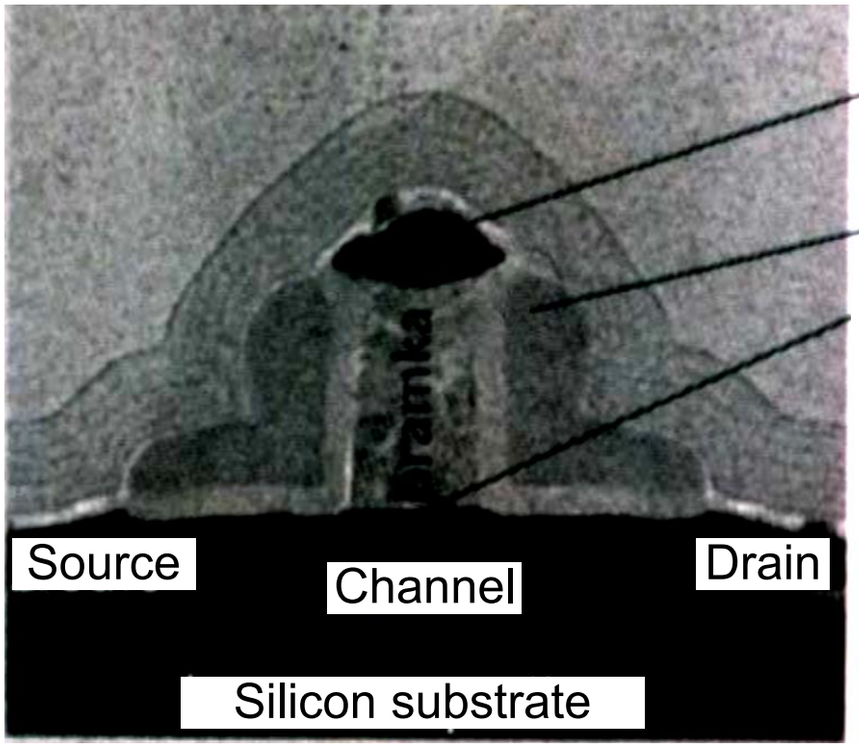
$$\Delta U \geq \frac{\Delta E}{e} = \frac{e}{2C} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-18}} = 0{,}04\ \mathrm{V} = 40\ \mathrm{mV}$$

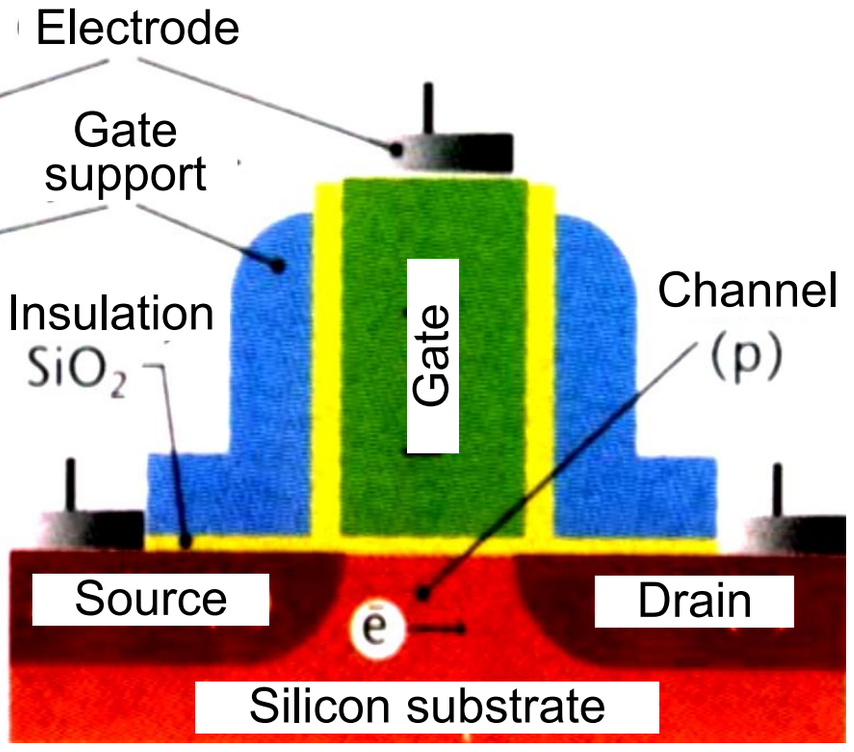




Obraz z mikroskopu skaningowego tunelowego (STM) rzeczywistego tranzystora jednoelektronowego (SET) i jego schemat



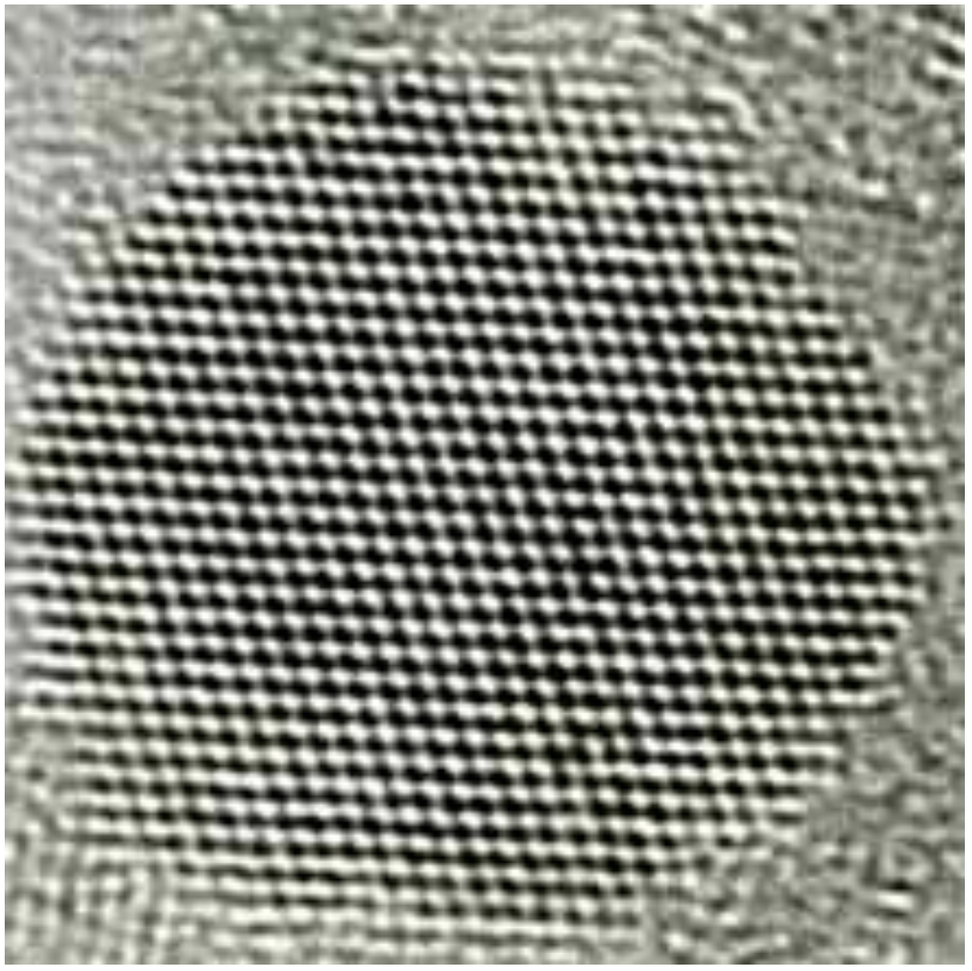




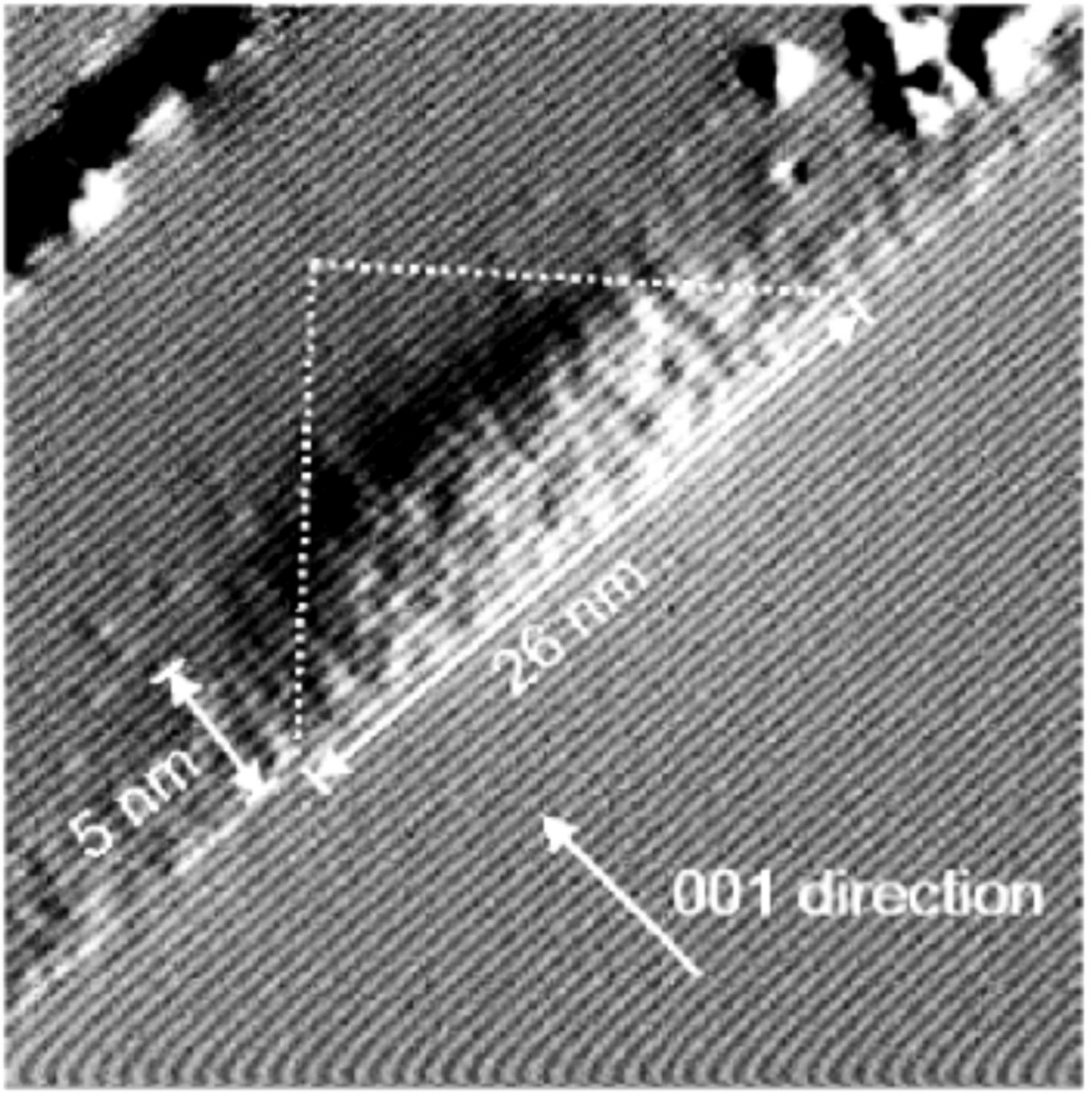
Technologie MOSFET 70 nm i 32 nm

Kropka kwantowa

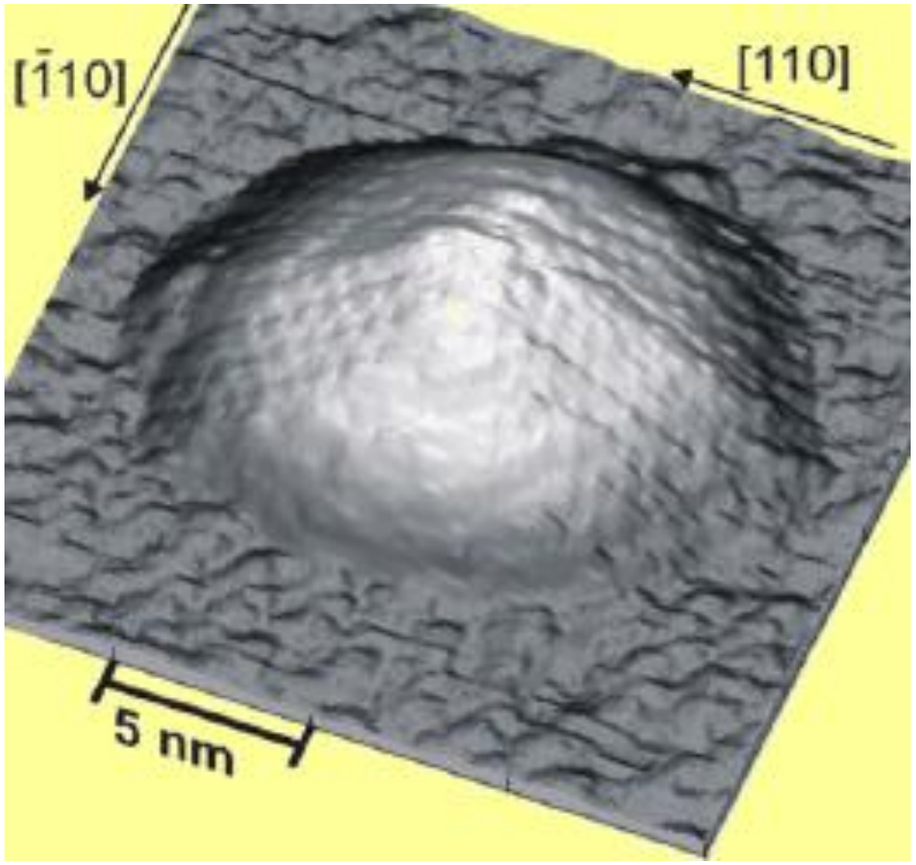
- niewielki rejon przestrzeni ograniczony w 3 wymiarach barierami potencjału, wewnątrz spułapkowana cząstka (elektron) o długości fali porównywalnej z rozmiarami kropki,
- nanocząstka odseparowana od otoczenia, uwięzione w niej elektrony mają określone poziomy energetyczne,
- system obliczeń kawntowych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

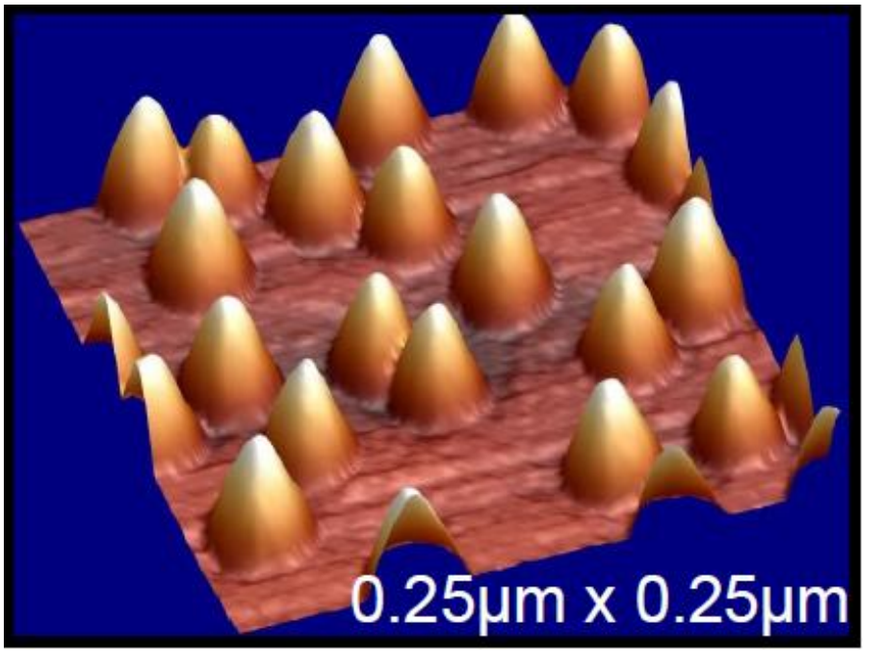


Obraz kropki kwantowej uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego

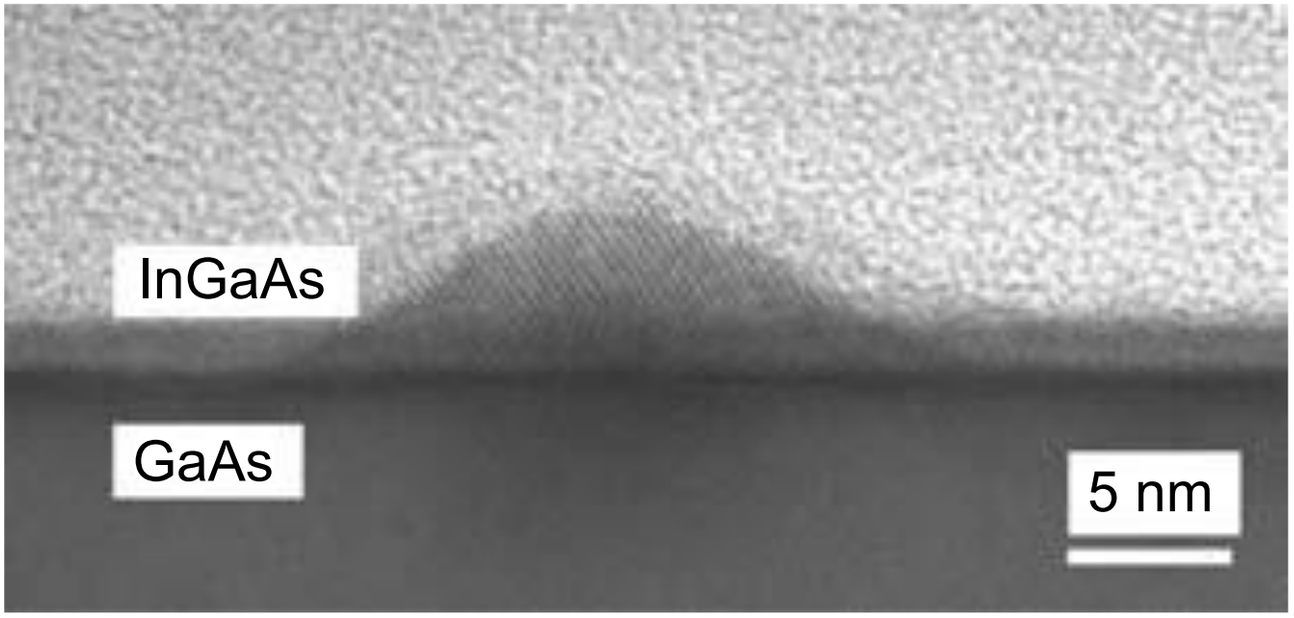


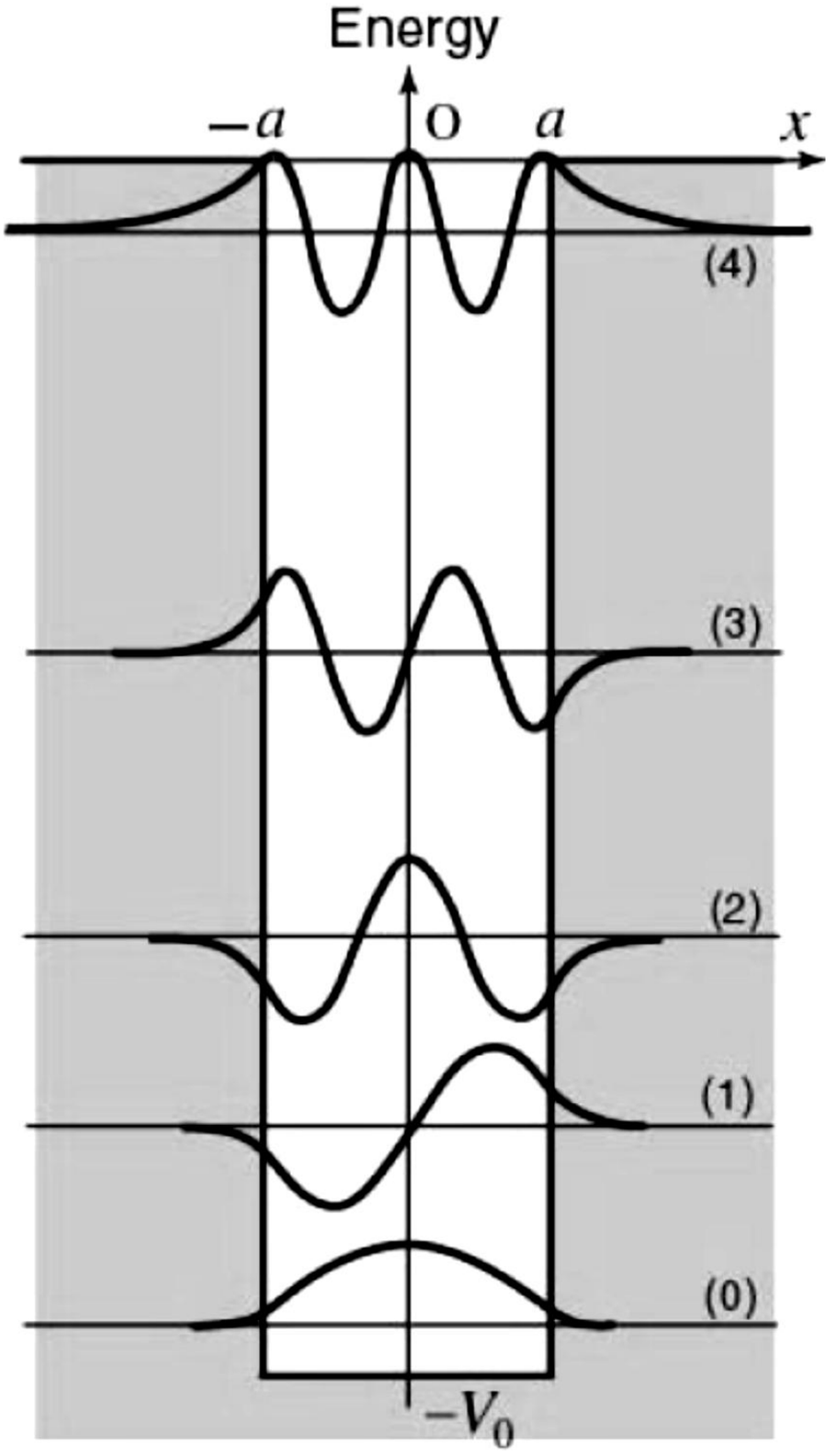
Obraz kropki kwantowej z InAs uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego





Przykładowe obrazy kropek kwantowych





Dyskretne poziomy energii elektronów w kropce kwantowej

Technologie, które umożliwiły rozwój nanoelektroniki

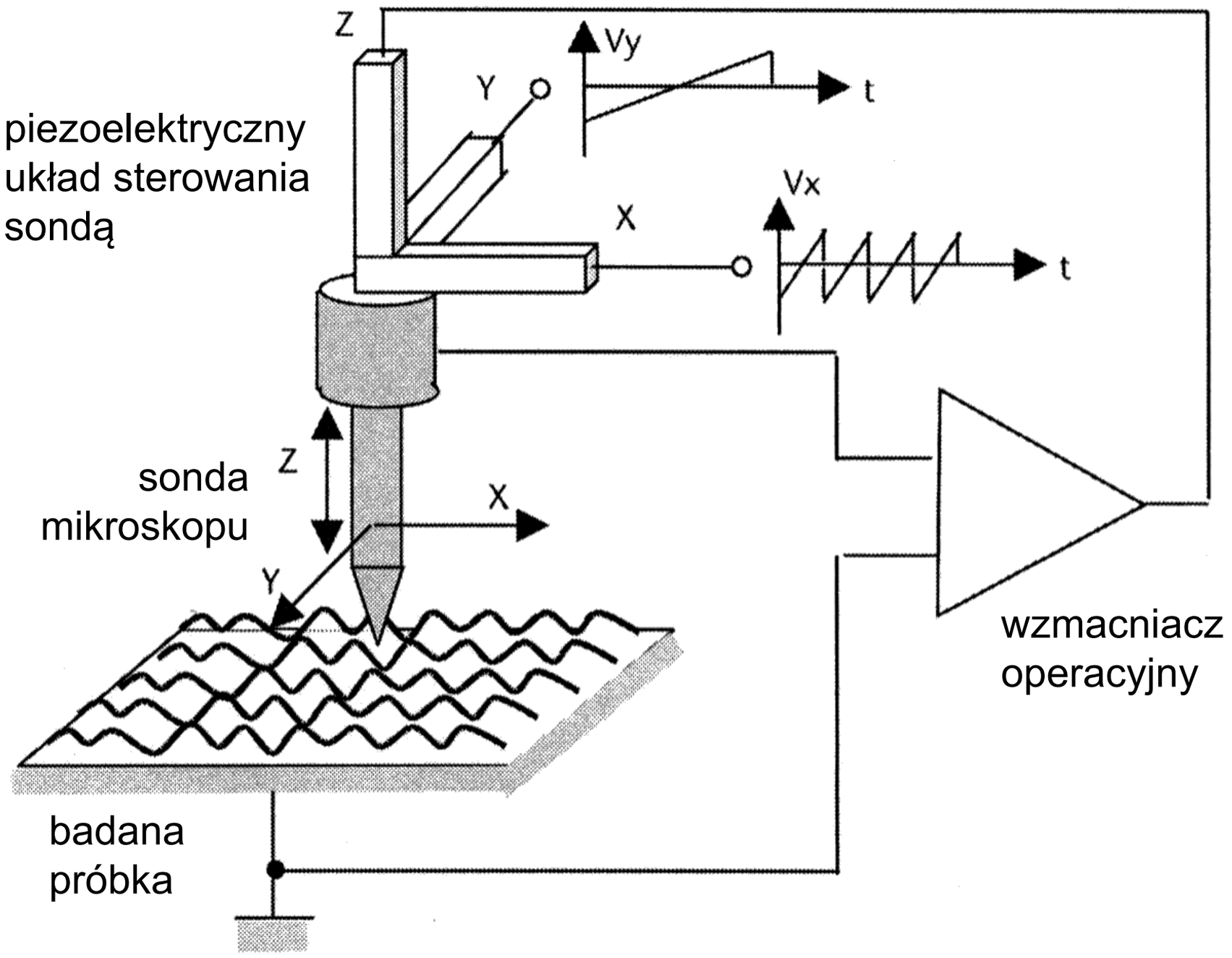
Epitaksja ze strumienia cząstek (MBE) i pokrewne (CVD)

- 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 ÷ 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,

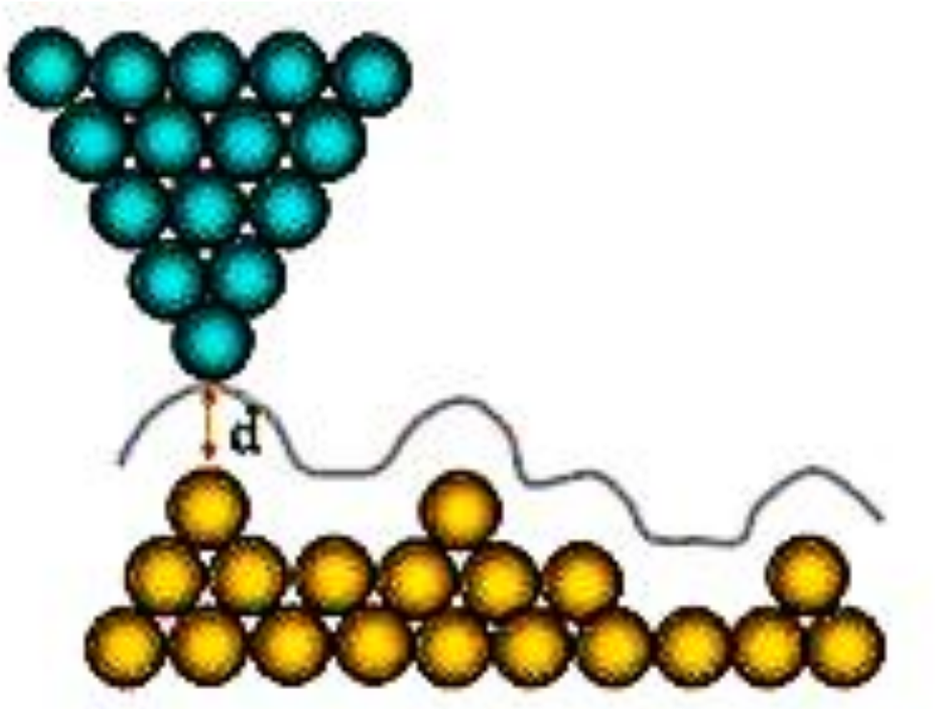
m - masa elektronu,

e - ładunek elektronu,

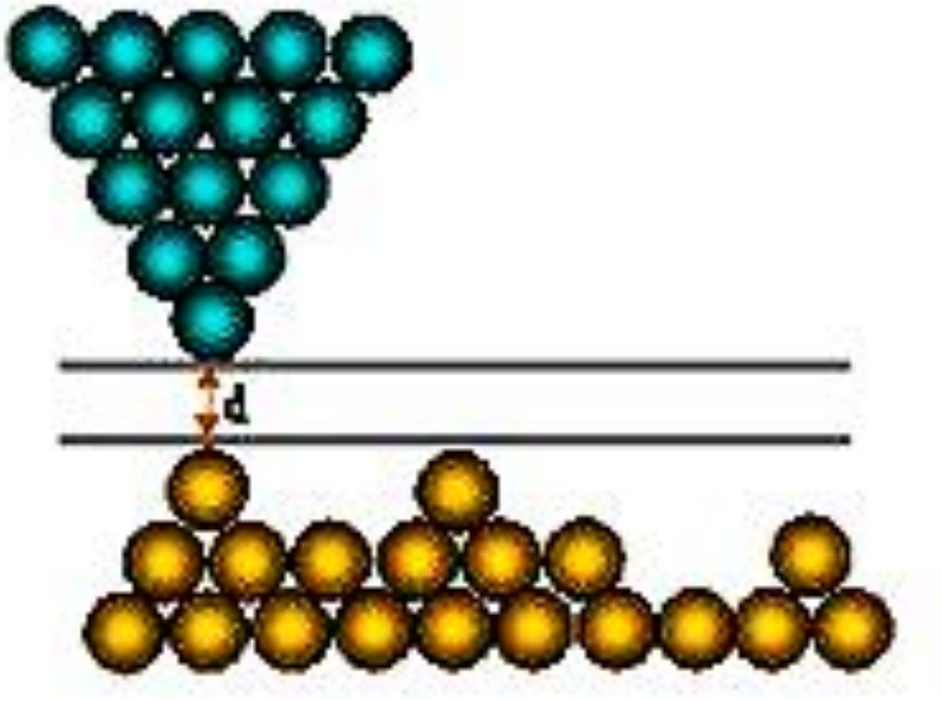
U - przyłożone napięcie,

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



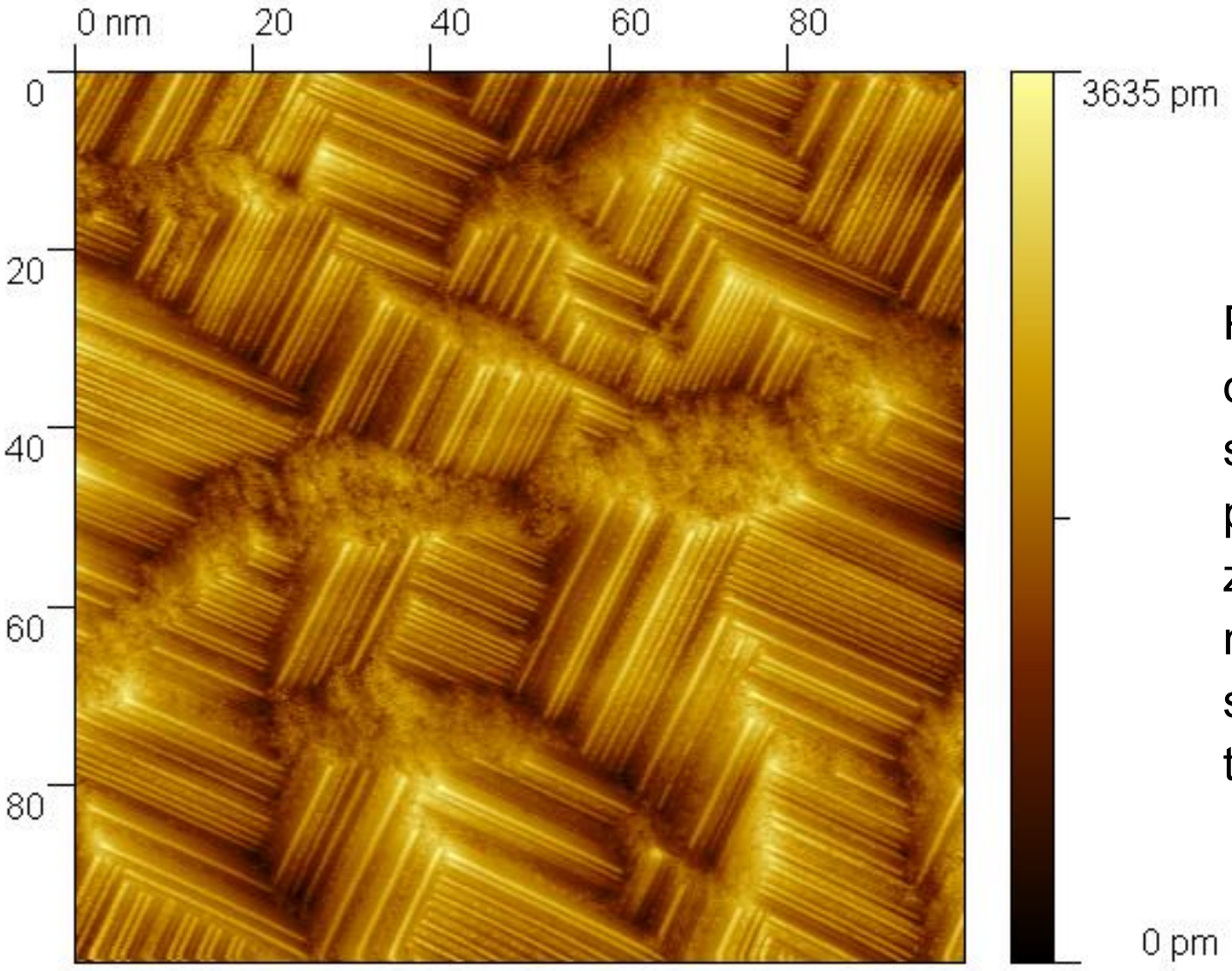
Zasada działania mikroskopu skaningowego tunelowego odwzorowującego strukturę powierzchniową przez pomiar prądu

Zdolność rozdzielcza metody STM osiąga:

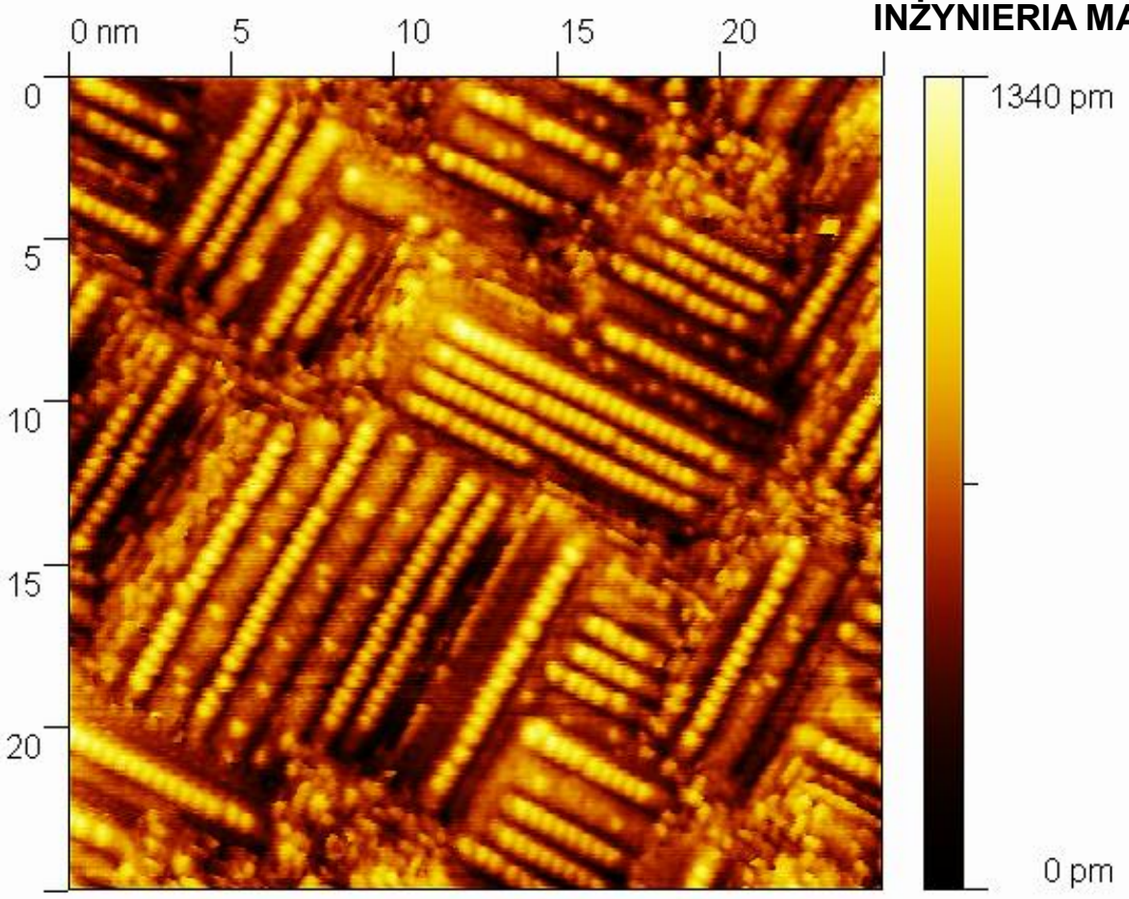
- pionowa: 0,01 ÷ 0,05 nm,
- pozioma: około 0,3 nm.

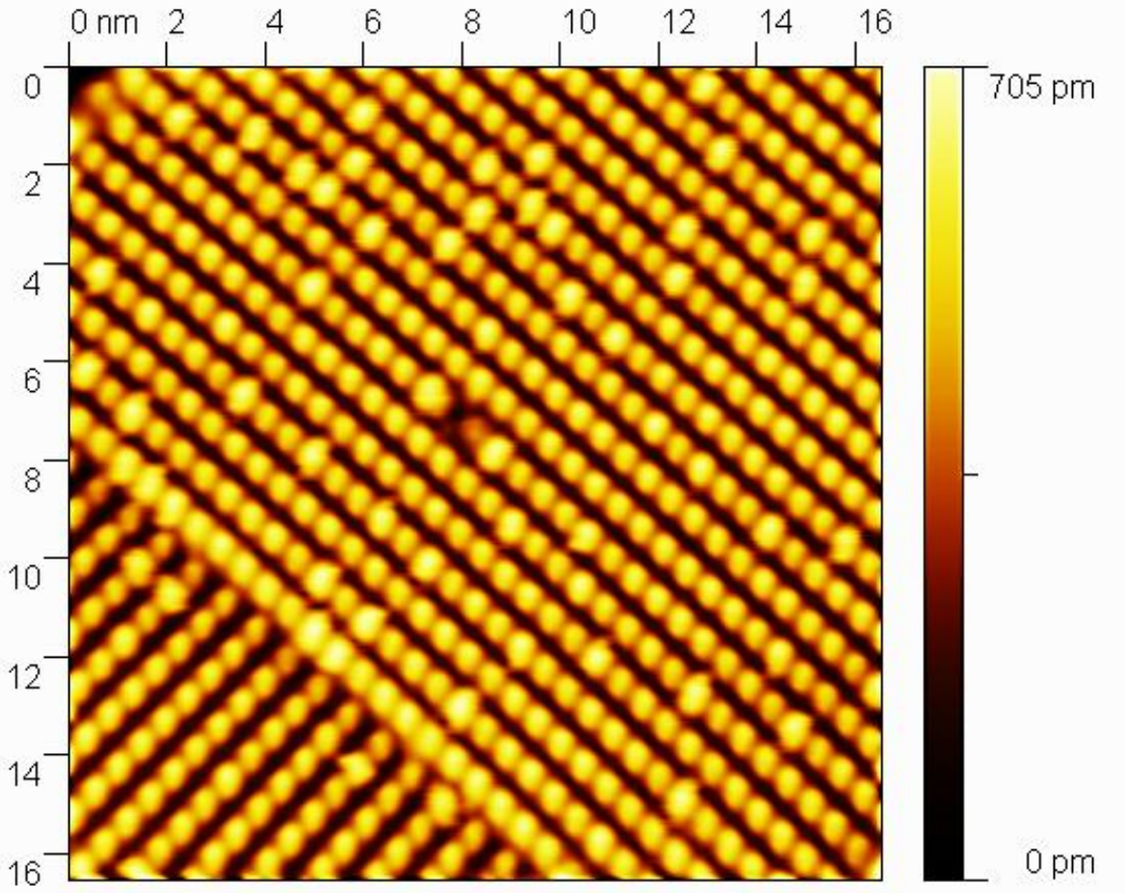
To pozwala „zaobserwować” rozmieszenie atomów na powierzchni i rozróżnić obszary o różnym składzie atomowym.

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



Przykład odwzorowania struktury powierzchniowej za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego

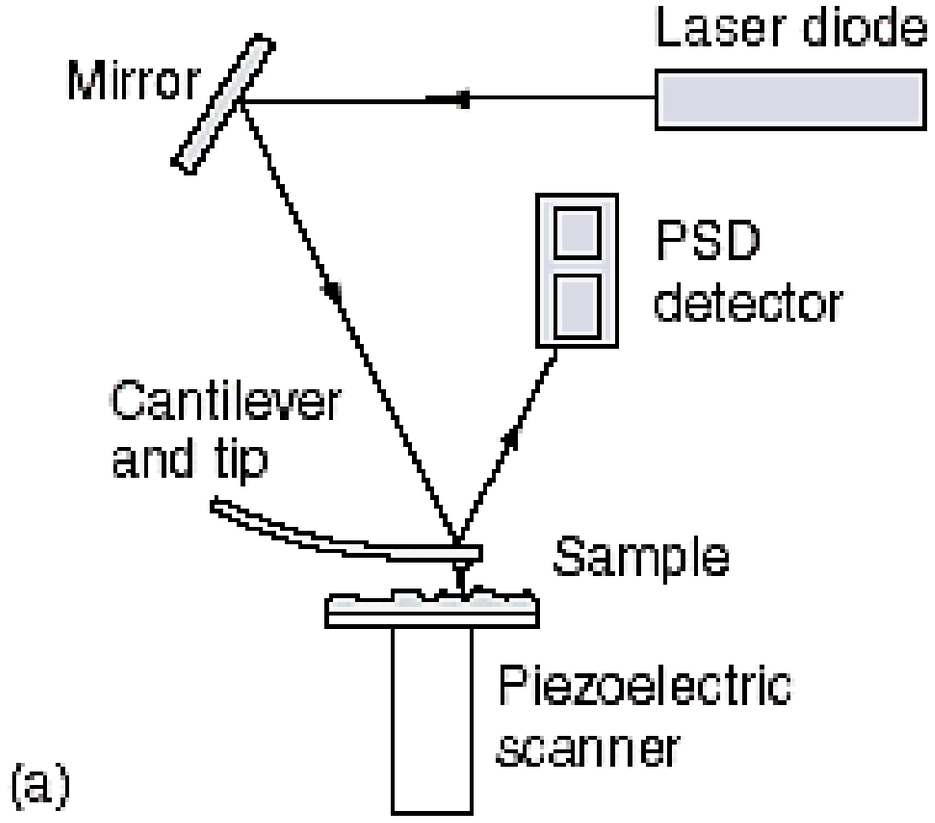


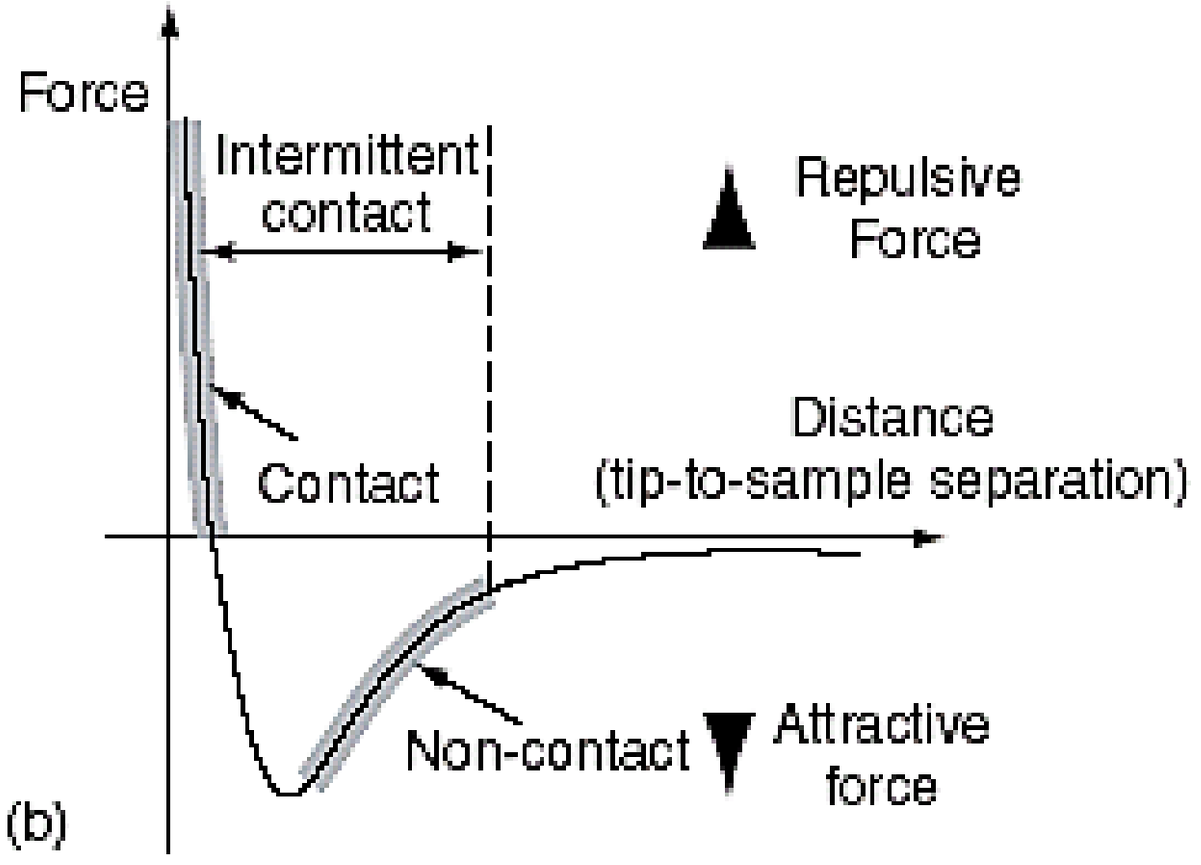


Przykłady odwzorowania struktury powierzchniowej za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego

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 μm,
- dźwignia ugina się w wyniku działania sił między sondą a badaną powierzchnią,
- koniec ostrza przesuwa 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 dźwignię AFM,



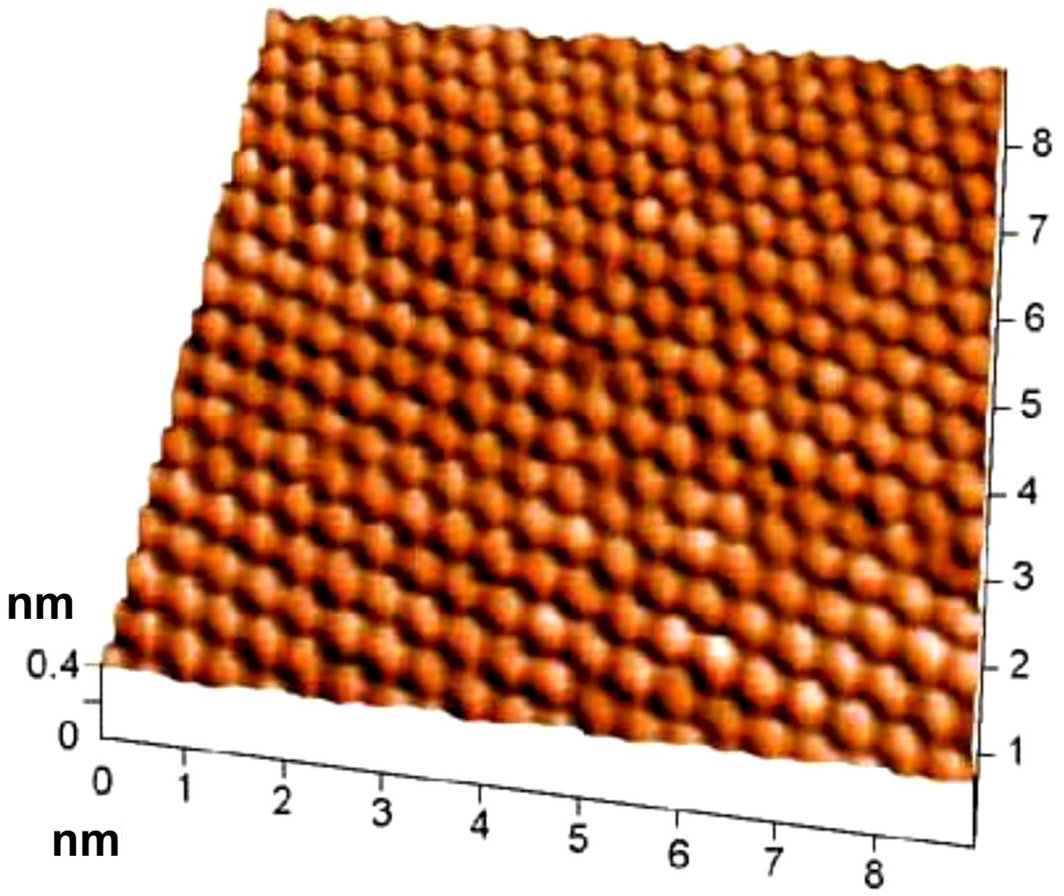


Mikroskop sił atomowych:

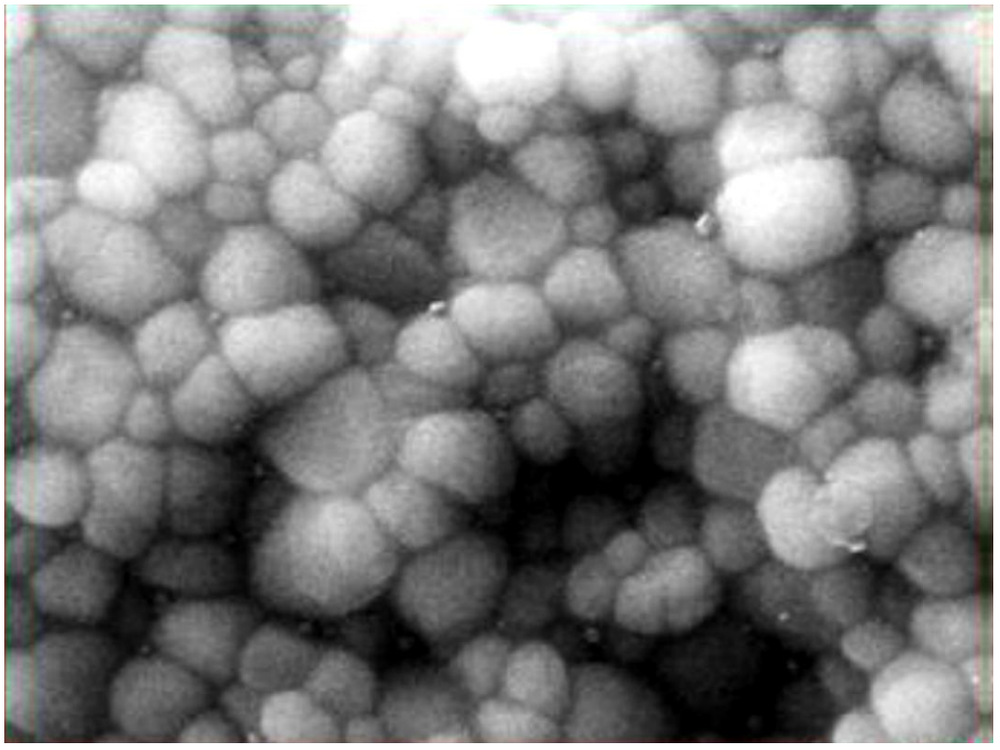
(a) schemat budowy

(b) wykres oddziaływania atomów ostrza i próbki

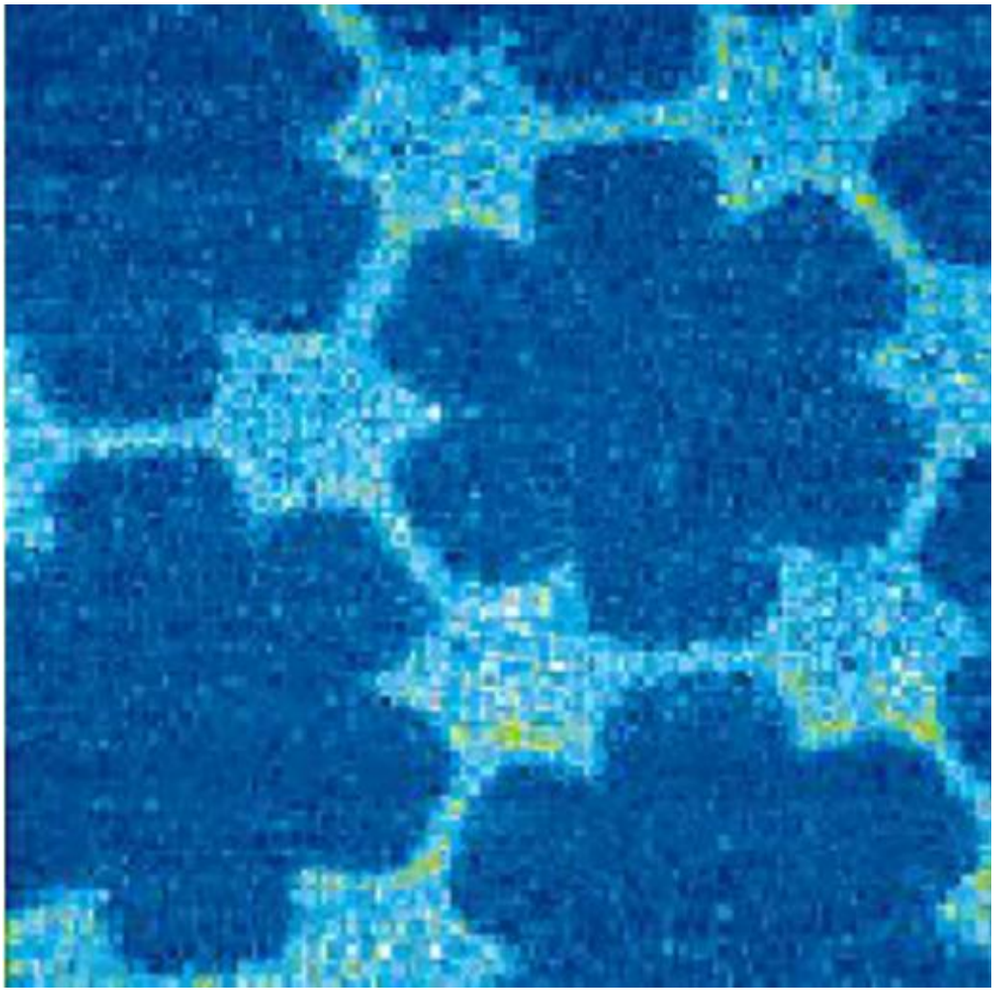
- dominujące są przyciągające oddziaływania van der Waalsa oraz odpychanie elektrostatyczne (rys. na poprzedniej stronie),
- gdy sonda znajduje się w odległości kilku dziesiątych nanometra od próbki działające na nią siły są siłami odpychającymi,
- ten efekt powstaje wskutek nakładania się chmur elektronowych atomów 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 $MoTe_2$



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 λ = 360 nm pozwala uzyskać rozdzielczość $\approx$ 1 μm,

- zastosowania promieni X jest zbyt skomplikowane i niebezpieczne,

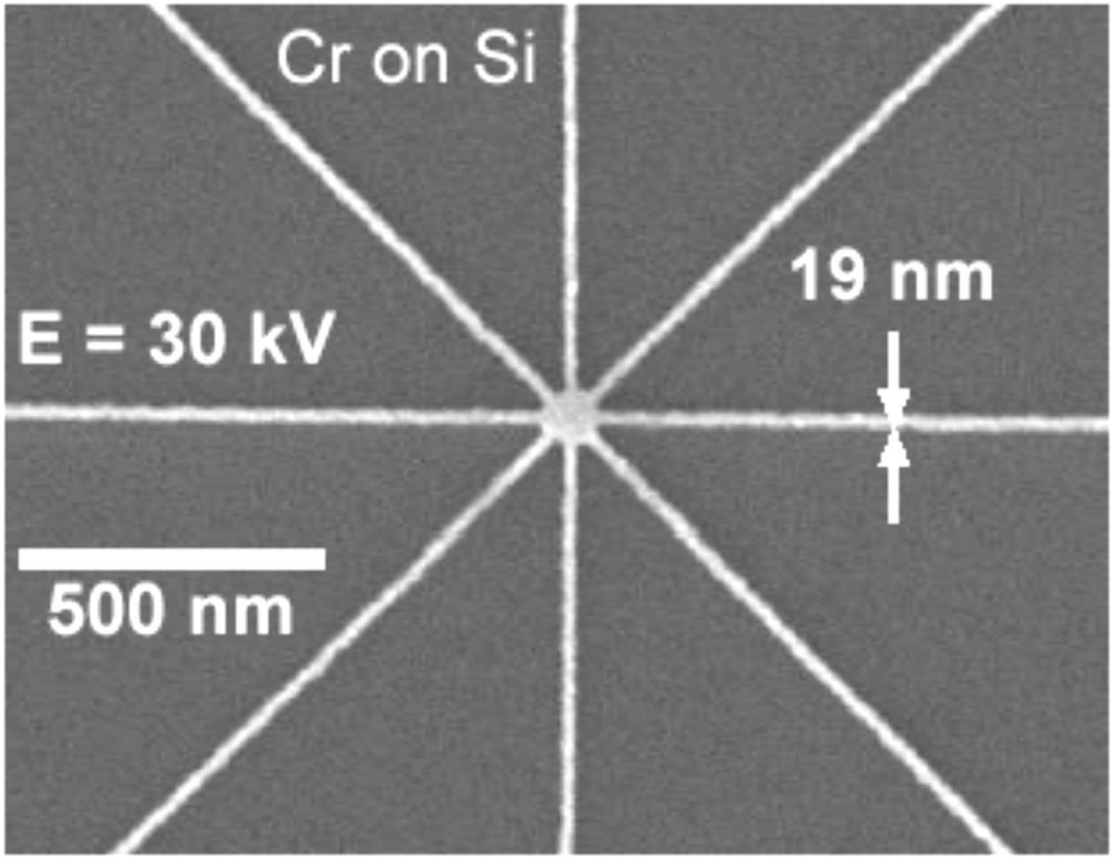
- strumień elektronów o energii 10 keV ma długość fali λ = 0,12 nm i pozwala uzyskać rozdzielczość 1...10 nm,

- litografia strumieniem elektronów wymaga próżni, co pozwala uniknąć zanieczyszczeń,

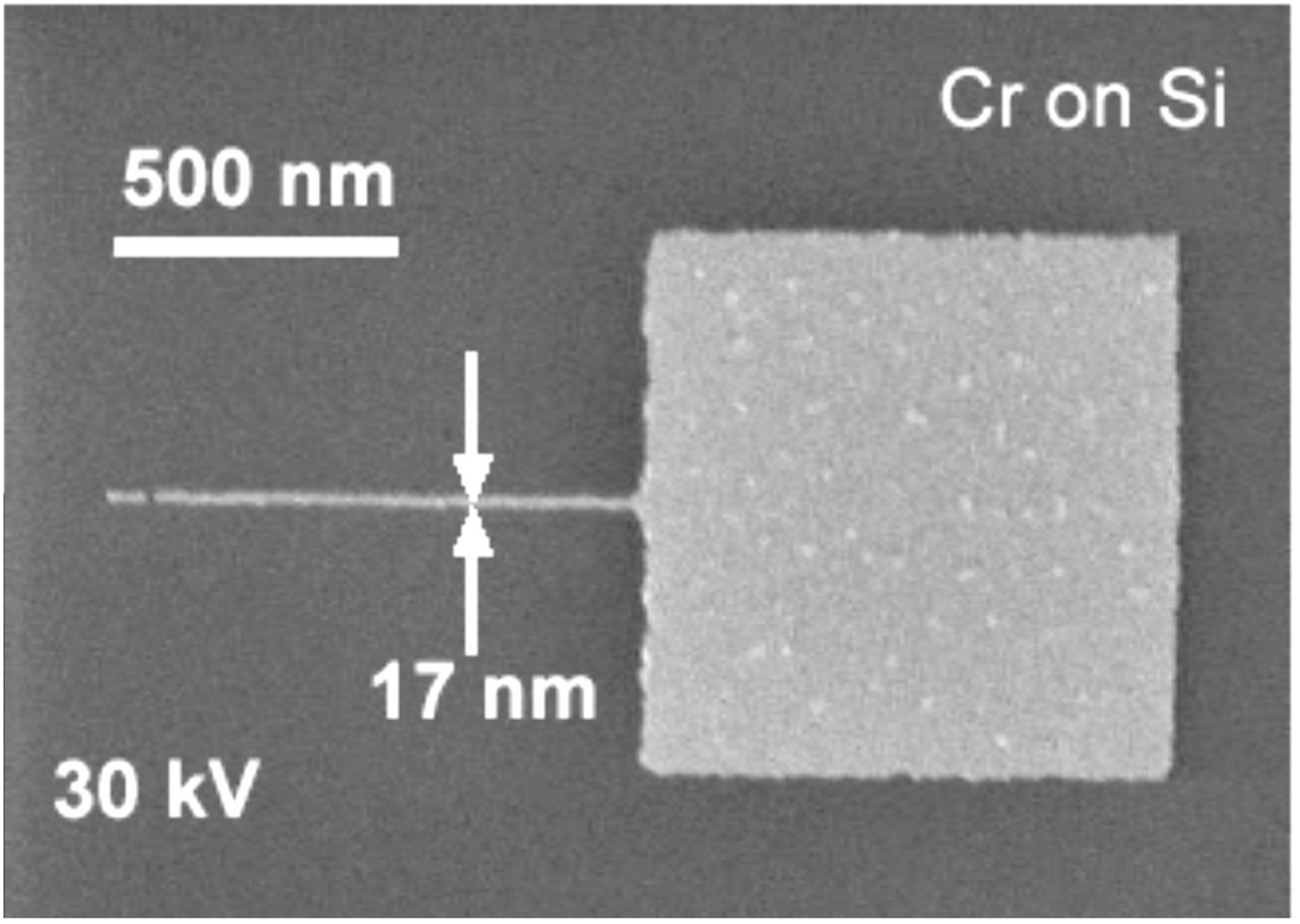
- litografię elektronową można prowadzić bez masek (sterowanie komputerowe strumieniem elektronów).

Parametry jednego z najnowszych urządzeń do litografii elektronowej:

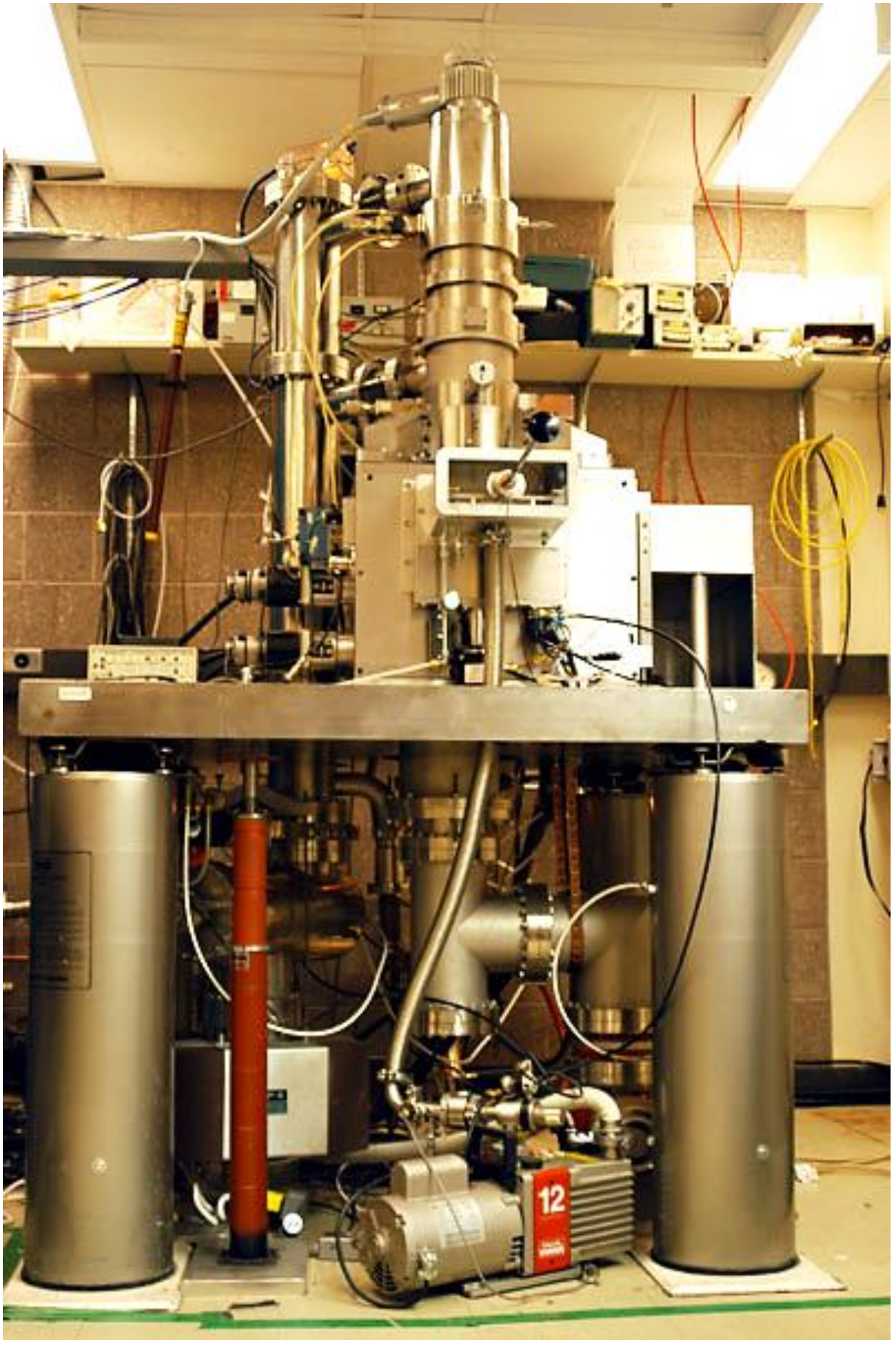
- napięcie przyspieszające: 1 – 30 kV,
- najmniejsza średnica strumienia elektronów: 3 nm,
- długość kroku przesuwu strumienia: 2 nm,
- prędkość przesuwu strumienia: 1 MHz,
- wymiary obrabianego pola: 50 – 300 μm,
- minimalna szerokość pojedynczej ścieżki: 17 nm.



Przykład zastosowania opisanej metody litografii elektronowej



Przykład zastosowania opisanej metody litografii elektronowej



Przykładowe nowoczesne urządzenie do litografii elektronowej