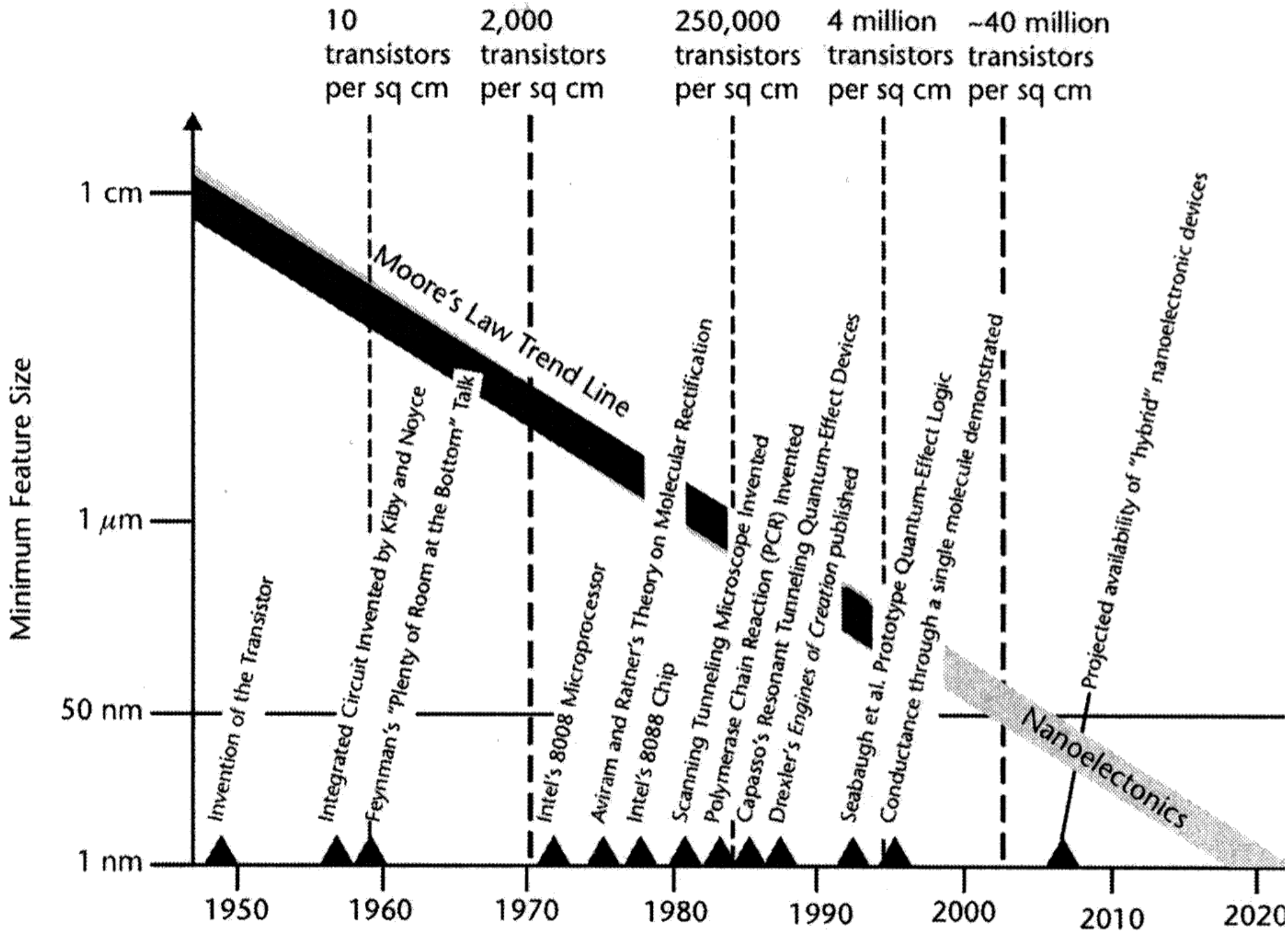
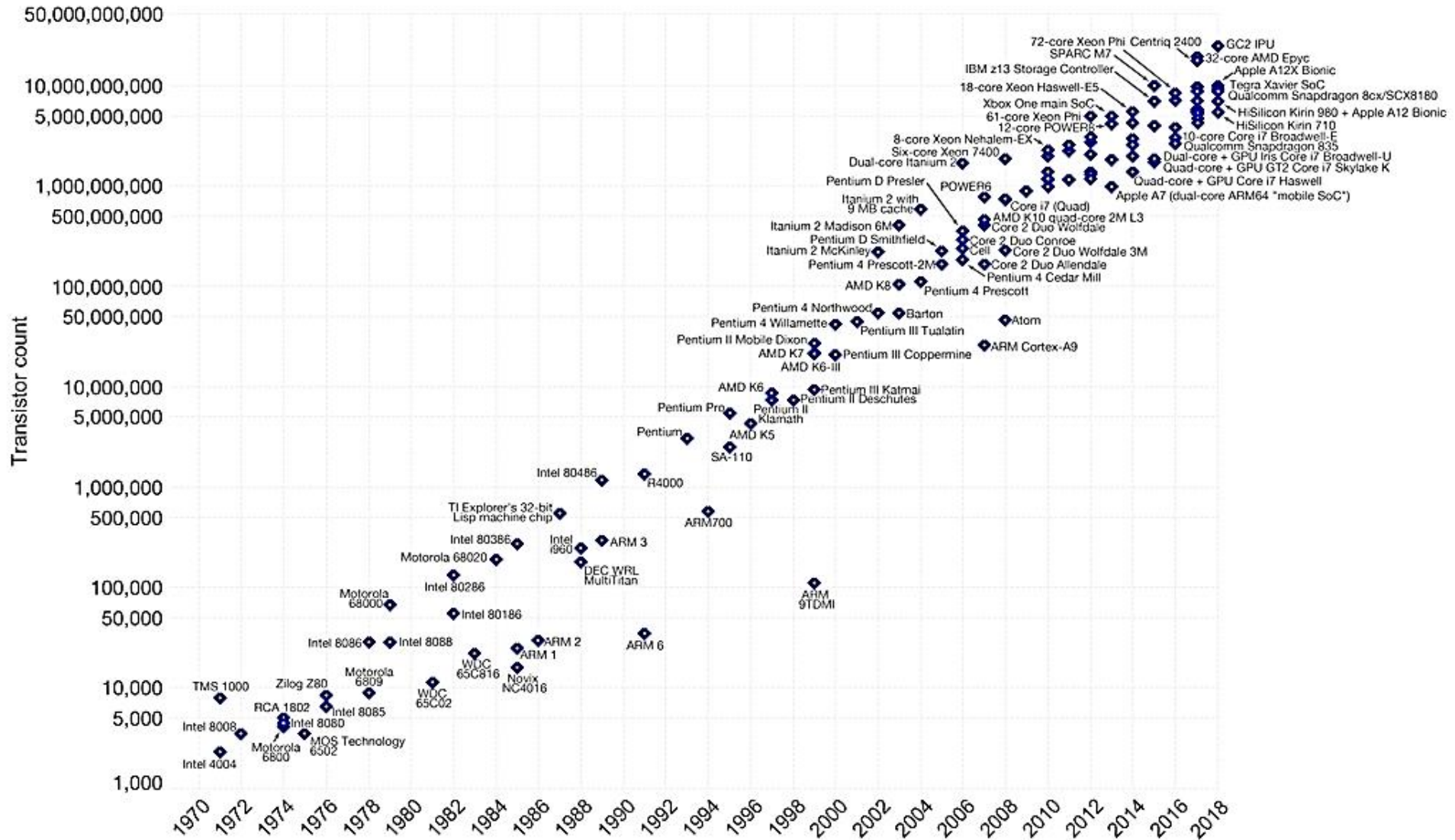


NANOTECHNOLOGIA

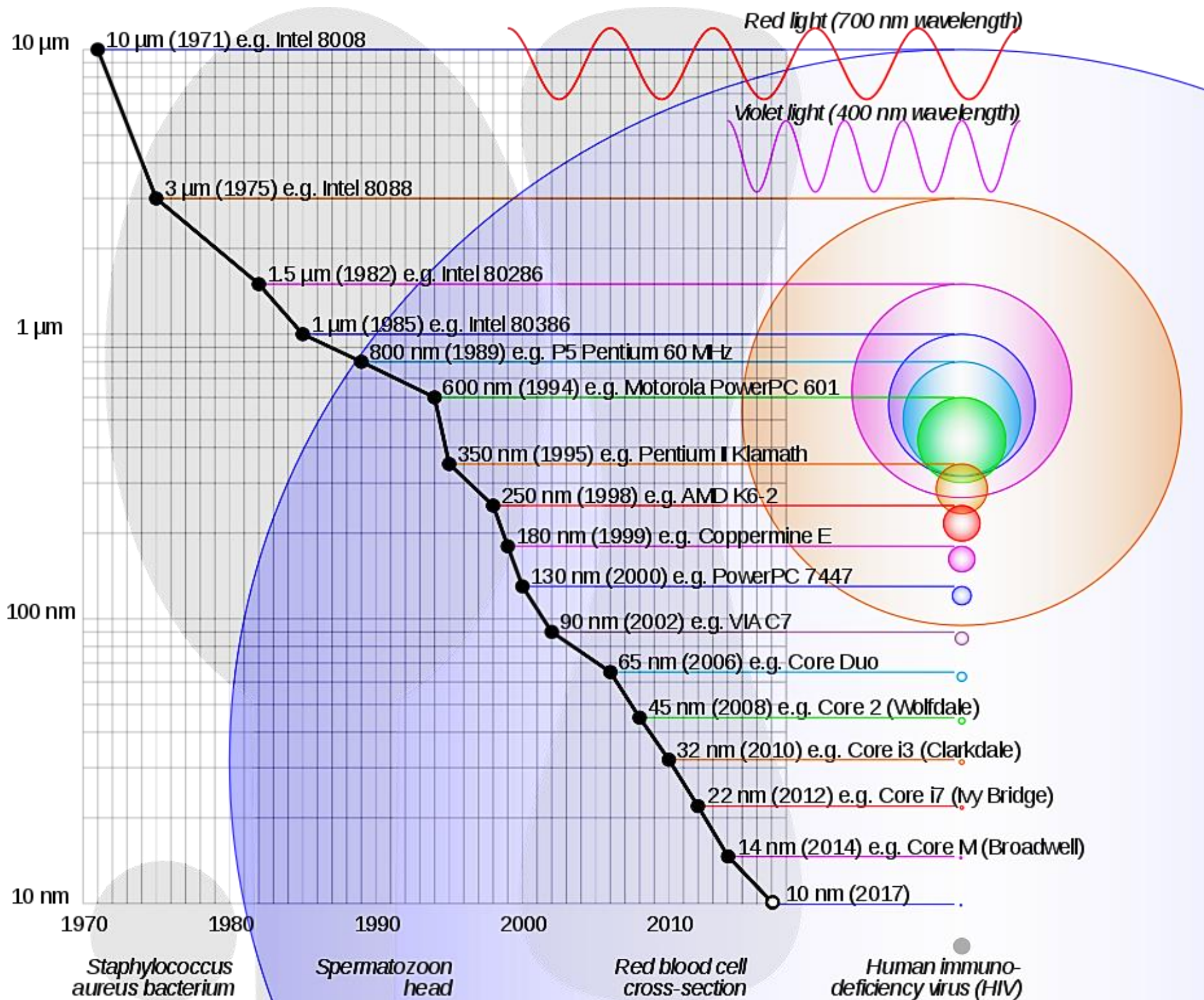


Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2018)

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are linked to Moore's law.



Przykładowe prawo Moore'a dla okresu 1971 - 2018



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:

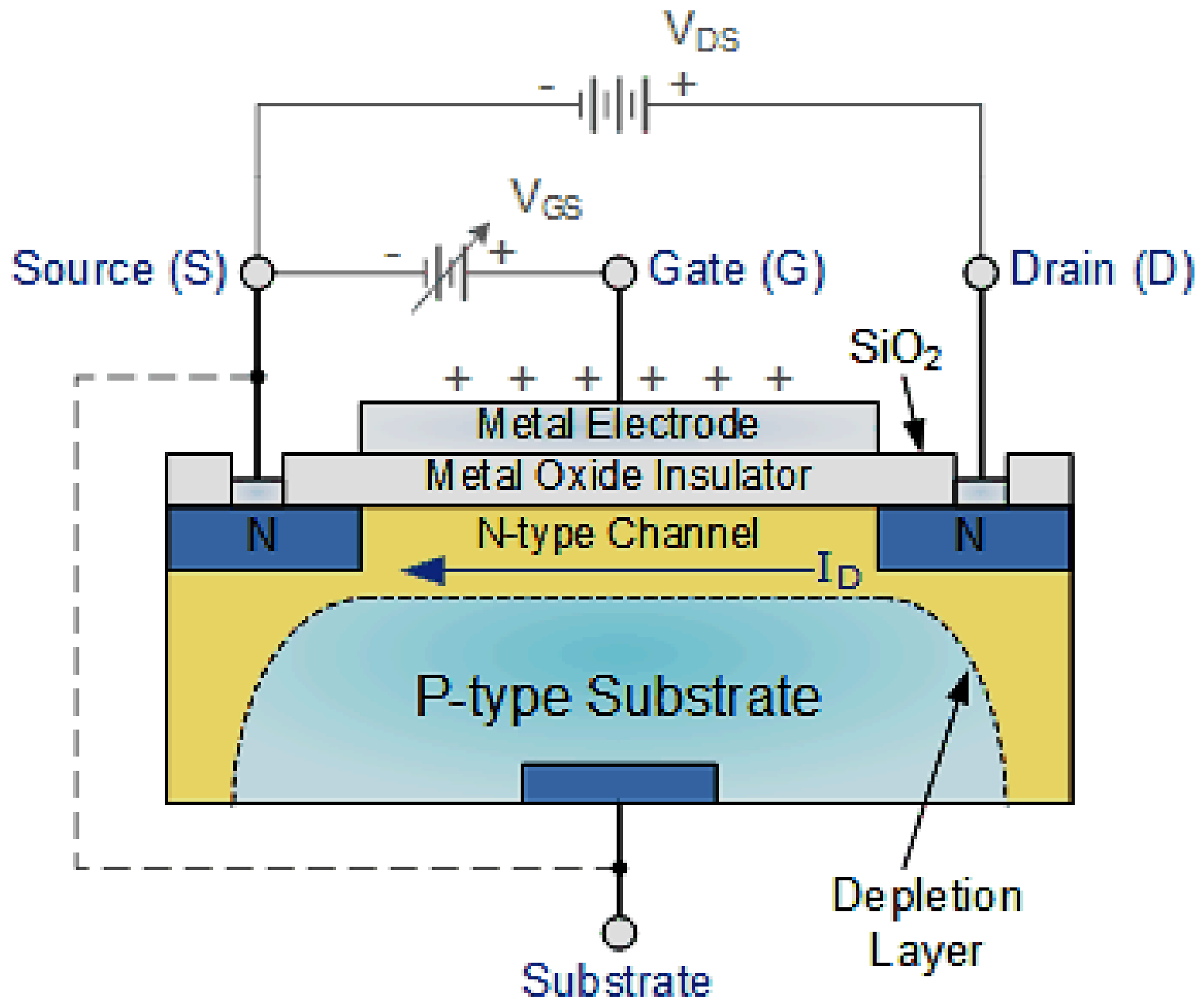
np. przekrój poprzeczny kanału tranzystora $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$, liczba atomów domieszki $\approx 500 \pm 50 \rightarrow$ rozrzut własności $\pm 10 \%$,

w 0,01 tego przekroju ($0,1 \mu\text{m} \times 0,1 \mu\text{m}$), liczba atomów domieszki $\approx 5 \pm 3 \rightarrow$ 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 $\rightarrow 10 \dots 100$ W (Pentium IV wytwarza 80 W),

przy mniejszej masie procesora lub większej liczbie tranzystorów, obecne systemy chłodzenia są nieskuteczne,



MOSFET - Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor

- 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),
- ograniczenie szybkości działania elementów półprzewodnikowych:
np. szybkość przełączania tranzystorów w procesorze zależy m.in. od ruchliwości elektronów w materiale, z którego je zrobiono.

Przykładowe elektroniczne nanoelementy kwantowe

- 1) oparte na rezonansowym zjawisku tunelowym (rezonansowa dioda tunelowa),
- 2) wykorzystujące pojedyncze elektrony (tranzystory jednoelektronowe).

Zastosowanie kropki kwantowej do budowy nanoelementów elektronicznych.

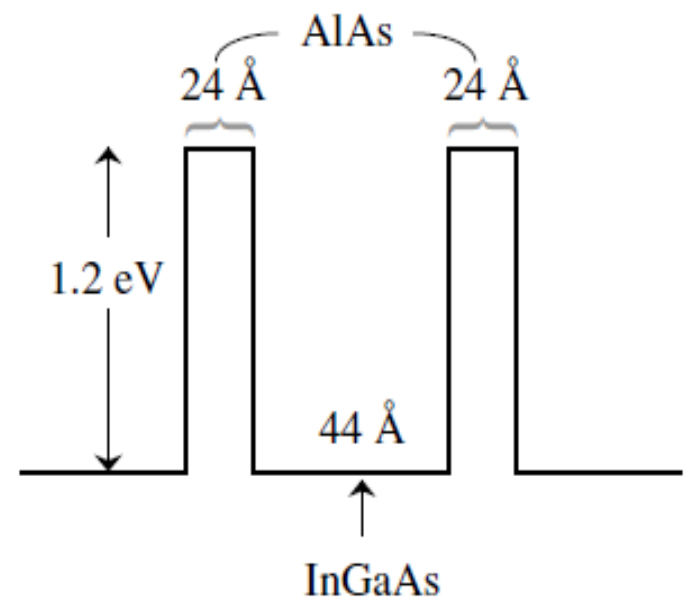
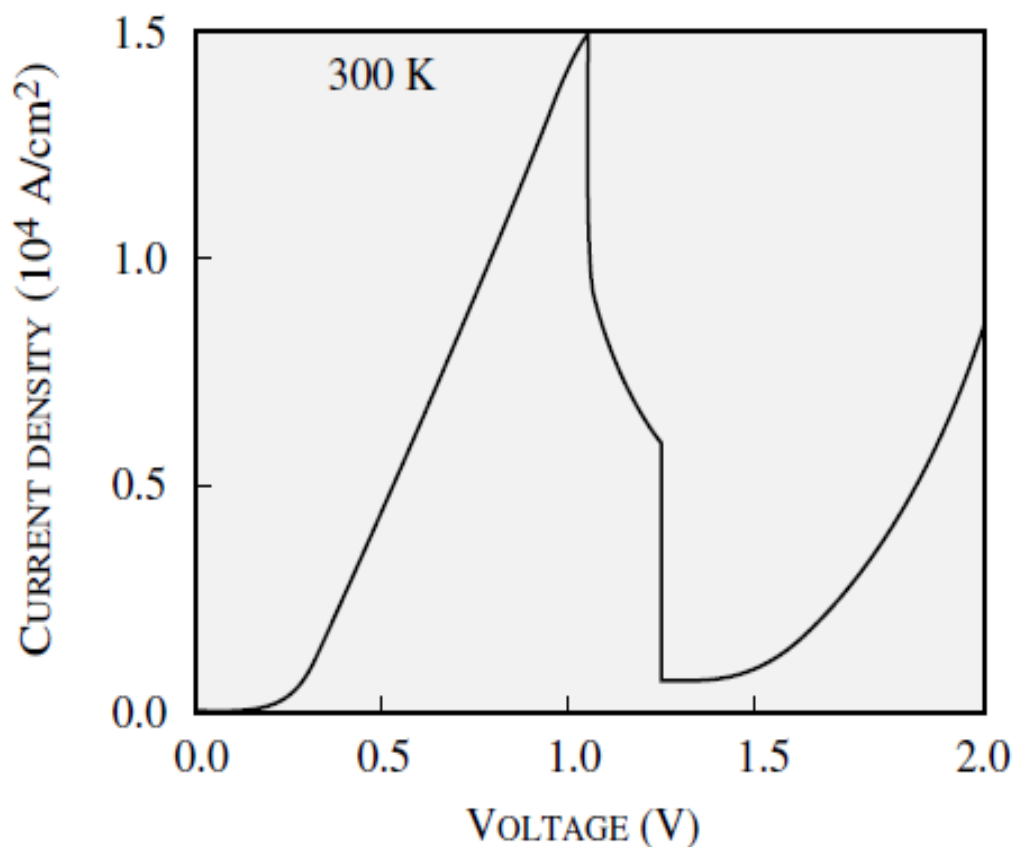
Rezonansowa dioda tunelowa

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.



Z praktycznego punktu widzenia najważniejszą rolę odgrywa obszar charakterystyki prądowo-napięciowej, w którym obserwuje się ujemny opór różniczkowy.

Istnienie tego oporu pozwala wykorzystać struktury rezonansowe do generacji i wzmacniania mikrofal, w zakresie częstotliwości nawet rzędu 10^{12} Hz.

Ważną zaletą struktur rezonansowych jest szybkość ich działania, co jest związane z szybkością procesu tunelowania.

Na przykład czas rezonansowego tunelowania elektronu przez strukturę rezonansową o szerokości 100 nm wynosi około 10^{-12} s.

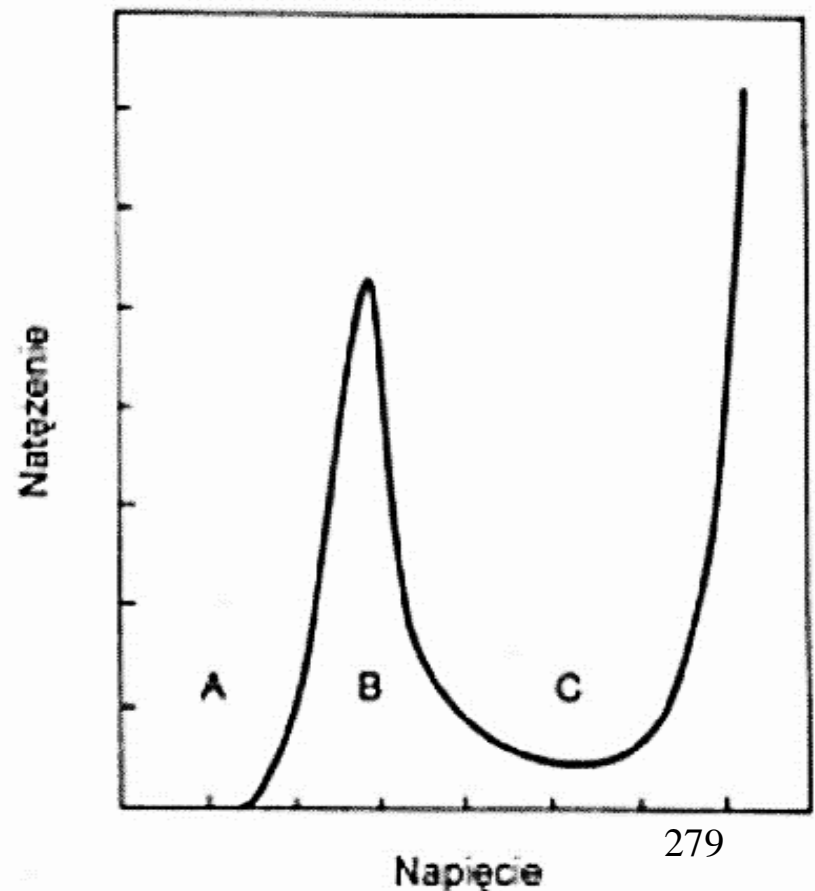
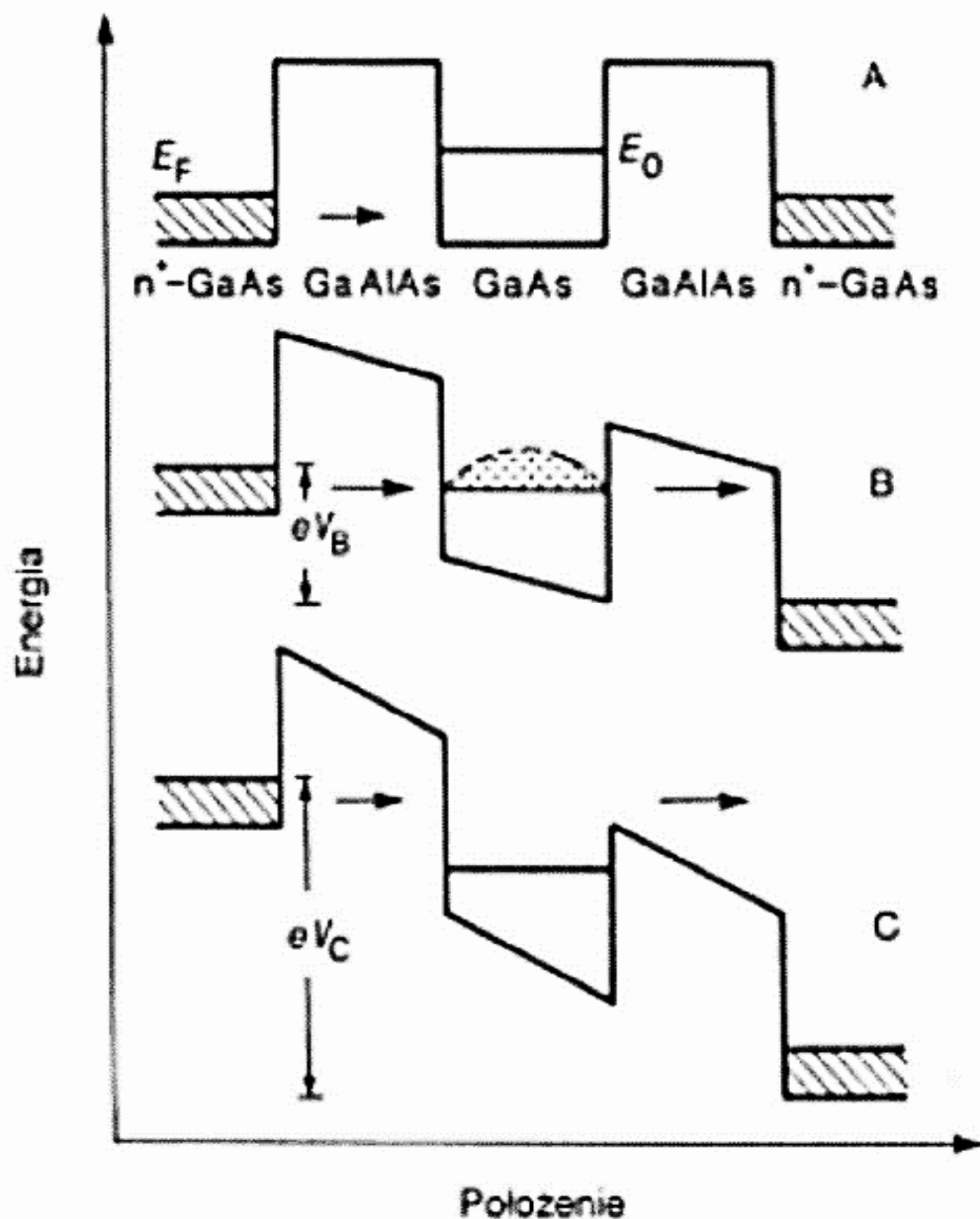
Przy zerowym napięciu prąd nie płynie, ponieważ dozwolony poziom w studni potencjalnej leży wyżej niż poziom Fermiego. półprzewodnika typu.

Przy zwiększaniu napięcia poziom E_0 przesuwa się w dół, co powoduje wzrost tunelowania elektronów i wzrost wartości prądu.

W punkcie B poziom Fermiego pokrywa się z poziomem E_0 (występuje rezonans) i przez strukturę płynie prąd maksymalny.

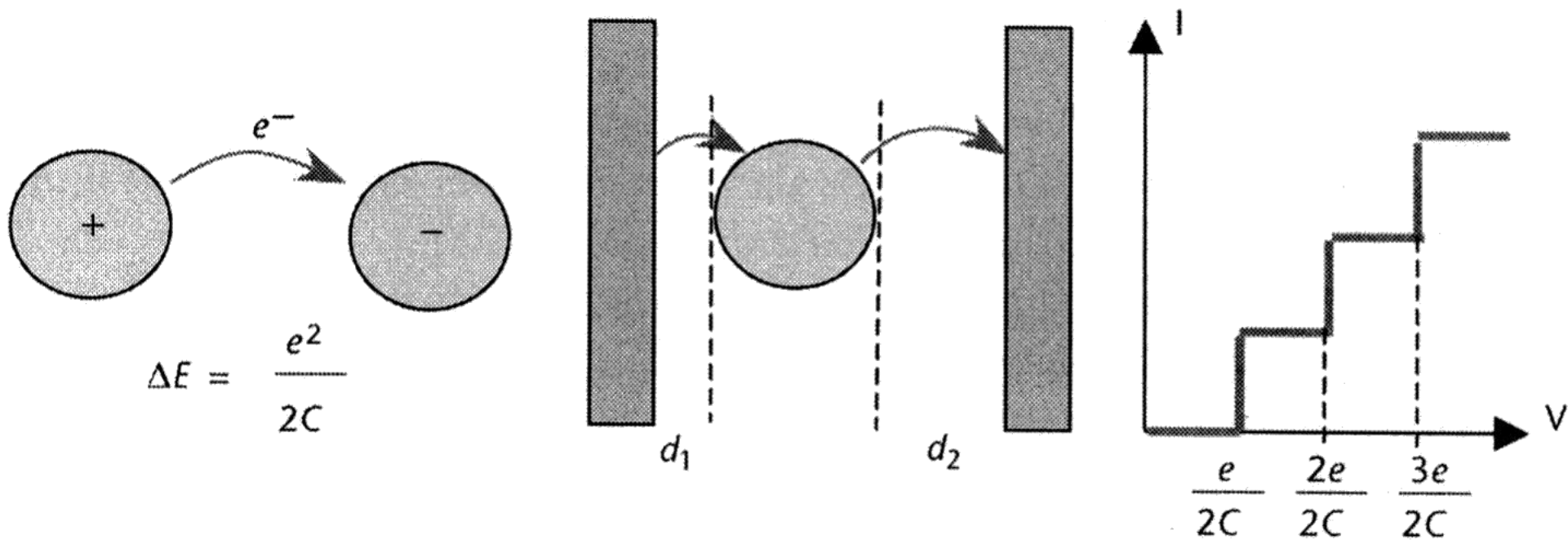
Zwiększenie napięcia (punkt C), powoduje, że wszystkie elektrony wychodzą z obszaru rezonansowego. Natężenie prądu zmniejsza się przy rosnącym napięciu (ujemna rezystancja różniczkowa).

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 tunelowy 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 dostarczenia mu dość dużej energii ΔE , większej od jego energii termicznej:

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

- 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:

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

gdzie: k - stała Boltzmann [J/K].

Warunek przekroczenia blokady Coulomba:

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

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

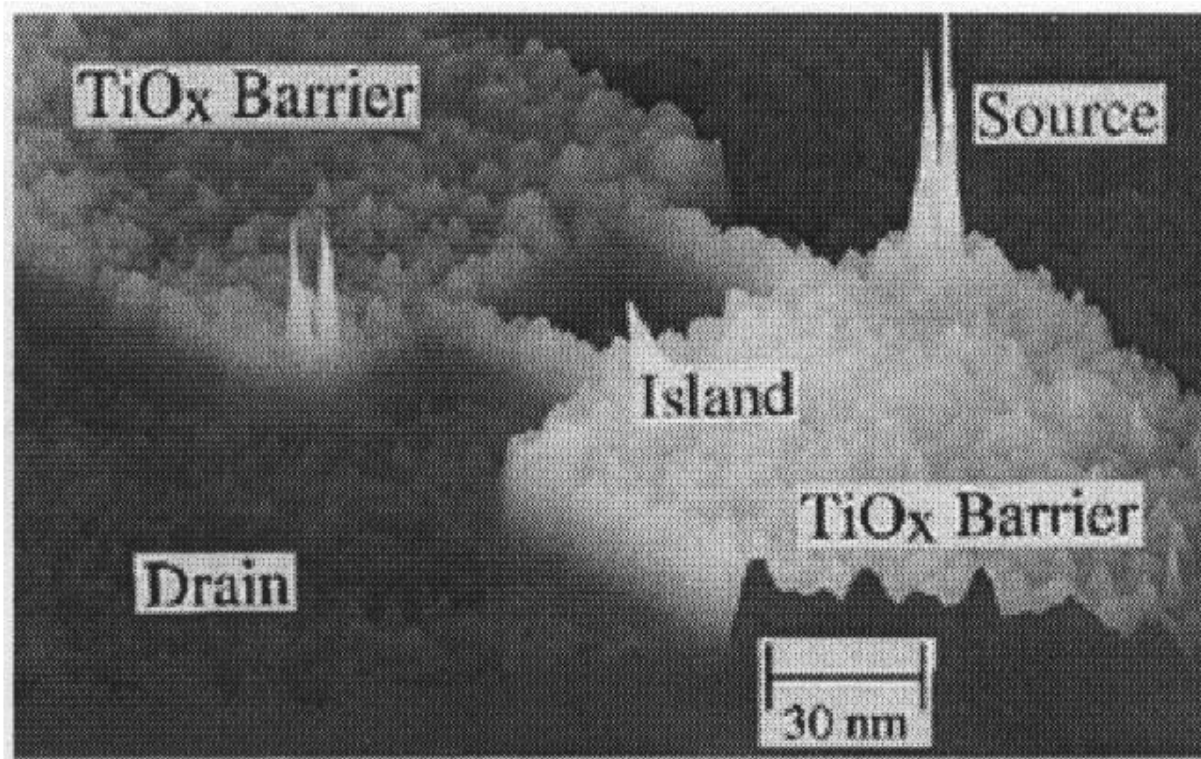
Stąd:

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

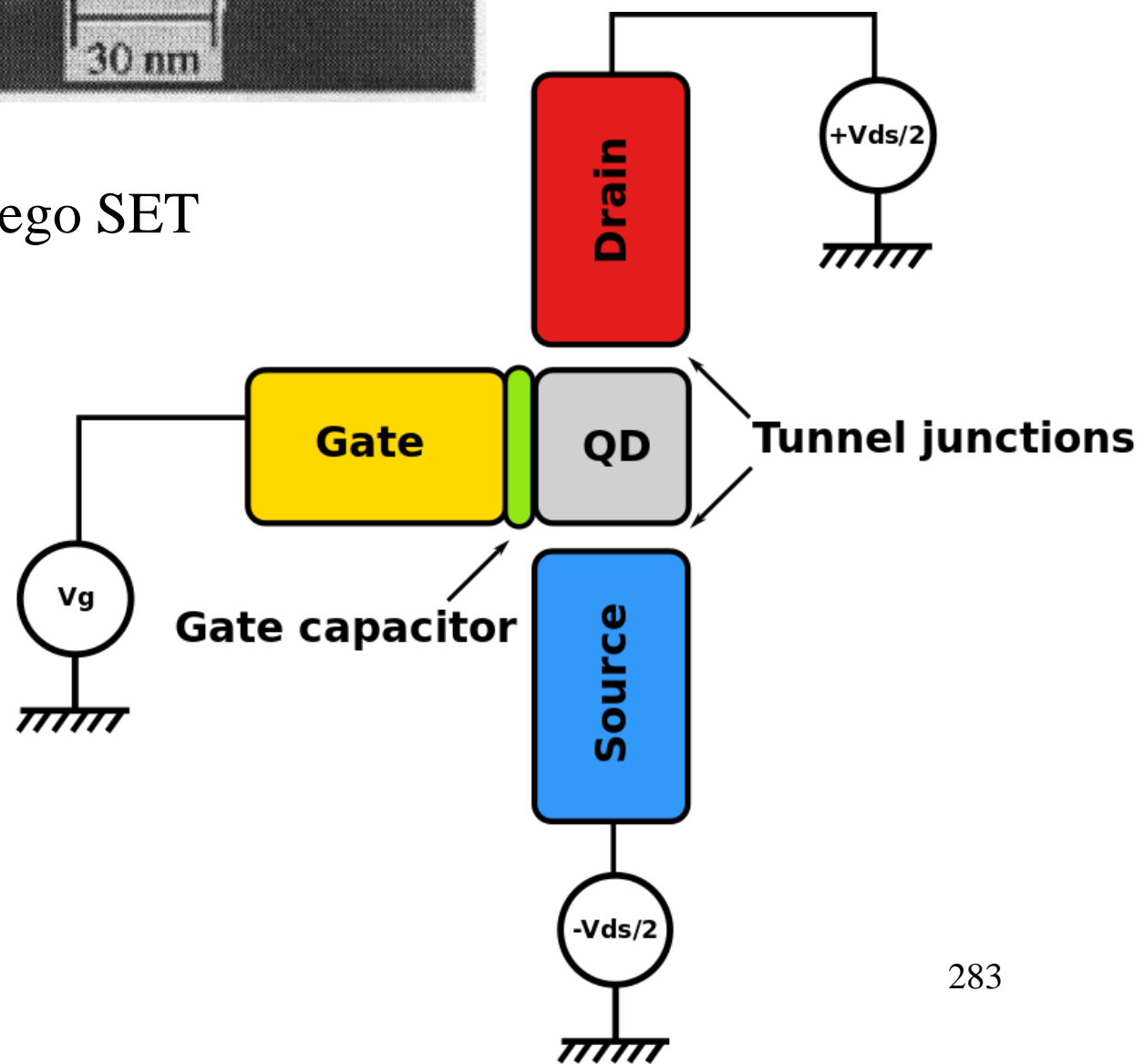
$$C \leq \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ F} \approx 2 \text{ aF}$$

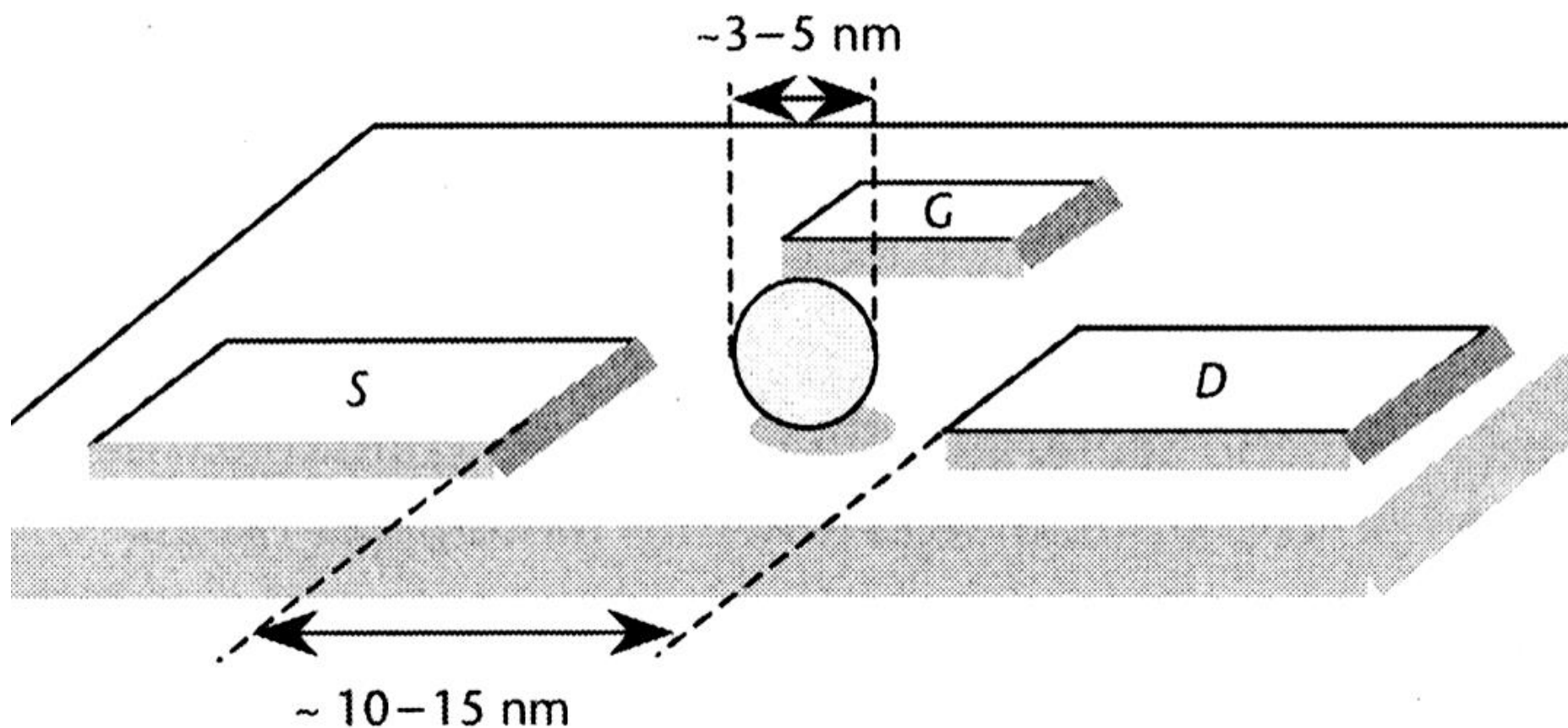
Napięcie spełniające warunek Coulomba:

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

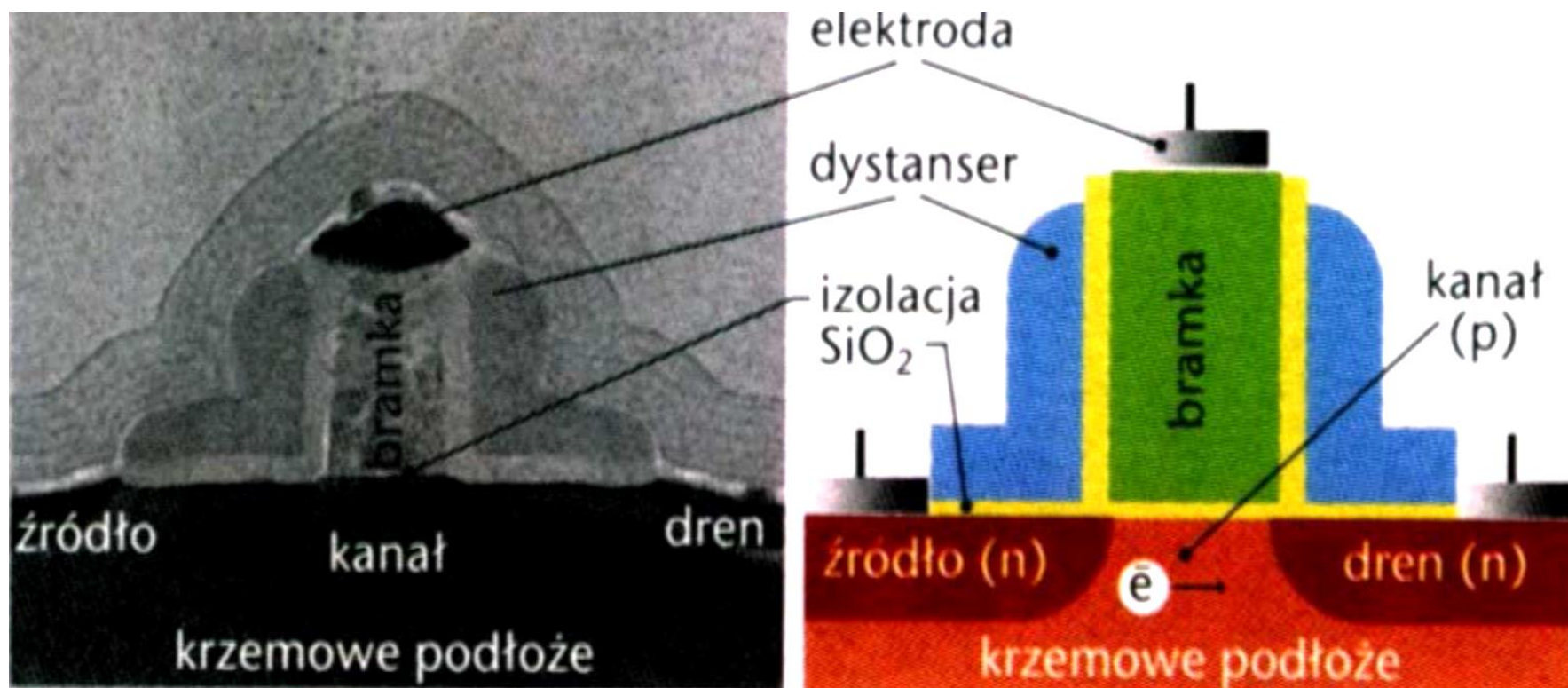
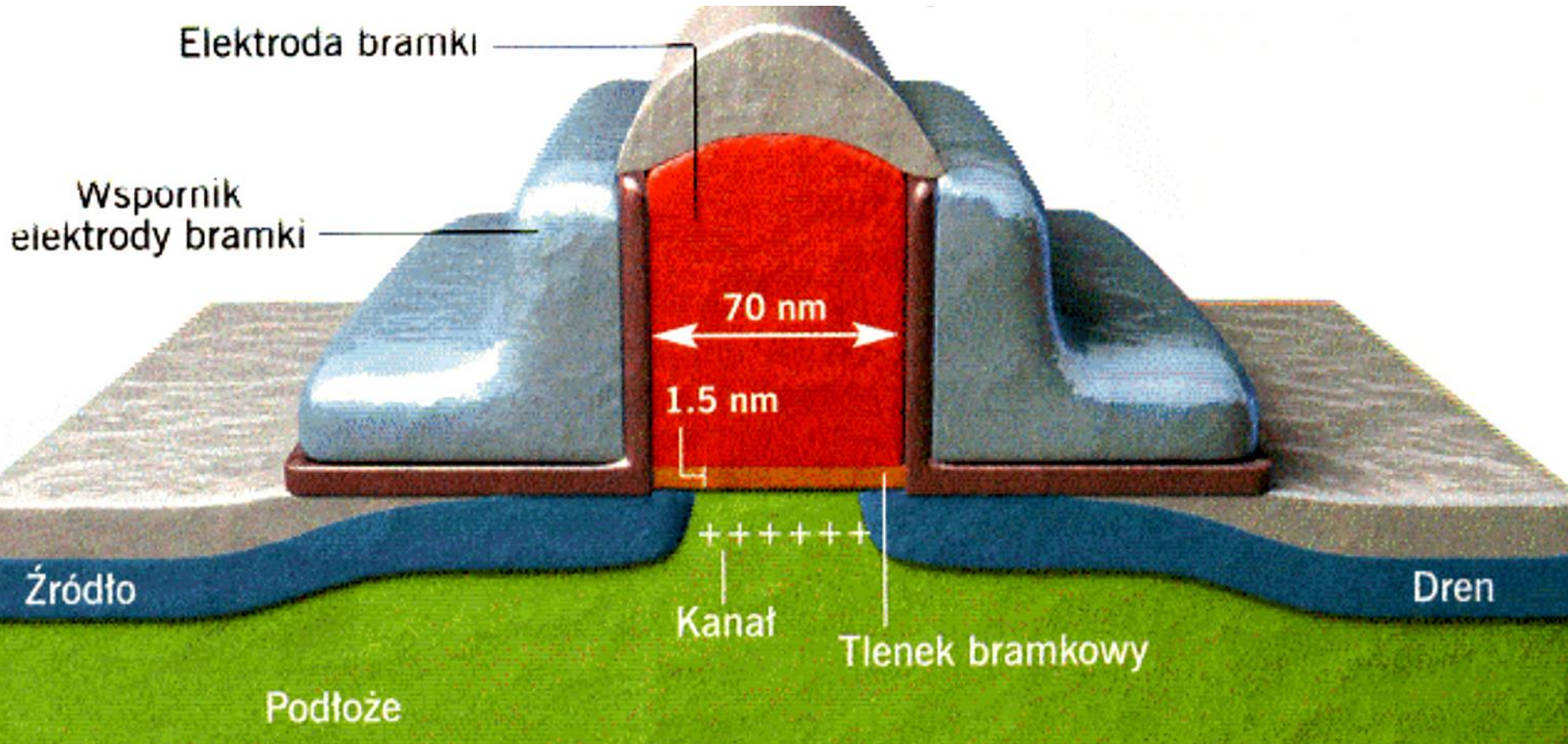


Obraz STM rzeczywistego SET
i jego schemat





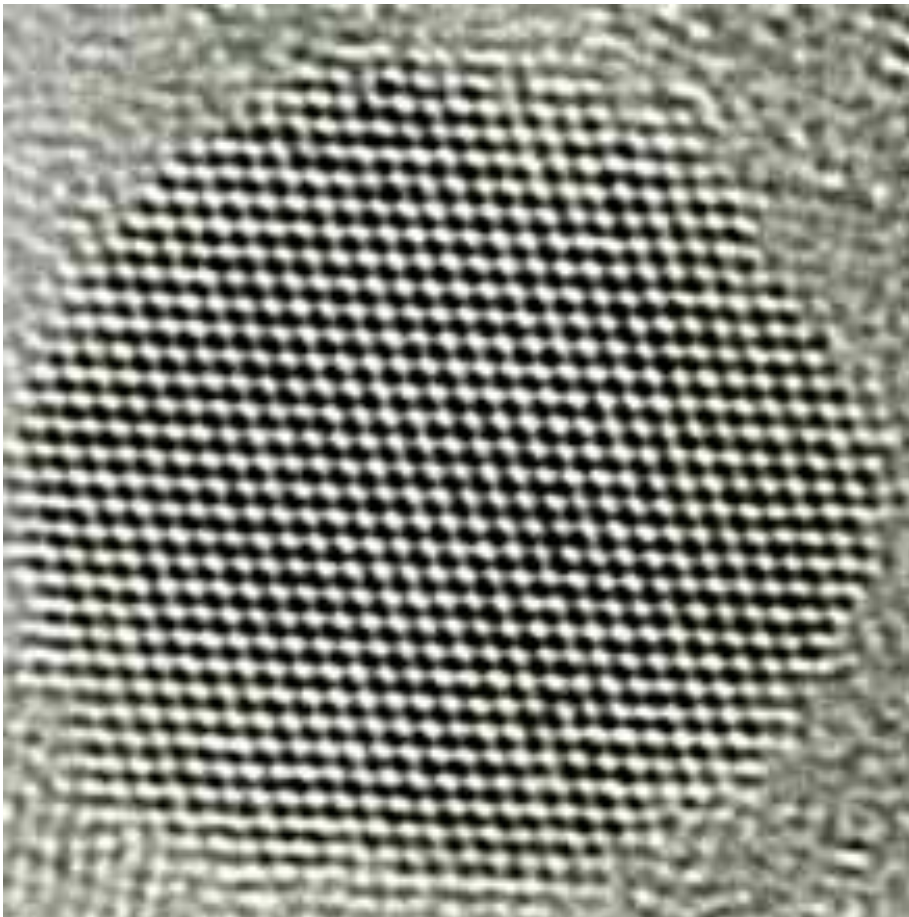
Schemat tranzystora jednoelektronowego z nanocząsteczką CdS uwięzioną w filmie kwasu tłuszczowego w planarnym złączu tunelowym



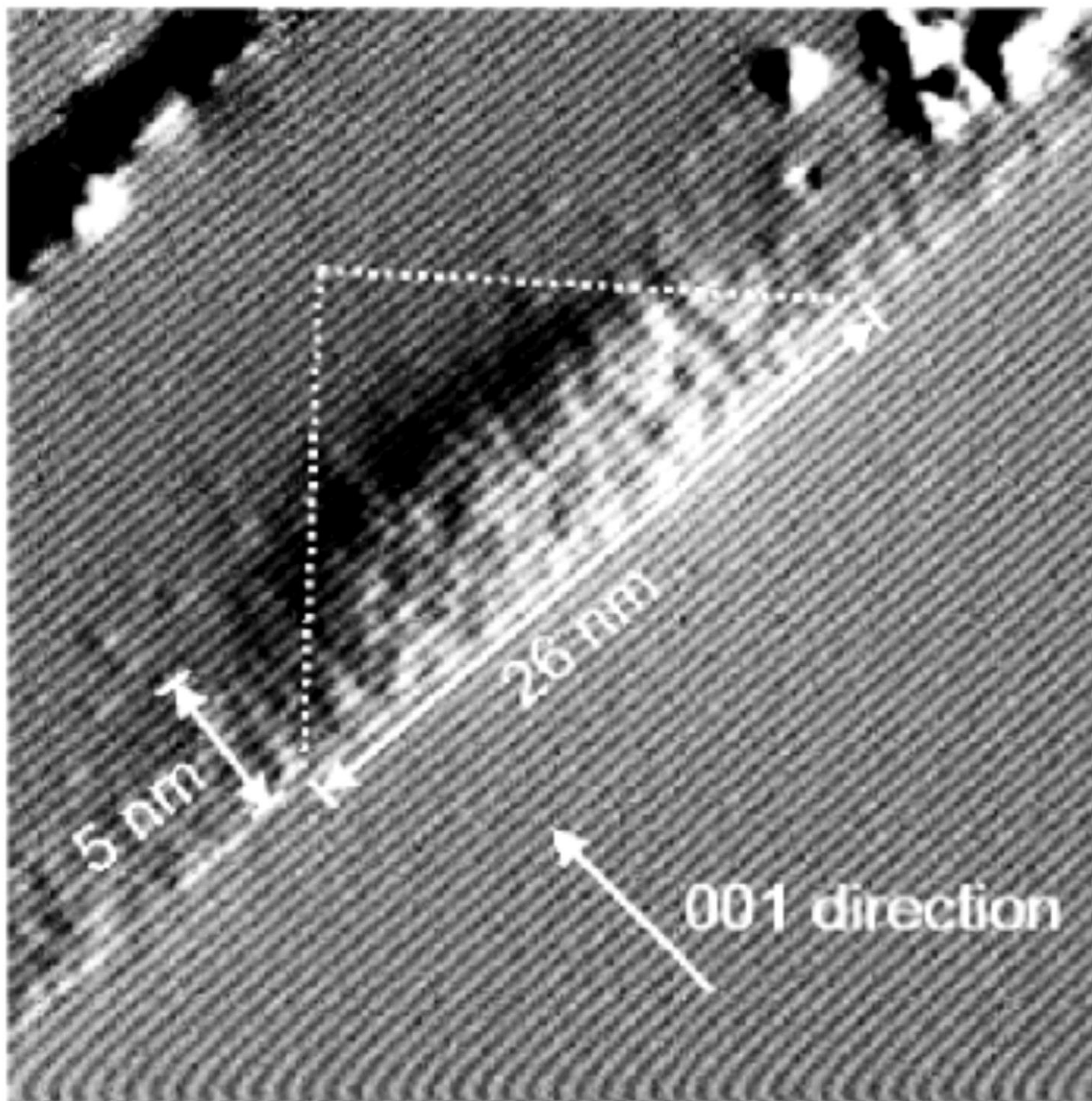
Technologie MOSFET 70 nm i 32 nm

Kropka kwantowa

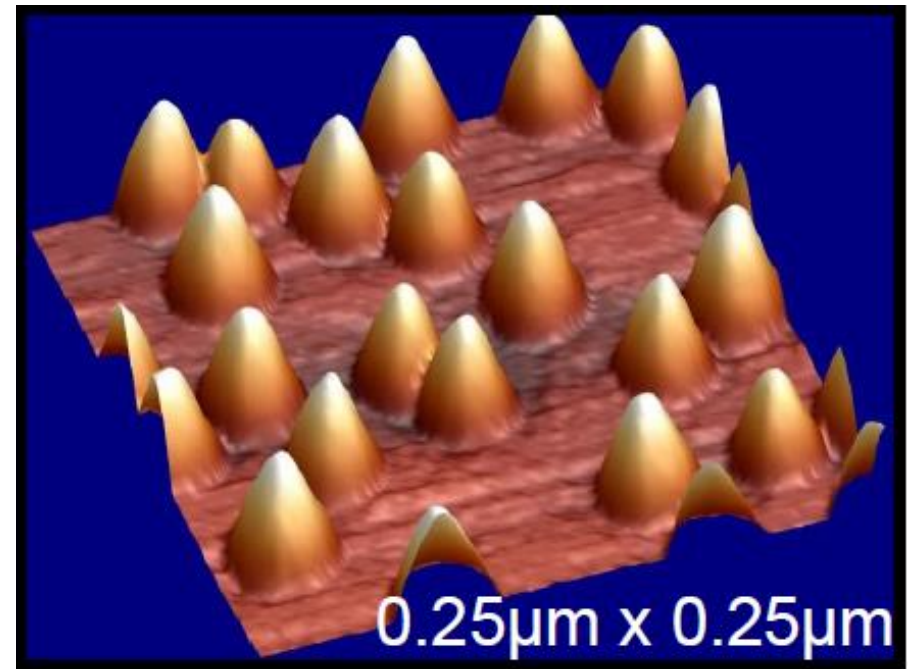
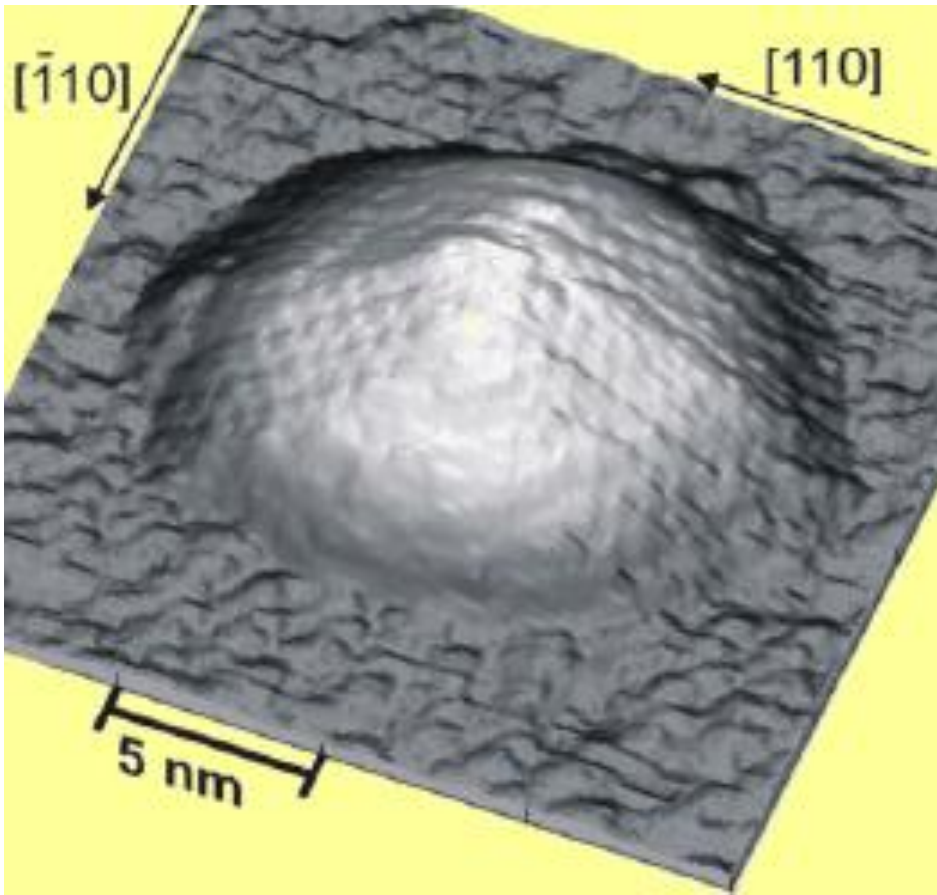
- niewielki rejon przestrzeni ograniczony w 3 wymiarach barierami potencjału, wewnątrz spułapkowana cząstka (elektron) o długości fali porównywalnej z rozmiarami kropki,
- nanocząstka odseparowana od otoczenia, uwięzione w niej elektrony mają określone poziomy energetyczne,
- system obliczeń kwantowych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



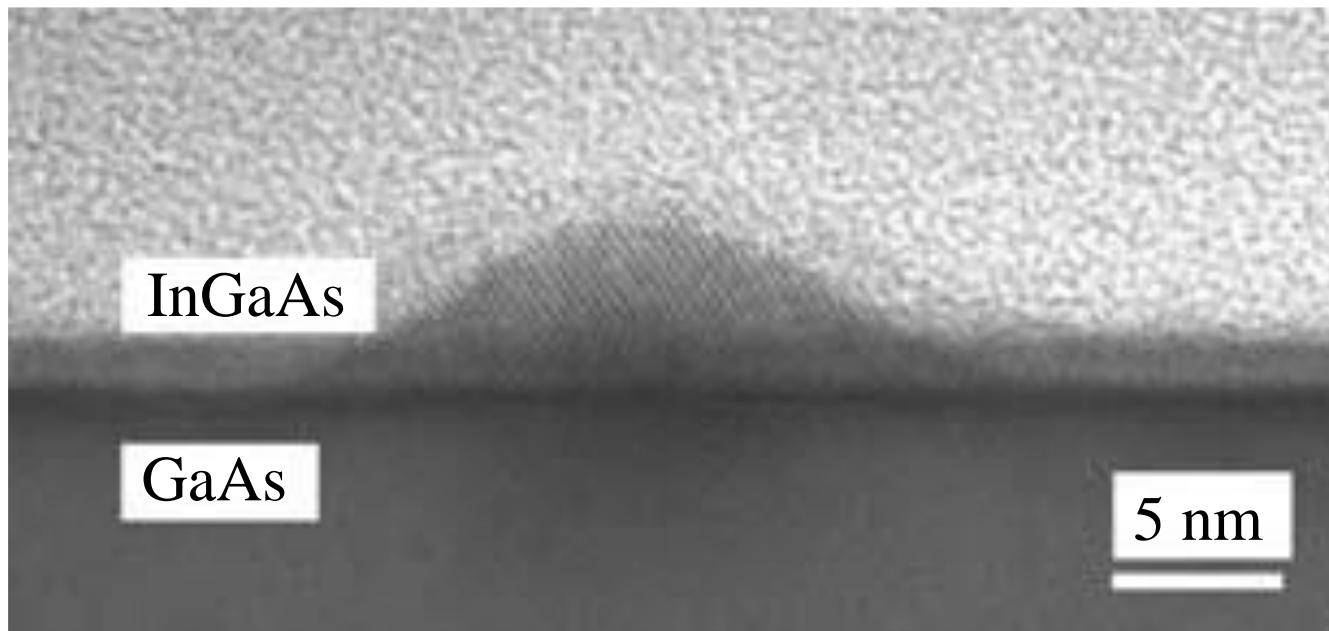
Obraz kropki kwantowej uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego

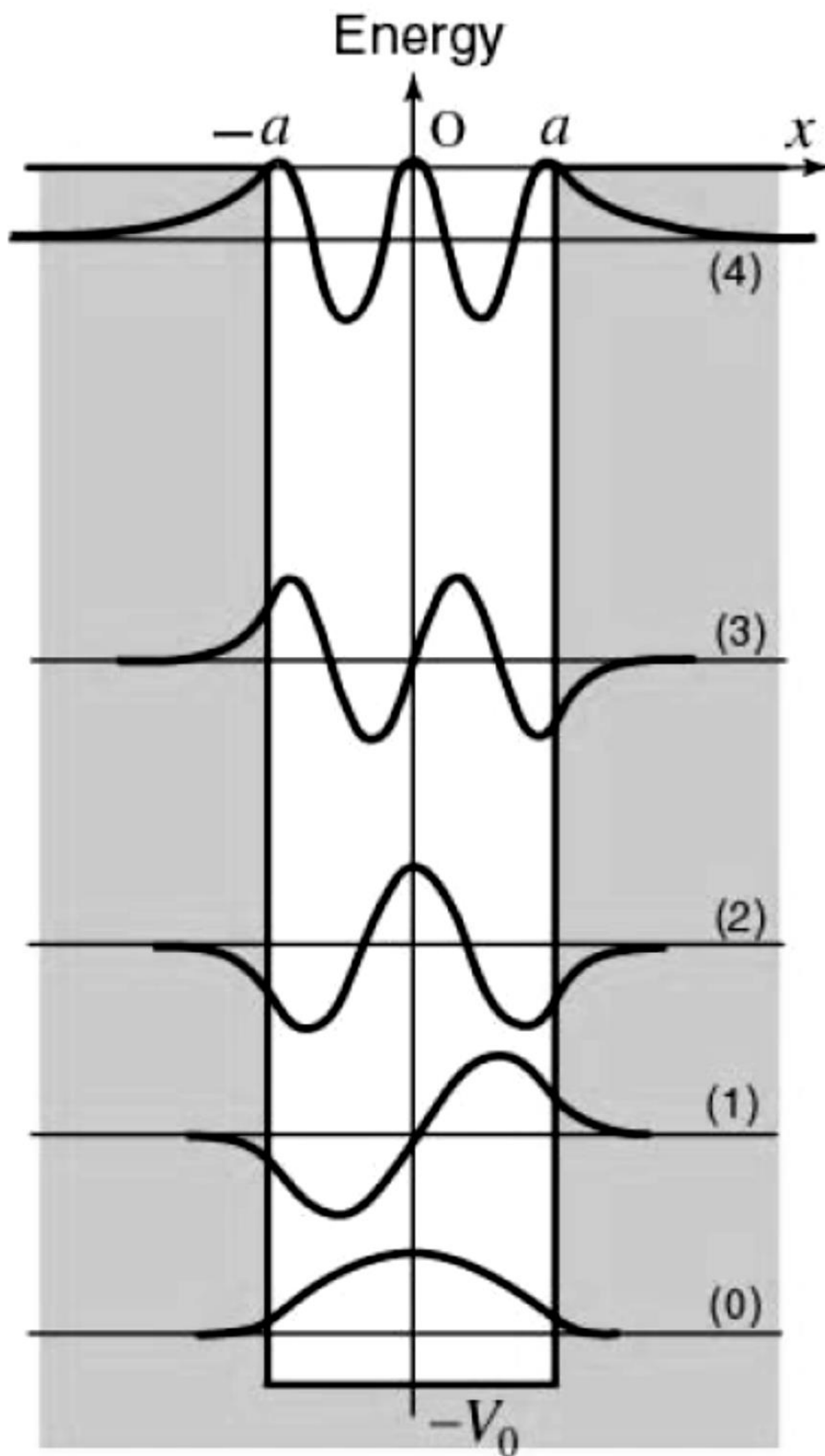


Obraz kropki kwantowej z InAs uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego



Przykładowe obrazy kropek kwantowych





Dyskretne poziomy
energii elektronów
w kropce kwantowej

Technologie, które umożliwiły rozwój nanoelektroniki

1. 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)

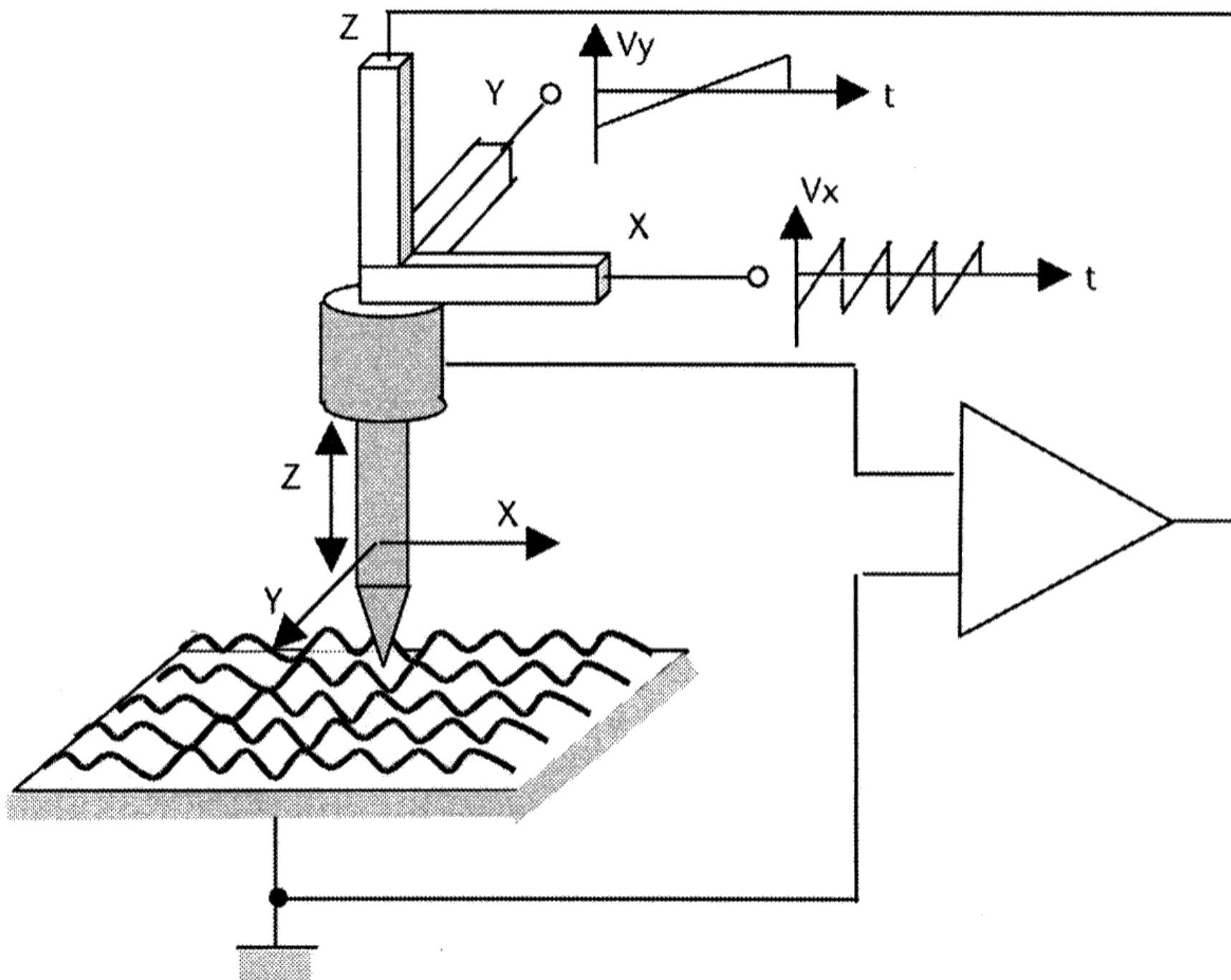
umożliwia tworzenie wymienionych wyżej nanoelementów kwantowych

matrycę (sieć) kropek kwantowych wykonuje się technologią MBE, proces polega np. na samoagregacji InAs w postaci nanowysp na powierzchni warstwy GaAs

2. Mikroskopy

a) mikroskop skaningowy tunelowy SKM (1981)

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



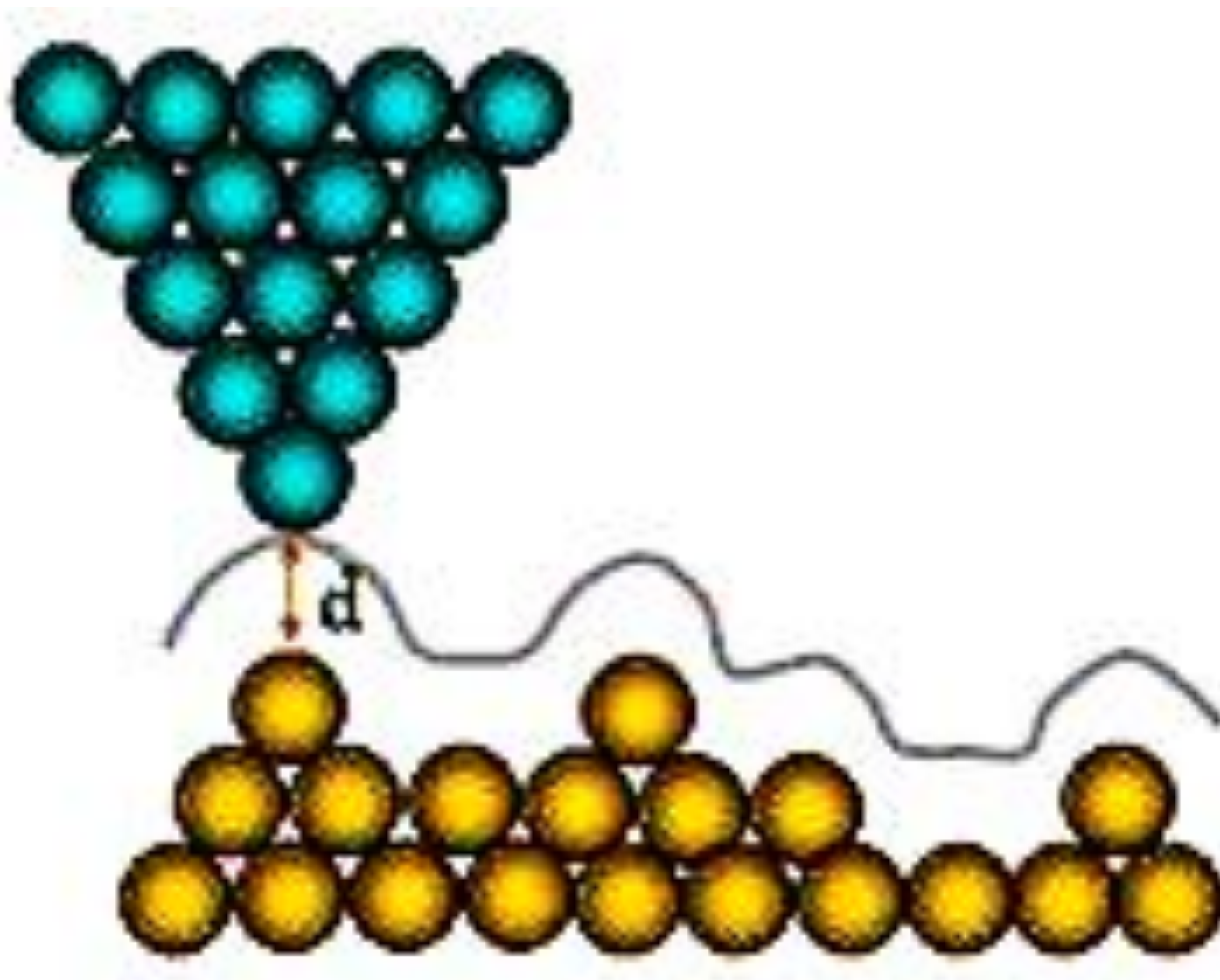
Uproszczony schemat mikroskopu skaningowego tunelowego

- 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:

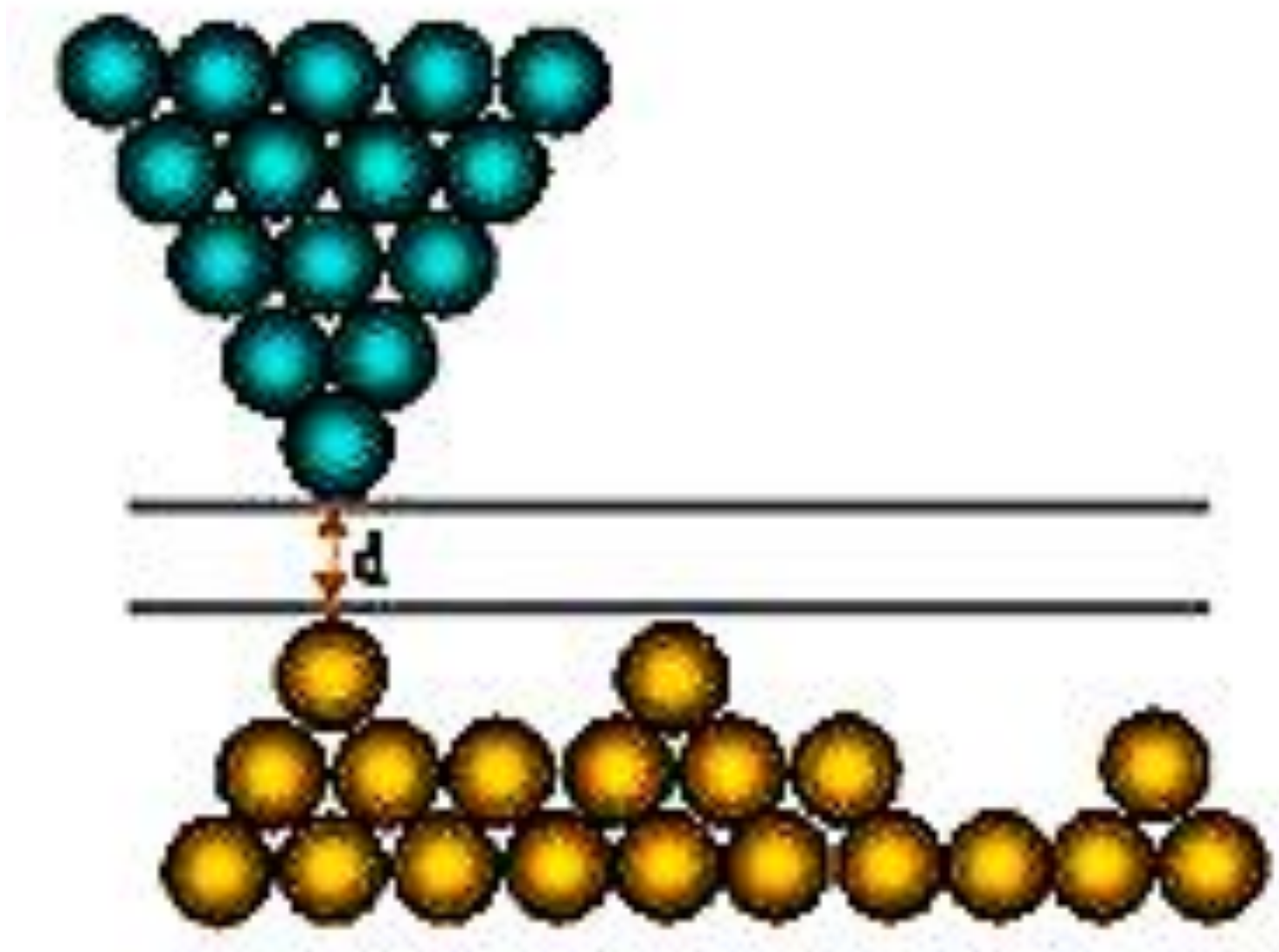
$$P \sim \exp\left(-\frac{2}{h} z \sqrt{2meU}\right)$$

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:

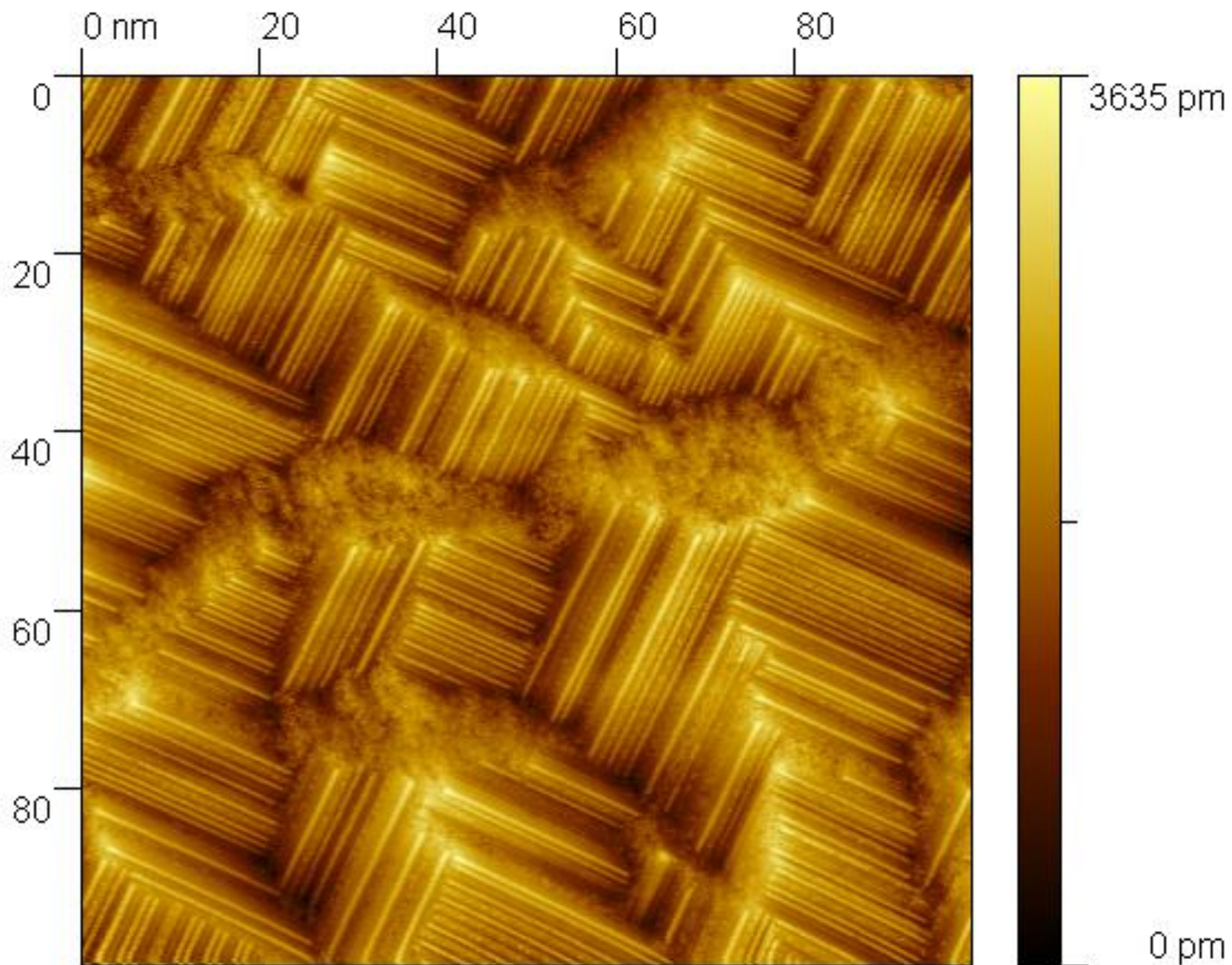
- pionowa: $0,01 \div 0,05$ nm,
- pozioma: około 0,3 nm.

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

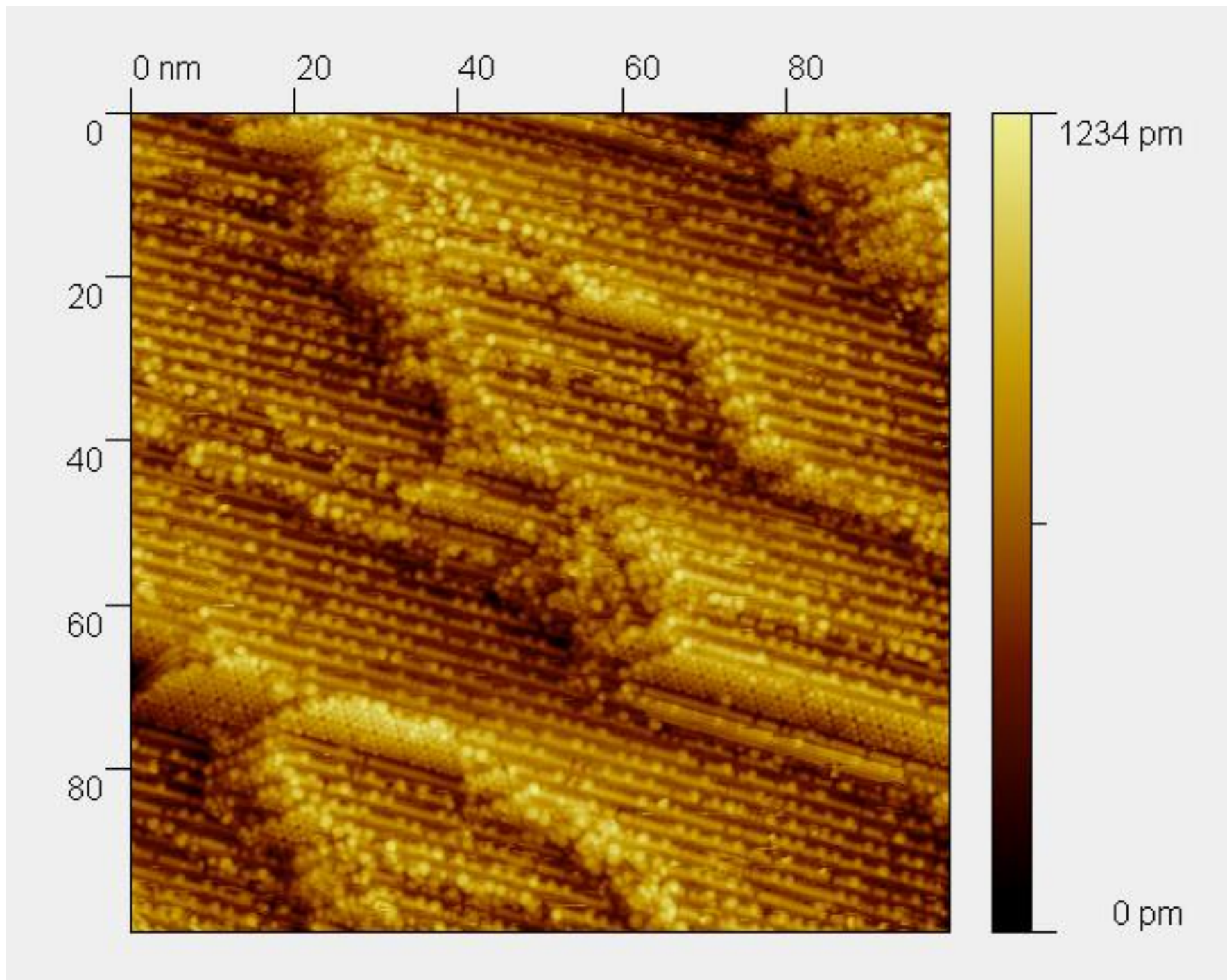
Ograniczeniem techniki STM są wymagania, żeby badana próbka miała dobre przewodnictwo elektryczne.

Natężenie prądu tunelowego musi być wystarczające do jego rejestracji.

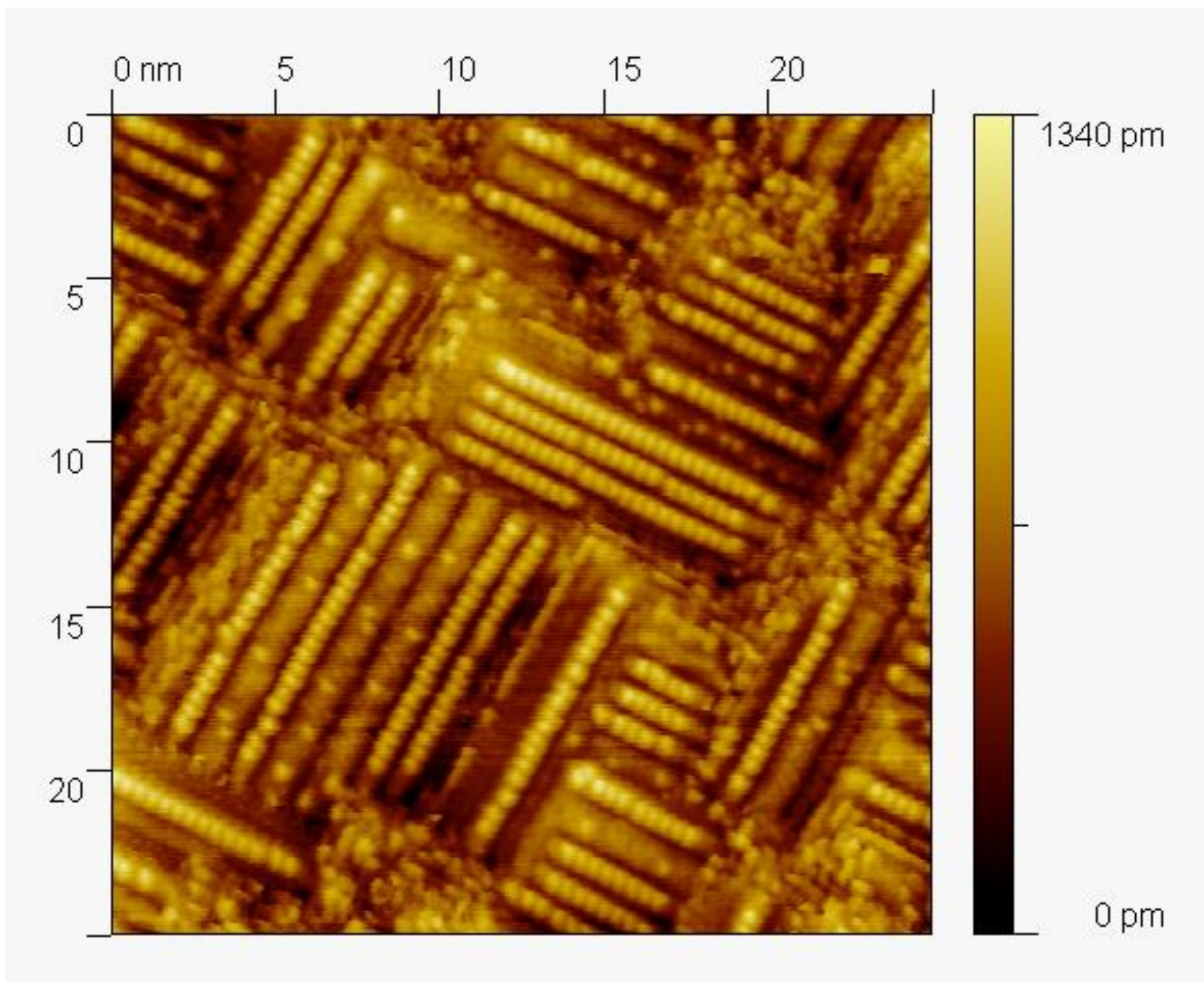
Technika STM nie może być stosowana do izolatorów, które nie zawierają swobodnych elektronów zdolnych do przewodzenia prądu.



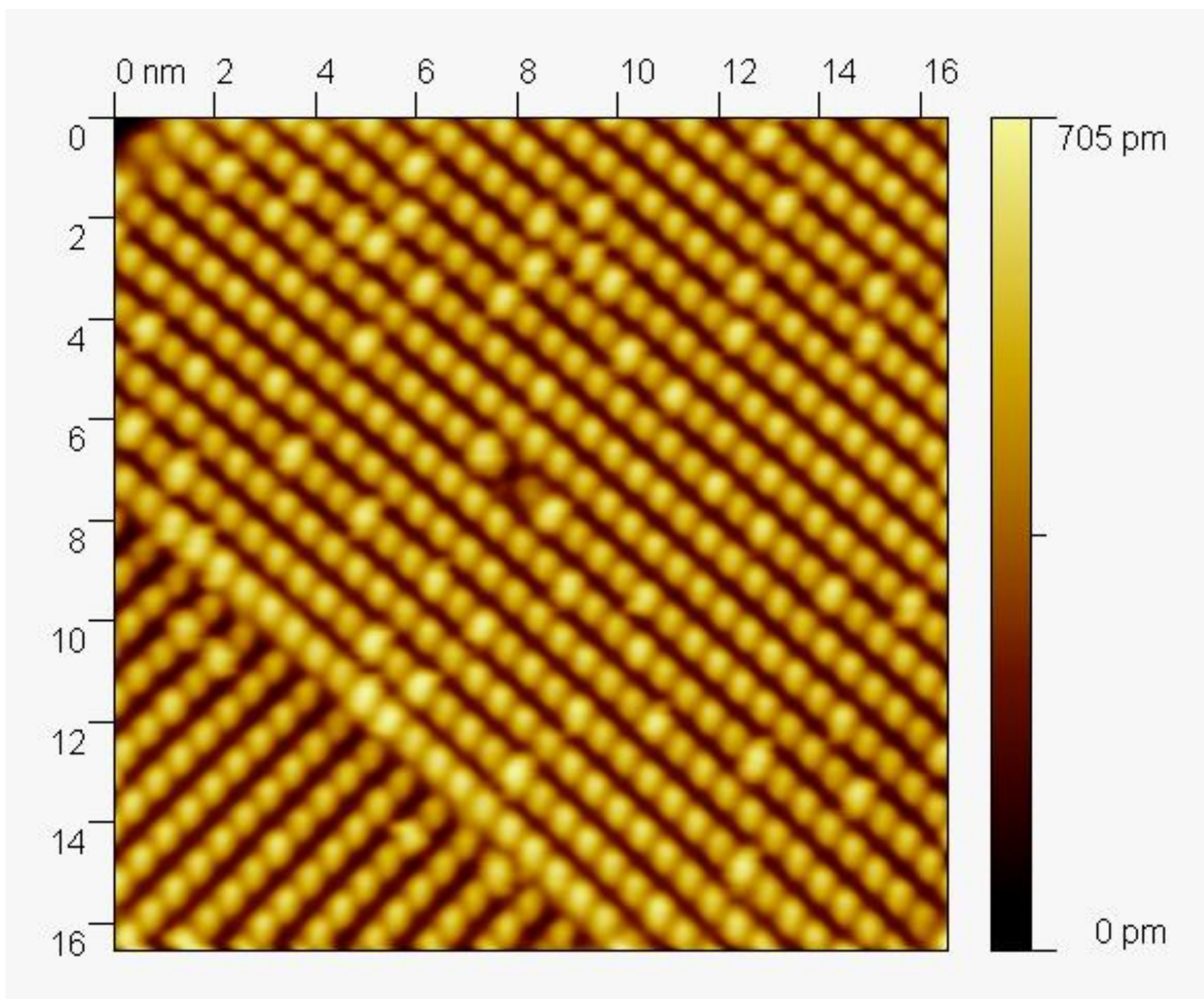
Przykład odwzorowania struktury powierzchniowej za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego



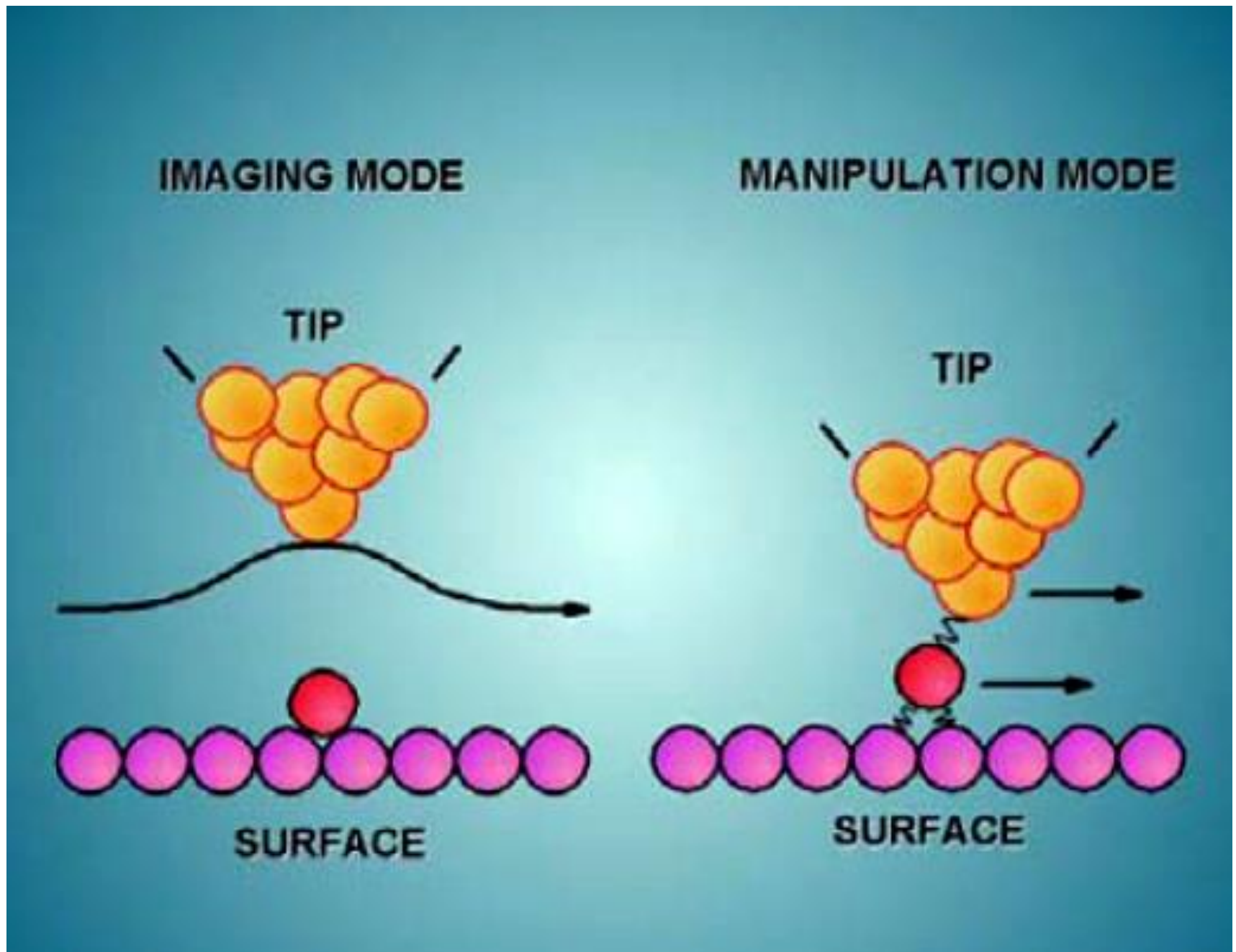
Przykład odwzorowania struktury powierzchniowej za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego



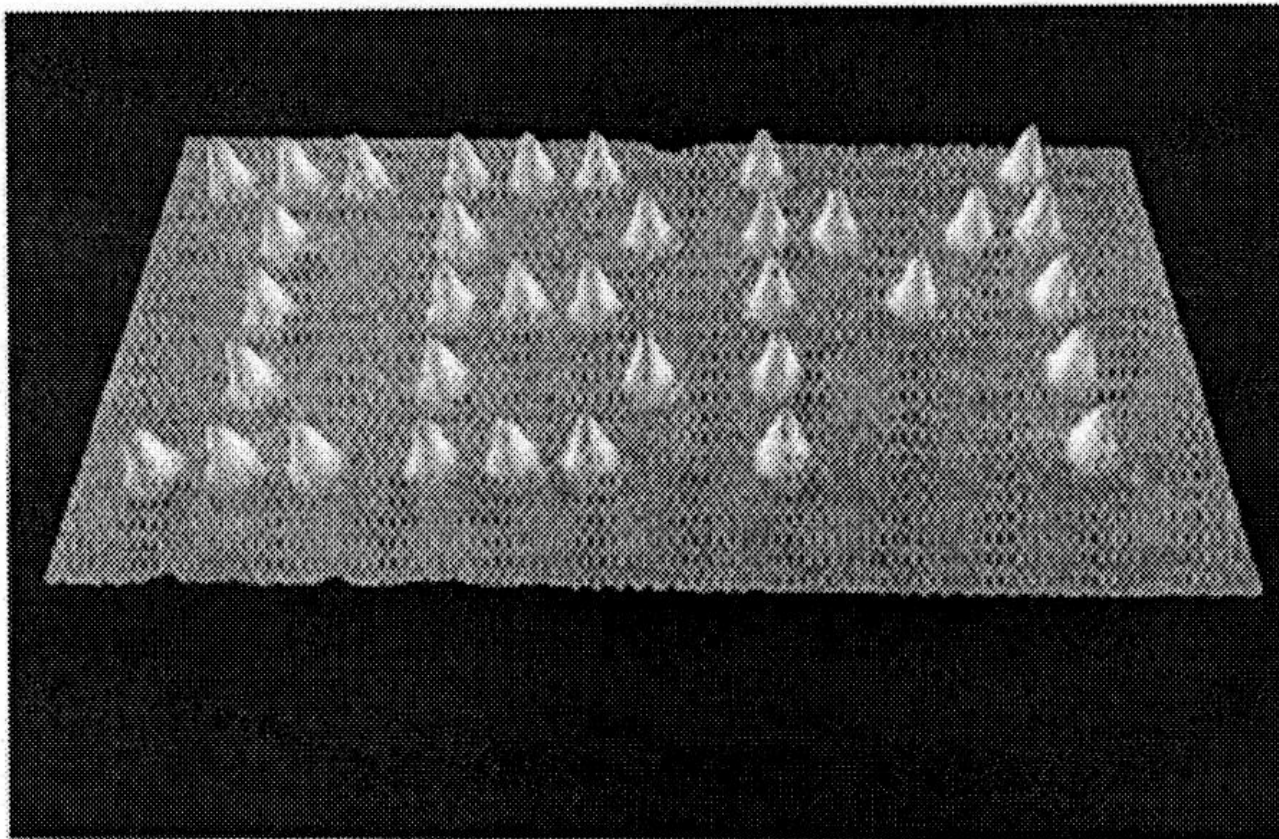
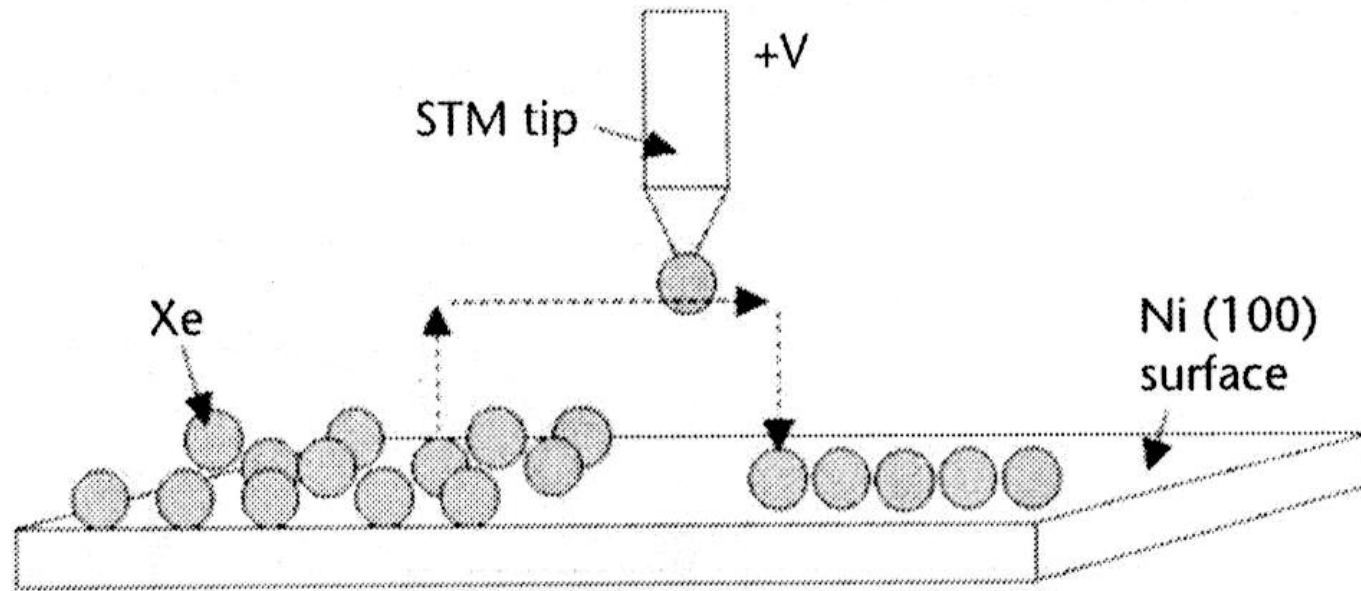
Przykład odwzorowania struktury powierzchniowej za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego



Przykład odwzorowania struktury powierzchniowej za pomocą mikroskopu skaningowego tunelowego



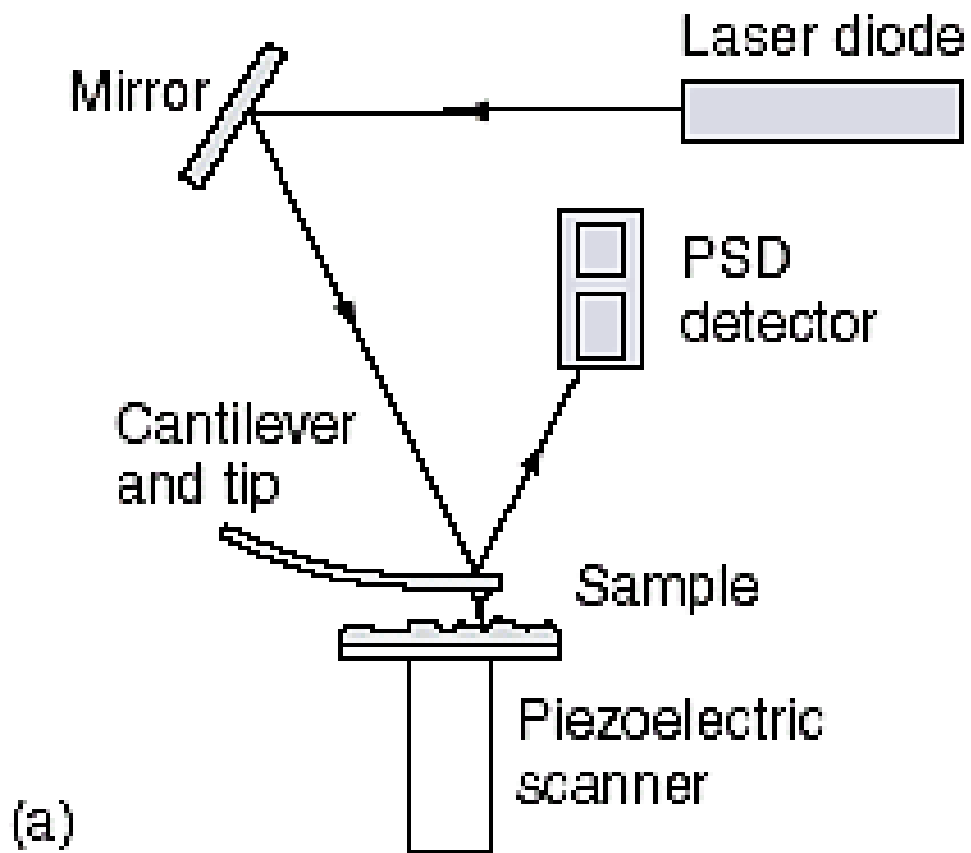
Zasada działania mikroskopu skaningowego tunelowego jako skanera i jako manipulatora



Przykład zastosowania mikroskopu skaningowego tunelowego jako manipulatora

b) mikroskop sił atomowych AFM (1986)

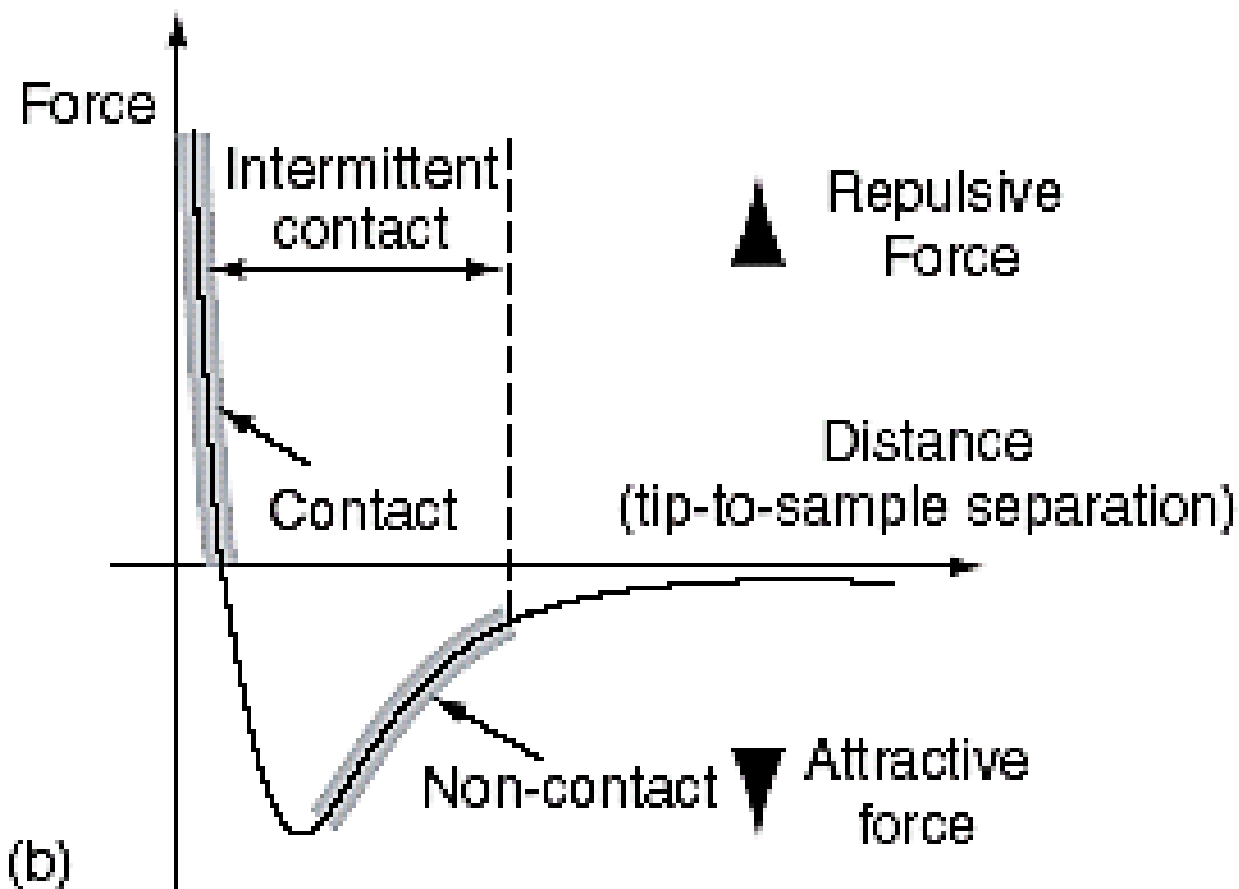
- sonda mikroskopu skanuje badaną powierzchnię rejestrując siłę oddziaływania międzyatomowego w funkcji położenia,
- AMF można wykorzystywać w wysokiej próżni, w normalnej atmosferze lub gdy badana próbka jest zanurzona w cieczy,
- ostrze sondy AFM jest umieszczone na końcu dźwigni o długości od 100 do 200 μm ,
- dźwignia ugina się w wyniku działania sił między sondą a badaną powierzchnią,
- koniec ostrza 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.



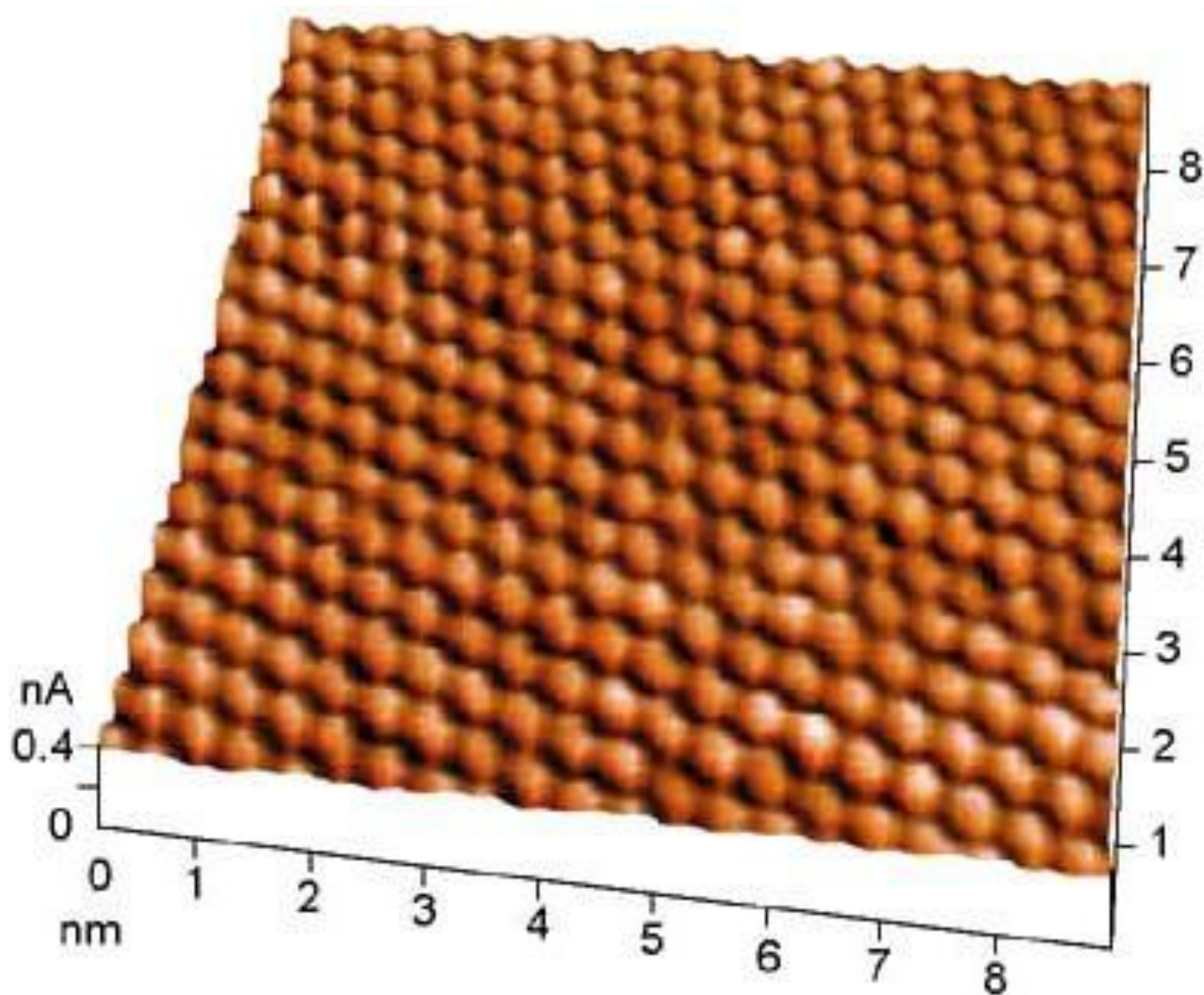
Mikroskop sił atomowych:

(a) schemat budowy

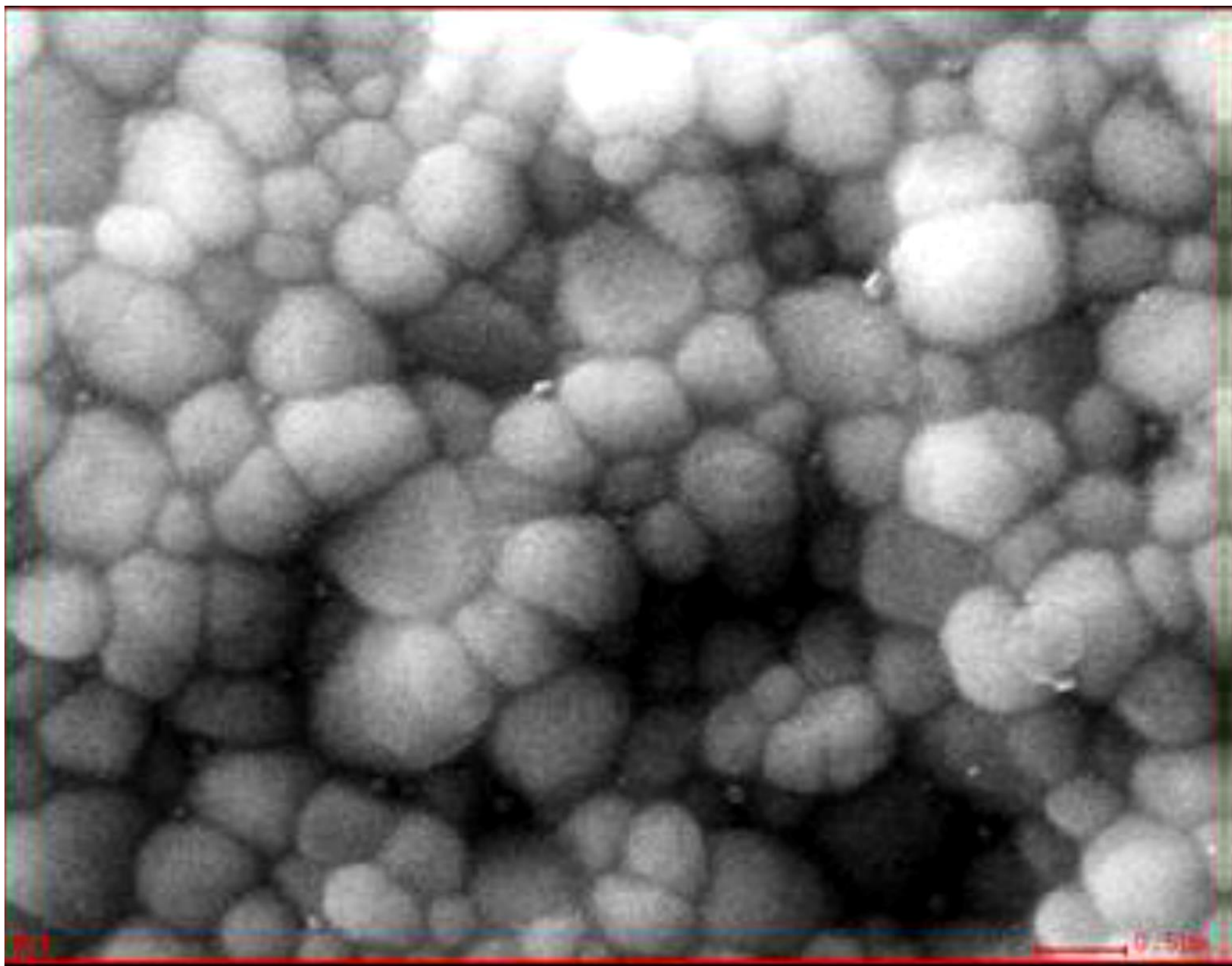
(b) wykres oddziaływania atomów ostrza i próbki



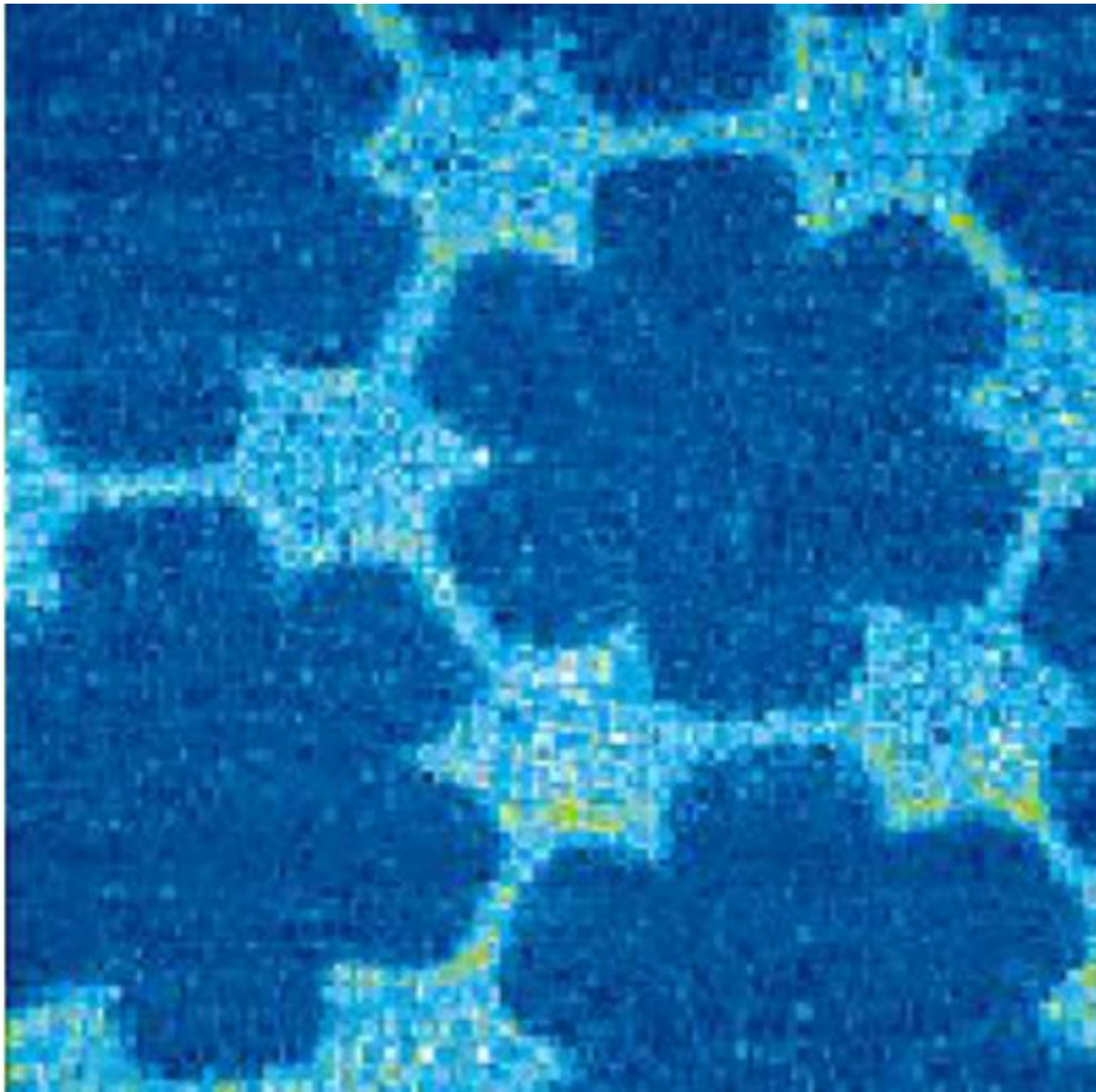
- występuje wiele typów oddziaływań, które są źródłem sił działających na dźwignie AFM,
- dominujące są przyciągające oddziaływania van der Waalsa oraz odpychanie elektrostatyczne (rysunek na poprzedniej stronie),
- gdy sonda znajduje się w odległości kilku dziesiątych nanometra od próbki działające 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 MoTe₂



Obraz powierzchni materiału ceramicznego (szerokość 500 nm)



Zaadsorbowana warstwa organiczna na elektrodzie Au

3. 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

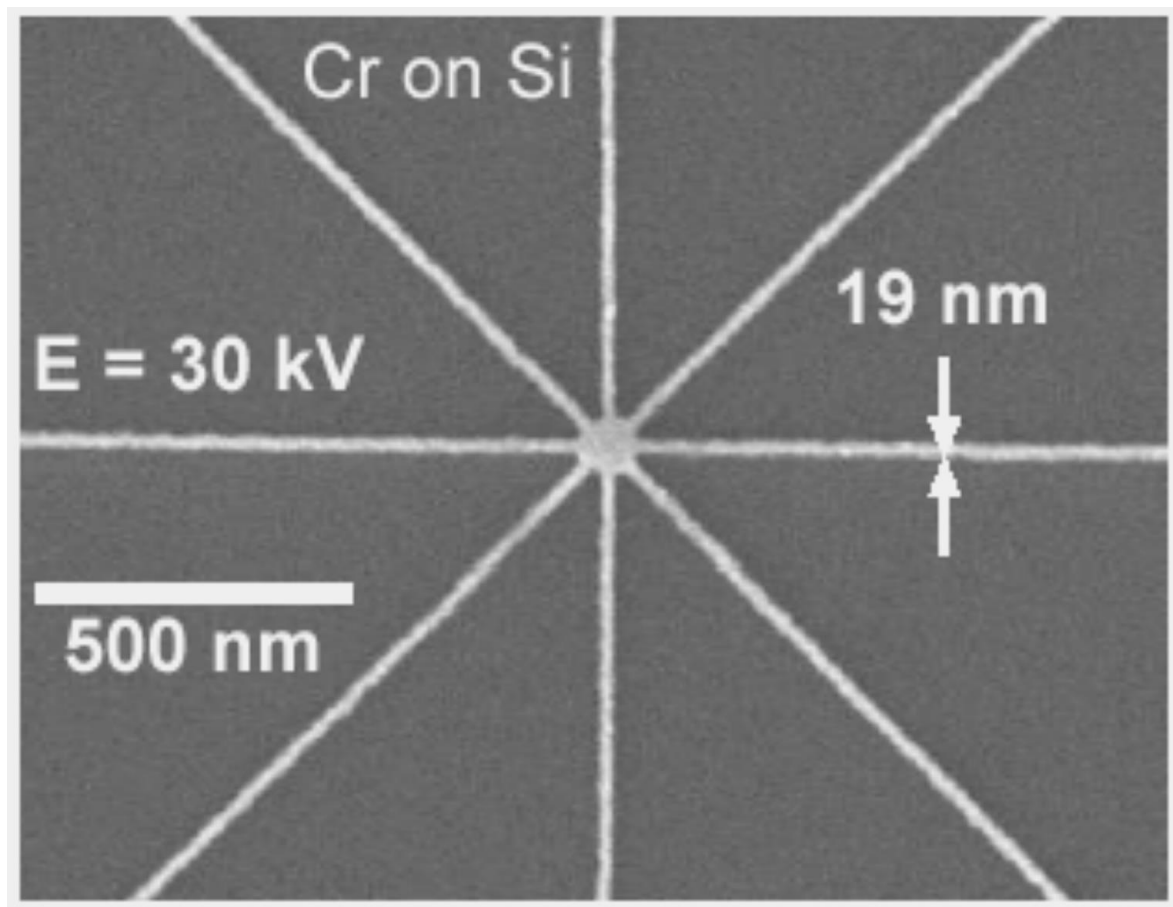
najmniejsza średnica strumienia elektronów: 3 nm

długość kroku przesuwu strumienia: 2 nm

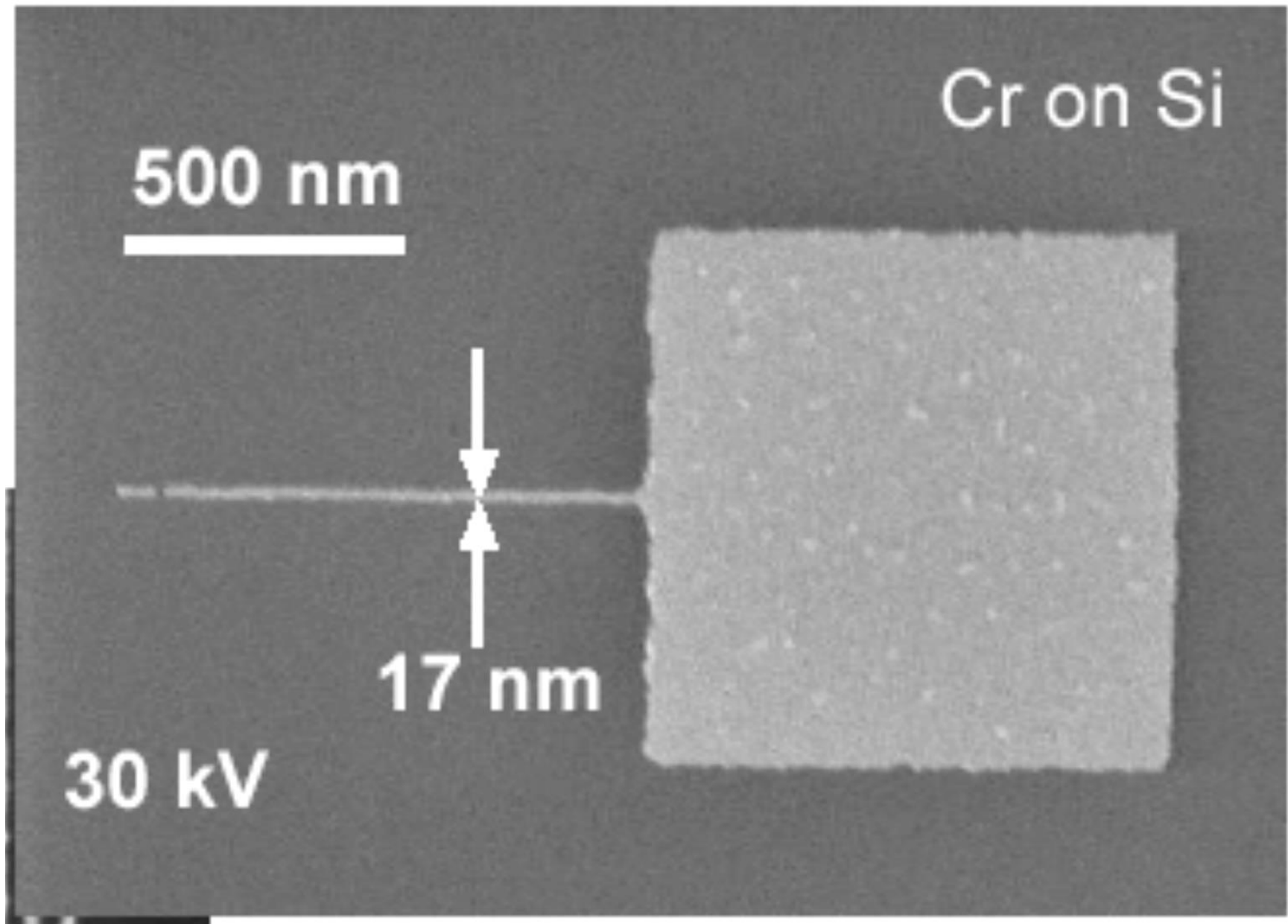
prędkość przesuwu strumienia: 1 MHz

wymiary obrabianego pola: 50 – 300 μm

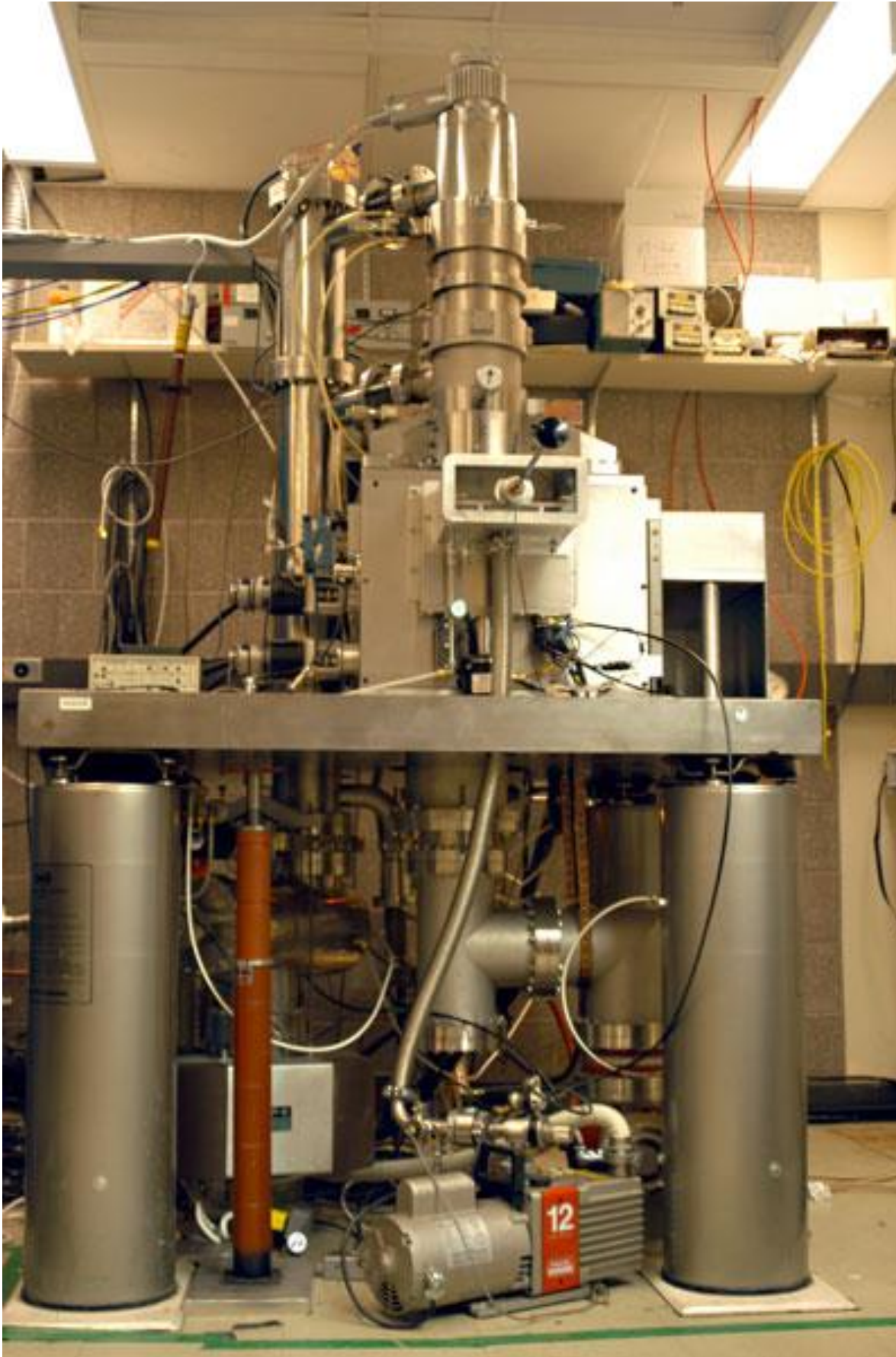
minimalna szerokość pojedynczej linii: 17 nm



Przykład
zastosowania
opisanej metody
litografii
elektronowej



Przykład zastosowania opisanej metody litografii elektronicznej



Przykładowe
nowoczesne
urządzenie do
litografii
elektronowej