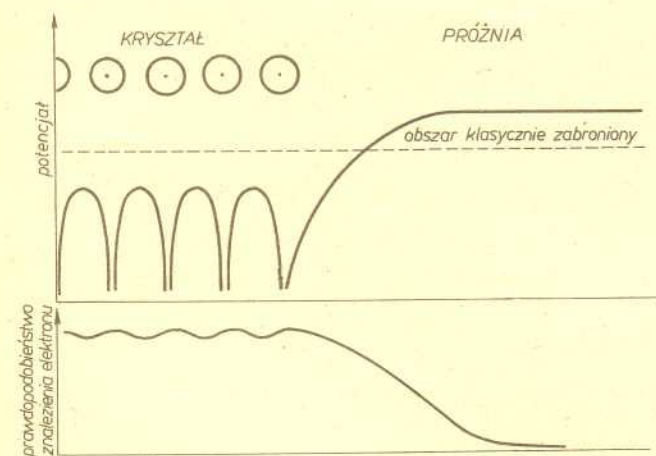


Mikroskop wykorzystujący zjawisko tunelowe

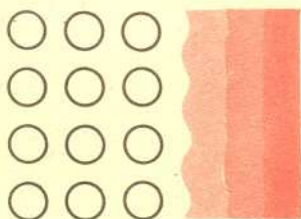
Doc. dr Tomasz HOFMOKL

Możemy dzięki niemu sporządzać mapy rzeźby badanej powierzchni z nieprawdopodobną zdolnością rozdzielczą $0,1 \text{ \AA}$ (10^{-11} m) w głąb i 2 \AA ($2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$) równoległe do powierzchni. Oznacza to, że można uzyskać topografię powierzchni z precyzją pozwalającą nie tylko rozróżniać pojedyncze atomy leżące obok siebie, ale także wyznaczać różnice wysokości położenia atomów z dokładnością do małego ułamka ich średnicy. Nieprawdopodobne, a jednak prawdziwe! Mikroskop ten działa wykorzystując zjawisko tunelowe przewidziane przez mechanikę kwantową w roku 1927 i nie mające odpowiednika w mechanice klasycznej.

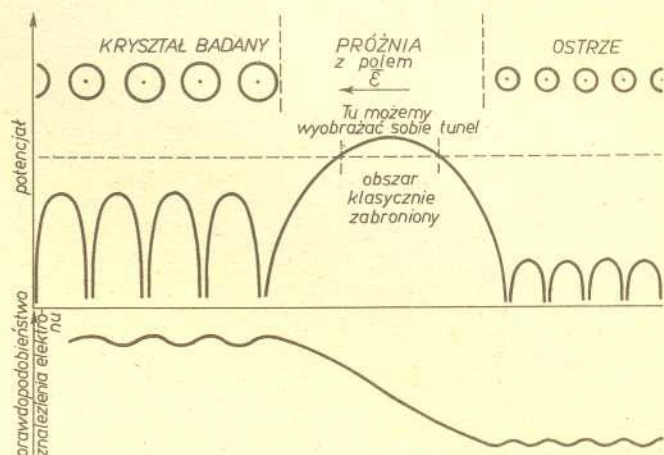
Wyobraźmy sobie płytkę z substancji przewodzącej, a blisko niej ostrych elektrody. Dla uproszczenia umieścimy wszystko w próżni i przyłożymy między elektrodę i płytkę niewielką różnicę potencjałów. Na tyle niewielką, aby elektrony nie mogły być wyrwane z płytki. Co przewiduje w tym przypadku fizyka klasyczna? Ruch swobodnych elektronów w przewodniku ograniczony jest tylko do przewodnika. Przy niewielkiej różnicy potencjałów elektrony nie mogą nabrać dostatecznej energii, aby wyrwać się z metalu. Prąd nie popłynie. Mechanika kwantowa twierdzi coś przeciwnego. Nie możemy zlokalizować elektronu tak, jak zwykłej piłki. Jego zachowanie opisuje funkcja falowa, która pozwala obliczyć, jakie jest prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w określonym punkcie przestrzeni. Prawdopodobieństwo znalezienia elektronu poza płytką jest małe, ale różne od zera i maleje bardzo szybko z odległością. Zbliżenie ostrza modyfikuje rozkład potencjału. Pomiędzy ostrzem i płytką powstaje bariera potencjału. Na zdrowy rozsądek w opisanych warunkach elektron nie ma prawa przejść do ostrza, bo nie ma dostatecznej energii, aby pokonać tę barierę. Mechanika kwantowa twierdzi, że prawdopodobieństwo przeniknięcia elektronu przez barierę jest różne od zera. Zasada zachowania energii nie sprzeciwia się temu, ale też nie tłumaczy, jak to się może stać.



Schematycznie zaznaczony rozkład prawdopodobieństwa znalezienia swobodnego elektronu w pobliżu powierzchni metalu — maleniu prawdopodobieństwa odpowiada wzrost zaczerwienienia.



Jeżeli musimy już sobie to wyobrazić modelowo, co wcale nie jest konieczne, to można powiedzieć, że elektron w takim przypadku wymknie się tunelem w barierze. Stąd powstała nazwa — zjawisko tunelowe.



Nasz obraz elektronów w płytce w mechanice kwantowej będzie inny. Możemy je sobie wyobrazić jako chmurki sięgające poza powierzchnię płytki. Poza płytką na odległości kilku angstromów też napotykamy elektrony. Ich liczba spada wykładniczo w miarę oddalania się od powierzchni płytki. A więc w obwodzie popłynie prąd malejący wykładniczo w miarę oddalania się ostrza od powierzchni płytki. Prąd w obwodzie jest więc niezwykle czułym wskaźnikiem odległości ostrza od powierzchni płytki. Mamy więc sposób, aby niezwykle precyzyjnie prowadzić ostrze czujnika tuż nad płytką stale w tej samej od niej odległości. Wystarczy teraz rejestrować położenie czujnika, aby odtworzyć topografię badanej powierzchni. Słowo „wystarczy” kryje w sobie cały ogrom problemów. Przede wszystkim trzeba sobie zdać sprawę, jaki jest rząd wielkości przesunięć w płaszczyźnie równoległej do powierzchni i w kierunku do niej prostopadłym.

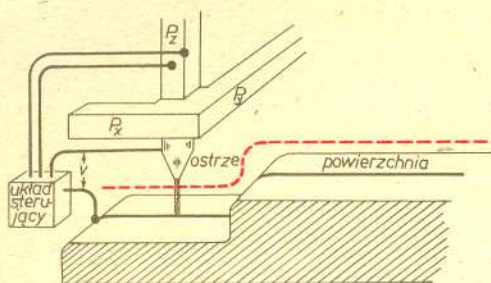
Pierwsze próby zbudowania przyrządu opartego na opisanej zasadzie sięgają roku 1971. R. Young, J. Ward i F. Scire zbudowali wtedy w National Bureau of Standards w Waszyngtonie urządzenie nazwane „topografierem”. Przodek mikroskopu (nazwijmy go w skrócie mikroskopem tunelowym) nie był zbyt udany. Zdolność rozdzielcza w płaszczyźnie równoległej do badanej powierzchni nie schodziła poniżej tysiąca angstromów. Dopiero w 1981 r. G. Binnig i H. Rohrer z laboratorium IBM w Zurichu zbudowali prototyp urządzenia, które obecnie osiąga wspomnianą na wstępie zdolność rozdzielczą $0,1 \text{ \AA}$ w kierunku prostopadłym do badanej powierzchni i 2 \AA w kierunku równoległym. Wyniki te uzyskano rozwiązując cały szereg problemów technicznych.

Ostrze musi być rzeczywiście bardzo ostre, promień jego krzywizny powinien być rzędu kilku angstromów. Hans Werner Fink, pracujący w tym samym laboratorium IBM, opracował technologię sporządzania ostrza z monokryształu wolframu z trzema tylko atomami na końcu. Atomy te tworzą trójkąt, w którego środku można umieścić pojedynczy atom. Układ taki jest trwały przez dziesiątki godzin. Można więc mieć ostrze z jednym atomem na czubku.

Bardzo wiele trudu włożono w pozbycie się wpływu drgań przypadkowych. Osiągnięto to poprzez sztywną konstrukcję mechaniczną o odpowiednio dobranych drganiach własnych, które można potem rozpoznać elektronicznie i wyeliminować z analizy. Obecna wersja mikroskopu pozwoliła rozwiązać ten problem.

System przesuwu: składa się on z przesuwu zgrubnego, sterowanego silnikiem krokowym, który pozwala zbliżyć próbkę do ostrza na odległość około 1 mikrona, czyli 10 tysięcy angstromów. Dalej operuje się już samym ostrzem. Jest ono osadzone na trzech wzajemnie prostopadłych ceramicznych beleczkach piezoelektrycznych. Przypomnijmy tutaj, że w anizotropowych ośrodkach dielektrycznych, mających określoną strukturę krystalograficzną, występuje zjawisko piezoelektryczne, polegające na tym, że płasko-równoległa płytka o określonej orientacji osi krystalograficznych, umieszczona w zewnętrznym polu elektrycznym, ulega deformacji, rozciąganiu lub ściskaniu.

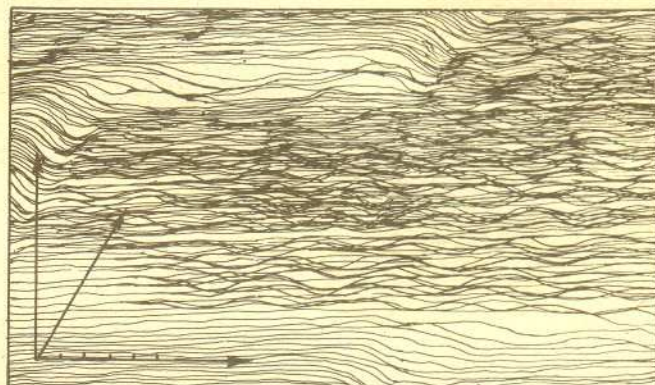
Przyłożenie do beleczek odpowiedniego napięcia powoduje przesuwanie się ostrza. Beleczki P_x i P_y służą do przesuwania ostrza równoległe do badanej powierzchni. Belka P_z kontroluje ruch prostopadły. Jest ona sprzężona z układem sterującym, który ustala tak położenie ostrza, aby prąd tunelowy pomiędzy badaną powierzchnią a ostrzem miał stałą wartość. Znając napięcia przyłożone do trzech belek piezoelektrycznych znamy współrzędne ostrza x, y, z . „Zamiatając” ostrzem całą badaną powierzchnię możemy odtworzyć jej profil.



W opisanym sposobie pomiaru topografii powierzchni nie wykorzystano wszystkich dostępnych potencjalnie informacji. Ostrze sondy prowadzono tak, aby zachować stały prąd tunelowy. A gdyby badać w każdym punkcie powierzchni rozkład natężenia prądu w zależności od energii elektronów? Można by wtedy znaleźć nie tylko rozkład atomów na powierzchni, lecz również rozkład elektronów na danym poziomie energetycznym, a to pozwala z kolei na identyfikację atomów i molekuł. Otwiera to możliwości „spektroskopii tunelowej”.

Mikroskop tunelowy może więc dostarczyć nie tylko danych topograficznych o powierzchni, ale również informacji o naturze tej powierzchni. Trudno przecenić praktyczne znaczenie tego urządzenia, zarówno w badaniach podstawowych, jak i w zastosowaniach.

Za osiągnięcia w budowie mikroskopu tunelowego G. Binnig i H. Rohrer otrzymali w 1986 roku nagrodę Nobla z fizyki.



Oto przykład powierzchni złota widzianej przez mikroskop tunelowy. Widzimy wyraźnie uskoki o wymiarach jednego atomu. Jedna podziałka na rysunku odpowiada 5 angstromom. Skala – w kierunku prostopadłym jest bardziej rozciągnięta.



Zadania

Redaguje dr Rafał SZTENCEL

M 466. Udowodnić, że każdy wielokąt o obwodzie $2a$ można nakryć kołem o średnicy a . Ponadto dla każdego $d < a$ istnieje wielokąt o obwodzie $2a$, który nie da się nakryć kołem o średnicy d .

Rozwiązanie na str. 13

M 467. Dwóch graczy gra w „orla i reszkę”. Kapitały początkowe graczy wynoszą m i n złotych, stawka – 1 złoty. Gra kończy się w chwili, gdy jeden z graczy zostanie zrujnowany. Znaleźć średnią długość gry.

Rozwiązanie na str. 10

M 468. Na dziesięciu drzewach, rozmieszczonych na okręgu, siedzi dziesięć wiewiórek (po jednej na każdym drzewie). Od czasu do czasu dwie wiewiórki przeskakują na sąsiednie drzewa. Czy wiewiórki mogą zebrać się na jednym drzewie?

Rozwiązanie na str. 12

Redaguje mgr Rafał STAROŃSKI

F 218. Foton – kwant promieniowania elektromagnetycznego o energii $E = h\nu$ pada prostopadle na płaskie, doskonale zwierciadło, poruszające się ze stałą prędkością v znacznie mniejszą od prędkości światła. Korzystając z prawa zachowania energii i pędu obliczyć częstotliwość ν' odbitych fotonów.

Rozwiązanie na str. 3

F 219. Płaska fala elektromagnetyczna pada na poruszającą się z prędkością v płaską metalową płytę ulegając odbiciu. Przyjmując, że fala rozprzestrzenia się wzdłuż osi z prostokątnego układu współrzędnych i jest opisywana równaniami:

$$E_x = E_0 \cos\left(\frac{\omega}{c} z - \omega t\right), \quad E_y = 0, \quad E_z = 0,$$

$$H_x = 0, \quad H_y = H_0 \cos\left(\frac{\omega}{c} z - \omega t\right), \quad H_z = 0,$$

obliczyć częstotliwość ν' fali odbitej, jeśli płyta porusza się prostopadle do osi z z prędkością v ; E_i i H_i ($i = x, y, z$) są składowymi wektorów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego fali elektromagnetycznej, ω jej częstotliwością.

Rozwiązanie na str. 13

