

Sveptunnelmikroskopet

19 okt. 2026, 4 min läsning

UTKAST

#fysik #kvantfysik #metod

Kurs: F0005T Förkunskaper: Kvantmekanisk tunnling

Sveptunnelmikroskopet utnyttjar att tunnelsannolikheten är exponentiellt känslig för barriärens bredd: med ett vakuumgap kring 1 nm mellan spets och yta ändras tunnelströmmen kraftigt vid minsta höjdskillnad. Det ger 0,1 nm lateral och 0,01 nm upplösning på djupet. Eftersom strömmen beror på vilka tillstånd som finns vid en given energi blir bilderna energiberoende, och tekniken kan byggas ut till STS, som ser enskilda tillstånd, och IETS, som mäter vilka tillstånd som kopplar till vibrationer.

Formeln, symbol för symbol

$$\frac{I_2}{I_1} = \exp(-2 \underbrace{\kappa}_{\substack{\text{avklingning,} \\ \text{bestäms av } \phi}} \underbrace{(d_2 - d_1)}_{\substack{\text{gapets} \\ \text{ändring}}})$$
$$\kappa = \frac{\sqrt{2m_e \underbrace{\phi}_{\substack{\text{utträdes-} \\ \text{arbetet}}}}}{\hbar}$$

Strömmen beror bara på hur mycket gapet ändras, och ändringen står i exponenten. Med $\phi \approx 4,5$ eV räcker en tiondels nanometer för att strömmen ska ändras ungefär tio gånger.

1. Uppställningen

En vass metallspets förs ned mot en ledande yta tills gapet är ungefär 1 nm. Längst ut sitter idealt en enda atom. Mellan spets och yta läggs en liten spänning, från några millivolt upp till några volt.

Vakuumgapet fungerar som en barriär. För att lämna metallen måste en elektron få ungefär utträdesarbetet ϕ , samma storhet som i **Fotoelektriska effekten**. Barriärhöjden över elektronernas energi blir därför $U_0 - E \approx \phi$, typiskt 4–5 eV. Utan spänning tunnlar lika många elektroner åt båda hållen. Spänningen gör att fler går åt ena hållet, och då flyter en nettoström på några nanoampere.

Spetsen flyttas med piezoelektriska kristaller, som ger en noggrannhet på pikometer i alla tre riktningar.

2. Strömmens avståndsberoende

Strömmen är proportionell mot tunnelsannolikheten i **Kvantmekanisk tunnling**. Gapet d är barriärens bredd, och κ bestäms av utträdesarbetet:

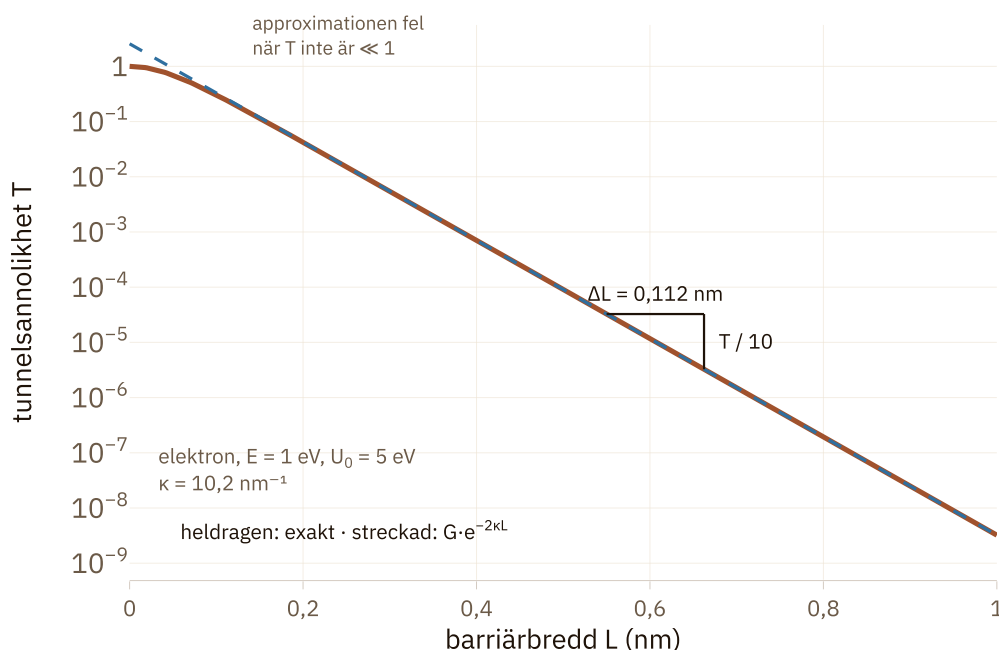
$$I \propto e^{-2\kappa d} \quad \kappa = \frac{\sqrt{2m_e\phi}}{\hbar}$$

Fysika: Fd3 (tunneleffekt, $T = Ge^{-2\kappa L}$ med gapet d som barriärbredd)

Förfaktorn och spänningen beror knappt på d . I en kvot mellan två avstånd tar de därför ut varandra:

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{-2\kappa(d_2-d_1)}$$

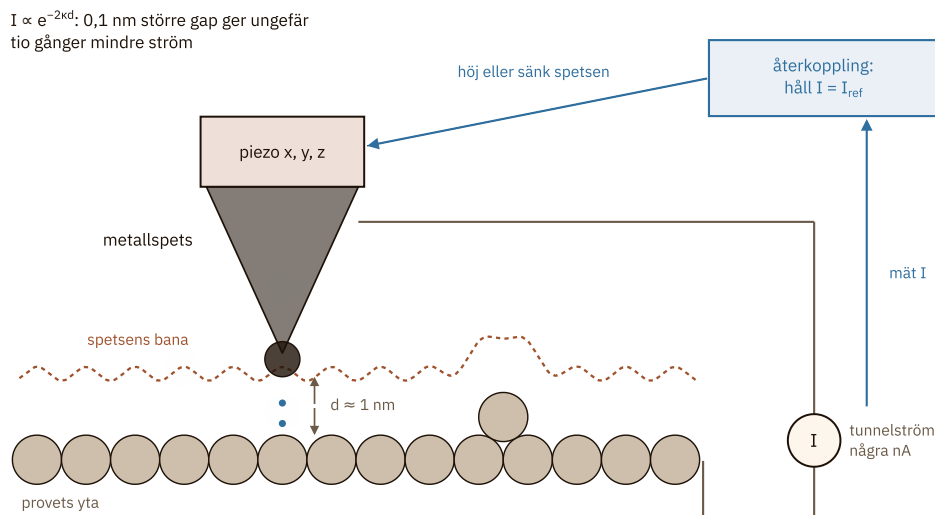
För $\phi = 4,50$ eV blir $\kappa \approx 10,9 \text{ nm}^{-1}$. Om gapet ökar med $\ln 10/(2\kappa) = 0,106 \text{ nm}$ blir strömmen tio gånger mindre, och det är mindre än en atomdiameter. Strömmen går då nästan bara genom den atom i spetsen som sitter närmast ytan. Det är därför mikroskopet når atomär upplösning.



Tunnelsannolikheten mot barriärbredden för en elektron med $E = 1$ eV mot $U_0 = 5$ eV, på logaritmisk skala. Kurvan är nästan rak: varje 0,11 nm extra bredd gör T tio gånger mindre. Approximationen $Ge^{-2\kappa L}$ (streckad) sammanfaller med den exakta lösningen så snart $T \ll 1$.

3. Driftlägen

- **Konstant ström.** En återkopplingskrets höjer och sänker spetsen så att strömmen hålls konstant, och då är gapet konstant. När spetsen sveper över ytan ritar dess höjd ytans topografi. Läget är det vanligaste och skyddar spetsen mot krockar.
- **Konstant höjd.** Spetsen hålls på fast höjd och strömmen registreras. Det går snabbare men fungerar bara på mycket släta ytor.



Sveptunnelmikroskopet i läget konstant ström. Elektroner tunnlar över gapet d mellan spetsens yttersta atom och ytan. Återkopplingen jämför strömmen med ett börvärde och höjer eller sänker spetsen med piezokrystallerna så att gapet hålls konstant, och spetsens höjd under svepet ritar ytans topografi — här med en extra atom på ytan.

Strömmen beror också på hur många elektronstillstånd som finns vid de energier som spänningen väljer ut. Om man håller spetsen still, varierar spänningen och mäter dI/dV får man tillståndstätheten på just den platsen. Det är **STS**, sveptunnelspektroskopi. **IETS**, inelastisk tunnelspektroskopi, letar efter små steg i strömmen vid de spänningar där elektronerna börjar kunna lämna energi till en vibration i en molekyl på ytan.

⚠ Vanliga fel

- **Faktorn 2 glöms.** Strömmen följer $e^{-2\kappa d}$. Med $e^{-\kappa d}$ blir känsligheten bara hälften så stor.
- **Fel barriärhöjd.** Barriären är utträdesarbetet på några eV. Den pålagda spänningen, ofta bara millivolt, är något annat.
- **Fel ekvation för gapändringen.** En relativ strömändring motsvarar $\Delta d = \ln(I_1/I_2)/(2\kappa)$. Det går inte att multiplicera procentsatsen med gapet.
- **Mikroskopet tros avbilda atomkärnor.** Det mäter elektronstillstånd vid ytan. Bilden visar var elektronerna finns vid en viss energi.

4. Lösta exempel

≡ Exempel — Hur känslig är strömmen?

Spetsen i ett sveptunnelmikroskop befinner sig nära en metallyta. Barriärhöjden över elektronernas energi är 4,50 eV.

a) Beräkna κ . b) Med vilken faktor minskar tunnelströmmen om gapet ökar med 0,100 nm? c) Återkopplingen tillåter att strömmen ökar med högst 2,00 % innan spetsen flyttas. Hur mycket får gapet minska innan det händer?

Lösning

a) Avtagandet. $\phi = 4,50 \text{ eV} = 7,210 \cdot 10^{-19} \text{ J}$:

$$\kappa = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 7,210 \cdot 10^{-19}}}{1,055 \cdot 10^{-34}} \approx \boxed{1,09 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-1}}$$

Fysika: Te ($\hbar$, m_e)

b) Kvoten. $2\kappa \Delta d = 2 \cdot 1,087 \cdot 10^{10} \cdot 1,00 \cdot 10^{-10} = 2,174$:

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{2,174} \approx \boxed{8,79}$$

Strömmen blir nästan nio gånger mindre när gapet växer med ungefär en halv atomdiameter.

c) Lös ut gapändringen. $I_2/I_1 = 1,02$ ger

$$\Delta d = \frac{\ln 1,02}{2\kappa} = \frac{0,01980}{2,174 \cdot 10^{10}} \approx \boxed{0,911 \text{ pm}}$$

Det är ungefär en hundradel av en atomradie, vilket förklarar upplösningen på djupet.

Ej kontrollerat mot facit — två oberoende lösningar stämmer överens.

Läsning

- 40.4 Potential Barriers and Tunneling