

Elektronok mozgása nanostruktúrákban

2-D elektrongáz, kvantumdrót és kvantumpötty

Dr. Berta Miklós

bertam@sze.hu

2017. október 26.

Tekintsünk egy olyan kristályrácsot, amelynek minden mérete sokkal kisebb, mint az elektron szabad úthossza ebben a kristályrácsban, továbbá legyenek olyan elektronok, amelyek a Fermi-szint feletti energiával rendelkeznek (a kristályrácsban szabadon mozgó elektronok). Ekkor az elektron minden ütközés nélkül mozog a rácsban (**ballisztikus vezető**).

$$L_x, L_y, L_z \ll l_{szabad} \sim \mu\text{m},$$

$$E_e > E_F$$

Egy ilyen rácsban a „szabad” elektronok időfüggetlen Schrödinger-egyenlete:

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta \right\} \psi(x, y, z) = E \psi(x, y, z)$$

Keressük a megoldást a következő alakban:

$$\psi(x, y, z) = \varphi(x) \cdot \chi(y) \cdot \kappa(z).$$

Az eredeti dinamikai egyenlet az előbbi helyettesítés után 3, egymástól független egyenletre esik szét:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} + k_x^2 \varphi(x) = 0, \text{ ahol } k_x^2 = \frac{2m_e E_x}{\hbar^2}$$

$$\frac{\partial^2 \chi(y)}{\partial y^2} + k_y^2 \chi(y) = 0, \text{ ahol } k_y^2 = \frac{2m_e E_y}{\hbar^2}$$

$$\frac{\partial^2 \kappa(z)}{\partial z^2} + k_z^2 \kappa(z) = 0, \text{ ahol } k_z^2 = \frac{2m_e E_z}{\hbar^2}.$$

Ezek egyenként, az egyes irányokban az egydimenziós dobozba zárt elektron mozgásegyenletei.

Tehát:

$$k_x = n_x \frac{\pi}{L_x}, \quad k_y = n_y \frac{\pi}{L_y}, \quad k_z = n_z \frac{\pi}{L_z},$$

$$n_x = 1, 2, 3, \dots, \quad n_y = 1, 2, 3, \dots, \quad n_z = 1, 2, 3, \dots .$$

$$E = E_x + E_y + E_z = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right)$$

2-D elektrongáz, vagy 2DEG

Tegyük fel, hogy sikerül úgy kialakítani a 3-D dobozt, hogy $L_z \sim 10^{-10}$ m, azaz nagyságrendileg 1 atom átmérője, míg $L_x, L_y > L_z$.

Ekkor a z-irányban a legalacsonyabb energiájú energianívó energiája:

$$E_z^{(min)} \sim 30 \text{ eV}.$$

Amíg az elektron összenergiája ennél az értéknél kisebb, addig a z-irányú mozgás nem alakulhat ki, a szabad elektronok sokasága **2-D elektrongázként (2DEG)** viselkedik! (A z-irányú mozgás „befagyott” állapotban van.)

A 2DEG-ben a „szabad” elektronok közvetlenül a 2DEG-beli Fermi-szint fölötti energiával rendelkeznek.

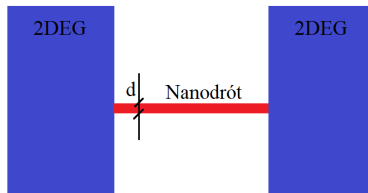
Kvantum-, vagy nanodrót

Csökkentsük a 2DEG y -irányú méretét úgy, hogy $L_x \gg L_y$, ekkor **kvantum-, vagy nanodrót**ot kapunk. Az ilyen struktúra 1-D nanostruktúra. Az L_y paramétert egy nanodrót esetében jelöljük a továbbiakban d -vel, és nevezzük a nanodrót átmérőjének!

Az elektronok energianívói a nanodrótban:

$$E_{1D} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e} \left(\frac{n_{1D}}{d^2} \right).$$

A továbbiakban vizsgáljuk a következő elrendezést!



Válasszuk a nanodrót d_0 átmérőjét olyan kicsire, hogy a nanodrótbeli elektronok legkisebb energiájú nívójának ($n_{1D} = 1$) energiája is nagyobb legyen, mint a 2DEG-beli vezetési elektronok energiája.

$$E_{1D}^{(1)} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e} \left(\frac{1}{d_0^2} \right) > E_{2DEF}^F$$

Ha ilyenkor feszültséget kapcsolunk a nanodrót két vége közé, akkor sem fog elektromos áram folyni a nanodróton. Az összes „vezetési csatorna zárva” van!

Válasszuk a nanodrót d_1 átmérőjét úgy, hogy a nanodrótbeli elektronok legkisebb energiájú nívójának ($n_{1D} = 1$) energiája legyen kisebb, mint a 2DEG-beli vezetési elektronok energiája, de a $n_{1D} = 2$ nívó energia viszont legyen nagyobb, mint a 2DEG-beli vezetési elektronok energiája.

$$E_{1D}^{(1)} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e} \left(\frac{1^2}{d_1^2} \right) < E_{2DEF}^F < E_{1D}^{(2)} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e} \left(\frac{2^2}{d_1^2} \right)$$

Ha ilyenkor feszültséget kapcsolunk a nanodrót két vége közé, akkor elektromos áram folyik a nanodróton. Az $n_{1D} = 1$ kvantumszámmal jelezett „vezetési csatorna” van „nyitva”!

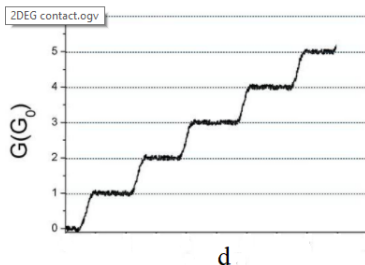
Jól látható, hogy a nanodrót átmérőjének fokozatos növelésével a többi „vezetési csatorna” is „kinyitható”!

A nanodrót vezetőképessége a drót átmérőjének változtatásakor ugrásszerűen (kvantumokban) változik. Bonyolultabb számításokkal megmutatható, hogy az elektromos vezetőképesség kvantuma:

$$G_0 = \frac{2e^2}{h} = 82 \cdot 10^{-6} \text{ S}.$$

Az ennek megfelelő elektromos ellenállás:

$$R_0 = \frac{1}{G_0} = 12,2 \text{ k}\Omega.$$



Kvantumpötty, vagy q-dot

Ha $L_x \sim L_y \sim \text{nm}$, akkor kvantumpöttyről beszélünk.

A kvantumpöttybeli elektron energiaszintjeinek energiaértékei – hasonlóan az atombeli elektron energianívóihoz – a kvantumszámok négyzetével arányosak, de pontos értékük az L_x, L_y méretekkel finomhangolható! –

MESTERSÉGES ATOM

$$E = E_x + E_y = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} \right)$$

Köszönöm a figyelmet!