

KVANTUMELEKTRONIKA

Kvantummechanikai alapok

Miért nem jó a klasszikus megközelítés azon módon, ahogy a mikroelektronika dolgozik és eszközöket épít? Egyre komolyabb akadályok és nehézségek merülnek fel a hagyományos megközelítéssel szemben:

1. A mai mikroelektronikai eszközök sok elektronnal dolgoznak. Ez a memória esetében 1 bit tárolásához több ezer elektron szükséges. Ennek következtében nagyszámú töltést mozgat a rendszer, így sok hő szabadul fel. A probléma az, hogy ha egyre jobban integráljuk ezeket az elemeket, azaz egyre kisebb felületre egyre több elektron kerül, akkor a hűtés normálisan nem oldható meg. Olyan sok hő keletkezik, hogy megolvad az anyag és ez komoly gátat szab!

2. A hagyományos mikroelektronikai eszközöket litográfiai litográfias eljárásokkal készítik: lényegében mintázatokat hoznak létre a szilícium lapka felületére. A műveletet fénnel végzik, készítenek egy maszkot és leképezik a megfelelően előkezelt anyaggal bevont Si-lapka felületére. Az optikai eljárások felbontása valahol az alkalmazott fény hullámhosszának a felére tehető. A látható fény 400 nanométernél kezdődik, azaz kb. 200 nanométeres objektumokat lehet ily módon készíteni. Ezen az értéken már rég túl van a mikroelektronika. Rövidebb hullámhosszú sugárzás, ultraibolyasugárzás, röntgensugárzás használata elbonyolítja a dolgot. Pl.: röntgensugárzást fókuszálni nagyon nehéz.

A néhány nanométeres tartományt elérve egyre dominánsabbá válnak a kvantumeffektusok. Ezek egyfelől úgy tűnik számos bonyodalmat okoznak, másfelől sok olyan lehetőséget megnyitnak, ami nagyon biztató az elektronika jövőjére nézve. Számos olyan hatás érvényesül itt, ami nem igaz az ennél nagyobb mérettartományokban. Lehetővé teszik olyan eszközök előállítását, amelyek egy-egy elektronnal vezérelhetők, vagy egy-egy elektront mozgatnak, amelyek így sokkal kevesebb hődisszipációt eredményeznek.

A kvantummechanika Schrödinger egyenlete:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V)\psi = 0 \quad \text{Ahol}$$

ψ a hullámfüggvény

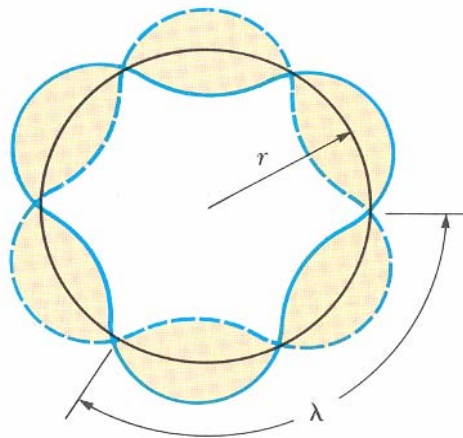
\hbar^2 Planck állandóból származó állandó

E a rendszer energiája

V a potenciális energia

m a részecske tömege.

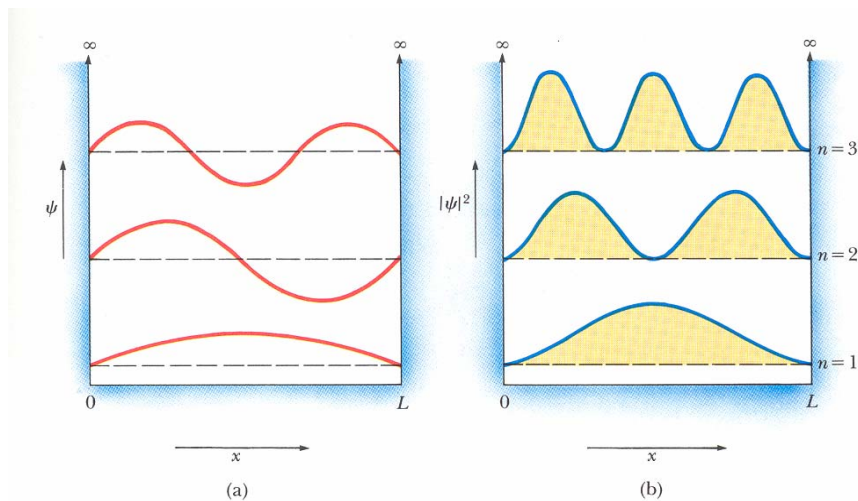
A mikrorészecskék egyszerre hullámok és részecskék. Az időtől független Schrödinger egyenlet írja le a kvantummechanika rendszerek viselkedését. Ennek az egyenletnek általában egy adott potenciális energia esetén csak diszkrét energiaértékeknél van megoldása. Ezért mondjuk, hogy az energia kvantált. Az adott energiaértékekhez tartozó hullámfüggvény – pontosabban annak négyzete - írja le a szóban forgó állapotban az elektronok térbeli eloszlását, megtalálási valószínűségét.



Kb. 100 évvel ezelőtt észrevették, hogy az atomokban az elektronok csak meghatározott energiaszinteken helyezkedhetnek el. Ezeket az energiaszinteket az tünteti ki, hogy az elektronnak megfelelő hullámfüggvény önmagával erősítő módon interferálva ún. cirkuláris állóhullámokat képez. Azaz a lehetséges pályákat az tünteti ki, hogy a hozzátartozó hullámfüggvényt felrajzolva a pálya kerületére, pont egész számszor ér körbe. Ekkor önmagával találkozáva erősíti saját magát.

Általános következtetésként elmondható, hogy az atommag Coulomb erőtere által egy kis térrészbe bezárt elektron, mint hullám önmagával interferencia jelenséget produkál, ezért csak azok pályák stabilak, ahol az interferencia erősítő.

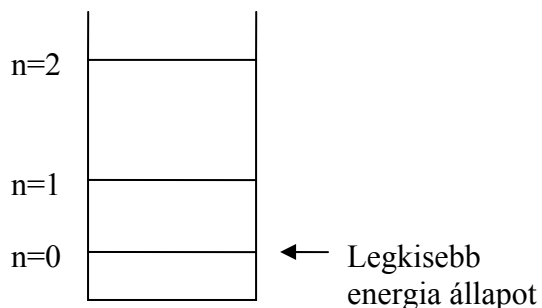
Dobozba zárt részecske



Tekintsük az egydimenziós esetet: Az elektront bezárjuk egy L hosszúságú térrészbe, amit végtelen magas potenciálgátak határolnak. Ezzel a potenciális energiával meg lehet oldani a Schrödinger egyenletet. Az n -dik energiaszintre megoldásként kapjuk:

$$E_n = \frac{\pi^2 \cdot \hbar^2}{8mL^2} \cdot (n+1)^2 \quad n = 0, 1, 2 \dots$$

A megfelelő hullámfüggvények nagyon hasonlítanak a mechanikai állóhullámokra (ábra), ugyanolyan állóhullámok alakulnak ki, mint a kifeszített L hosszúságú húron. A kifeszített húr mindkét vége le van rögzítve egy végtelen nagy erő által. A húr hossza a kialakuló hullámok fél hullámhosszának egészszámú többszöröse. A lehetséges elektronenergiák, amelyek diszkrét értékek, valójában csak a potenciálgödör lineáris méretétől függenek. Minél kisebb a doboz mérete, annál nagyobb az alapállapot energiája (E_0) értéke, s annál nagyobb az energiaszintek egymástól való távolsága.

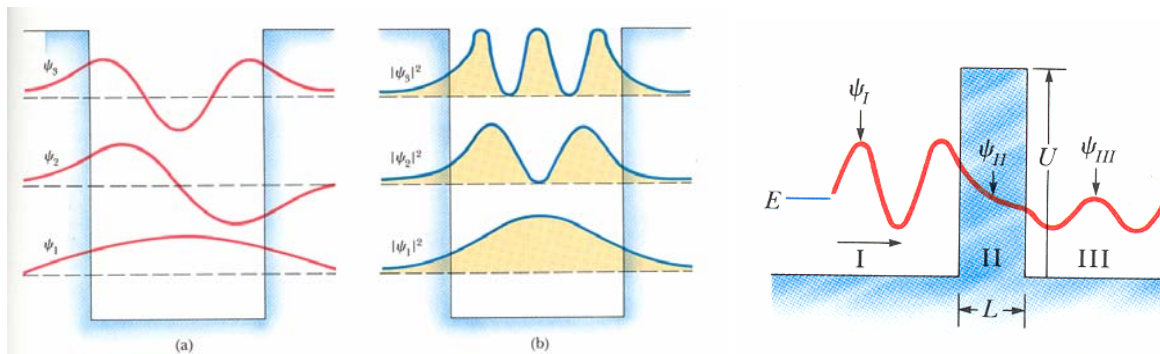


Az $n=0$ -hoz tartozó energia érték: $\frac{\pi^2 \hbar^2}{8mL^2} > 0 !$

Az egyes energiaszintek egyre ritkulnak, mert értékük négyzetesen nő $(n+1)^2$ miatt. A hullámfüggvény négyzete megmondja, hogy egy adott helyen milyen valószínűséggel található meg az elektron. A *b* ábrán látható ennek a valószínűsűrség-függvénye alapállapotban, 1. és 2. gerjesztett állapotban. Látható, hogy gerjesztett állapotban vannak a doboz belsejében is helyek, ahol az elektron megtalálási valószínűsége nulla.

Jól elkülönülő energiaszinteket akkor tudunk létrehozni, ha az L egy kicsi szám. Ha nagy lenne, akkor annyira közel lennének az energiaszintekhez, hogy gyakorlatilag folytonosnak látnánk a függvényeket. A gödör szélessége nanométeres tartományba kell, hogy essen.

Az alagút effektus.



Ha a potenciálgát nem végtelen magas, akkor nemcsak a gödörben van 0-tól eltérő megtalálási valószínűsége az elektronnak, a hullámfüggvény beelég a klasszikusan tiltott tartományba is. Mindez azt eredményezheti, hogy ha van egy nem túl széles energiagát, akkor anélkül át tud jutni az elektron ún. alagúteffektussal a másik gödörbe, hogy az energiagátnál nagyobb lenne az energiája. Ez klasszikusan nem megengedett jelenség. Az elektron energiagáton való átjutási valószínűsége exponenciálisan csökken a gát szélességének nagyságával.

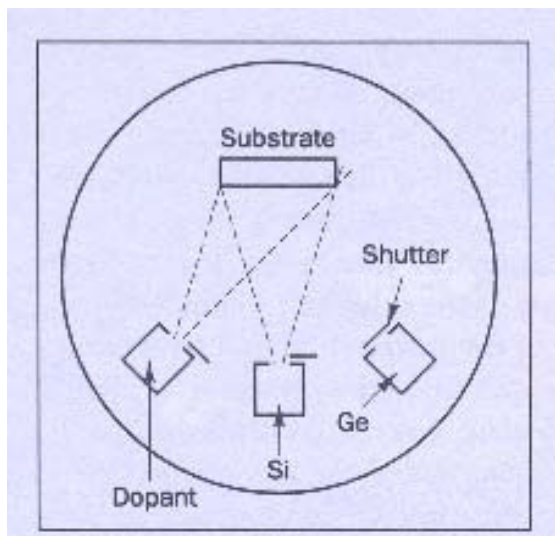
Összefoglalásképpen elmondhatjuk, hogy ha egy elektront bezárunk egy parányi térrészbe, akkor ott az elektron energiája csak diszkrét értékeket vehet fel, s a lehetséges energiaszintek alapvetően csak a térrész méretétől függenek.

A kvantumárok

Kvantumpötty: 0 dimenziós struktúra, ahol az elektron mozgása három irányból van korlátozva.

Kvantumdrót: 1 dimenziós struktúra, ahol két irányból megkötött az elektron mozgása.

A kvantumárok (quantum well) egy olyan konstrukció ahol az elektronok mozgása a tér egyik dimenziójában le van korlátozva, tehát 3 dimenzió helyett csak 2 dimenzióban mozoghatnak szabadon. Többféleképpen lehetséges kvantumárok létrehozása. Most lássunk erre egy módszert.



Ebben az elrendezésben három, fűtőtekercsek által vezérelhető párologtatót látunk, amelyek segítségével egy félvezető anyagra tudnak különböző anyagokat felpárologtatni. (molekulasugaras, párologtatás; MBE) Most a három párologtató segítségével Al, Ga és As vegyületeket párologtatunk, úgy hogy a következő elrendezés alakuljon ki.

Ezek a párologtatók rendkívül precíz eszközök, segítségükkel képesek vagyunk ezeket a rétegeket akár egy atom vastagságban felvinni a félvezető rétegre. A képen 3 atom vastagságban helyezkednek el az AlGa és AlGaAs rétegek.

Az AlGaAs vegyértéksávjából át tudnak lépni elektronok a vezetési sávjába, melyek energiája jól meghatározott. Ez az AlGa-nál is megtörténik, de az elektronok potenciális energiája jóval kisebb, mint az AlGaAs esetében. Ekkor az elektronok az AlGaAs vezetési sávjából lepotyognak az AlGa alacsonyabb potenciájú vezetési sávjába, és onnan nem tudnak kilépni. Ezzel elérhető, hogy a foglyul ejtett elektronok a szűk AlGa rétegben szabadon mozognak, de onnan kilépni csak nehezen tudnak. Az ilyen kvantumárokban mozgó elektronokat szokták 2 dimenziós elektrongáznak (2DEG) is hívni.

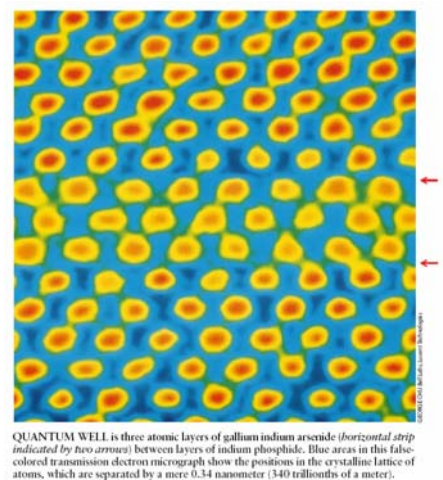
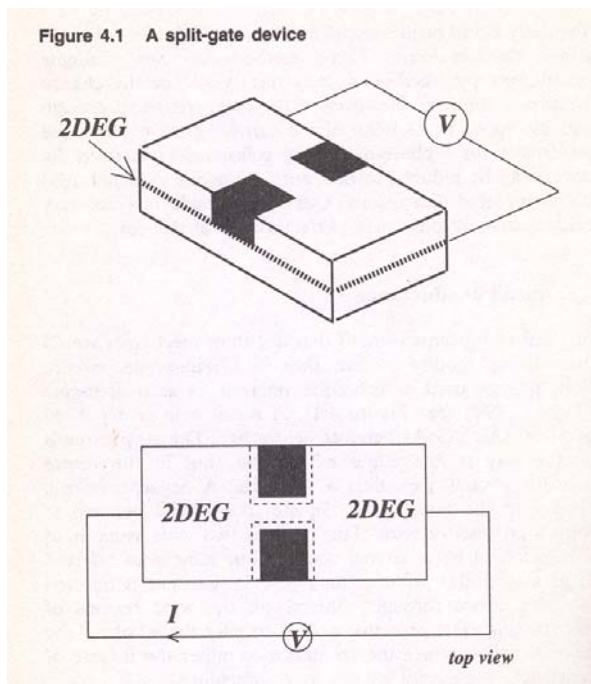


Figure 4.1 A split-gate device



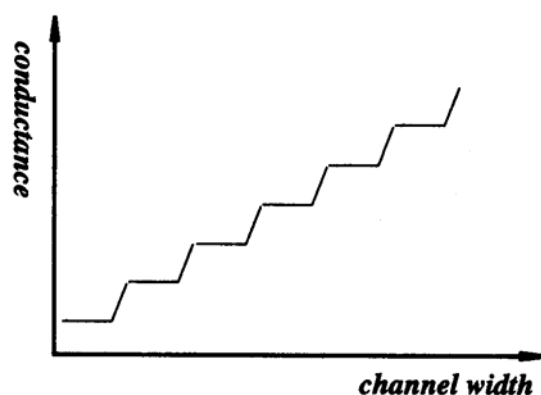
feszültséggel a kvantumdrót vastagsága könnyen szabályozható.

Helyezzünk erre a heterogén félvezető-struktúrára 2 fémelektrodát az ábrán látható módon. Ha ezekre negatív feszültséget adunk, akkor az elektrodák alatti térrészből (szaggatott vonal) a taszítóerő hatására eltűnnek az elektronok, s a bal- és jobboldali 2DEG-et csak egy szűk csatorna köti össze. Az elektrodákra adott feszültséggel vezérelhetjük a csatorna vastagságát. Ez a szűk csatorna kvantumdrótként viselkedik, benne az elektronok mozgása két irányból is erősen korlátozott. Az elektrodákra adott

Kvantált vezetés

Most nézzük meg, mi történik akkor, ha az előbb bemutatott konstrukcióban állandó feszültséget kapcsolunk a lemez két végpontjára, s az elektrodákra adott feszültség függvényében – a kvantumdrót szélességét változtatva - mérjük az áramerősséget. Így meg tudjuk határozni a vezetőképességet (ill. ellenállást). A klasszikus Ohm törvény értelmében a vezetőképesség a csatorna szélességével egyenes arányban kellene, hogy változzon. Ezzel szemben a mérés lépcsőzetes változást mutat. Vajon miért?

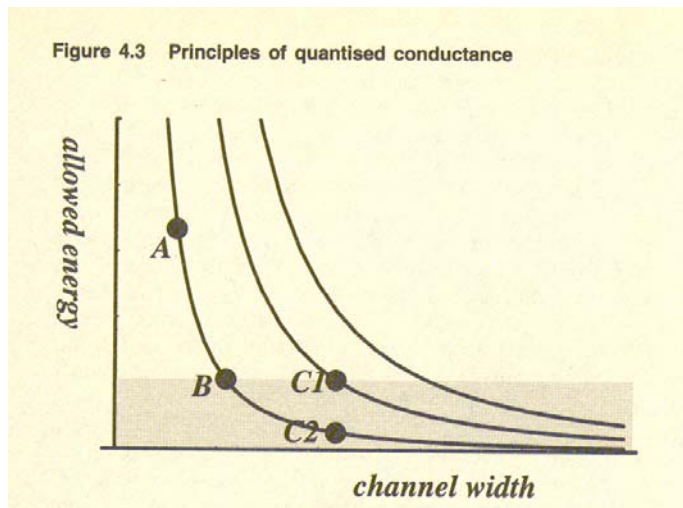
Figure 4.2 Quantised conductance



Az elektrodák által kialakított csatorna szélessége határozza meg a benne található elektron lehetséges energiaszintjeit. Egy szélesebb csatornánál alacsonyabb lesz az alap energiaszint,

és sűrűbben lesznek az energiaszintek, mint egy keskenyebb csatornánál.

Az elektródáktól balra fekvő 2DEG-ben meghatározott energiasávban vannak az elektronok (szürke tartomány). Mi a kvantumdrót vastagságának csökkentésével be tudjuk úgy állítani az árkon belüli energiaszinteket, hogy a

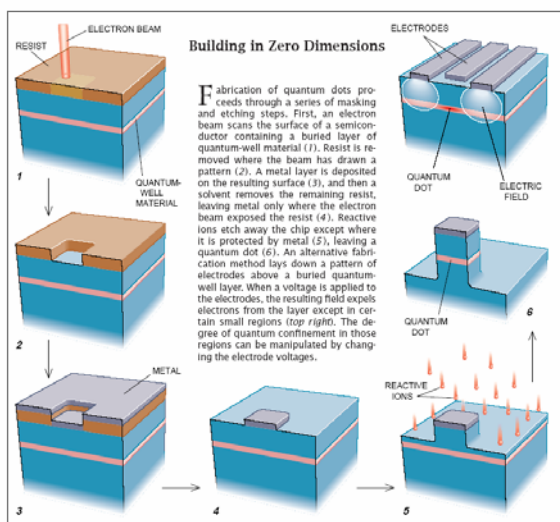


legalacsonyabb is magasabban legyen a 2DEG-ben található elektronenergiáknál (A pont). Ekkor nem tud a 2DEG-ből elektron bejutni a csatornába, hiszen túl kevés az energiája akár a benti alapállapotú energiaszintre való belépéshez is. Ebben az esetben gyakorlatilag nulla a vezetőképessége a konstrukciónknak. (A két térfél között alagúteffektussal megvalósuló minimális mértékű vezetést azért tapasztalhatunk.) Ha növeljük a csatorna szélességét, akkor a benne kialakuló energiaszintek sűrűbbek lesznek és egyre alacsonyabbra kerülnek. Így elérhetjük, hogy a csatornán belüli alapállapotú energiaszint már beleesik a 2DEG energiasávjába (B ponttól jobbra), s ekkor az alapállapotú energiaszintre be tudnak lépni az elektronok, s ezen az állapoton keresztül megindul az áram a csatornában. Ezután egy darabig hiába növeljük tovább a csatorna szélességét, az első gerjesztett állapot energiája túl magas a 2DEG elektronjai számára, csak az E_0 állapoton keresztül van vezetés, ezért nem tapasztalunk vezetőképesség változást. A csatorna szélességének további növelésével eljuthatunk oda, hogy a következő energiaszint (E_1) is lecsökken a 2DEG elektronenergiáinak szintjére (C1 pont), így az E_0 állapot mellett az E_1 szinten keresztül is lehetővé válik a vezetés, a vezetőképesség ugrásszerű megnövekedését eredményezve. Ha tovább növeljük a csatorna szélességét, az E_2 energiaszint vezetésbe való belépése eredményezi a vezetőképesség függvény következő lépcsőjét. A vezetés kvantáltságát tehát a csatornán belüli energiaszintek csatornaszélességtől függő kvantáltsága okozza.

A kvantumpötty

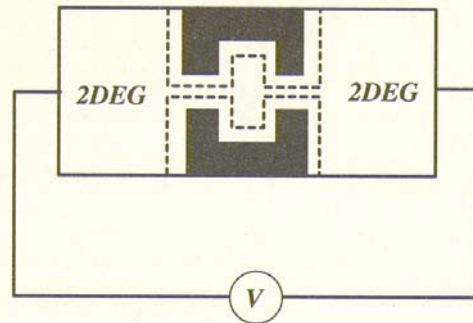
Az előbbi kísérletben az elektronok mozgását egydimenziósra korlátoztuk. Nézzük meg, hogy mi történik, ha mozgásterületet tovább szűkítjük, s bezárjuk őket egy minden oldalról korlátos parányi tértartományba. Ezt a kvázi nulladimenziós konstrukciót nevezzük kvantumpontnak vagy kvantumpöttynek. (quantum dot, rövidítve QD). Ha bezárom az elektront egy kicsiny térrészbe, akkor a térrész mérete szabja meg a kialakuló energiaszinteket, s ezáltal azt is, hogy milyen színű fénnel tudom a bezárt elektront az egyik energiaszintről a másikra gerjeszteni. Tehát ha valaki kvantumpöttyöt készít, akkor a mérettel befolyásolhatja az elektromos és az optikai tulajdonságokat is.

Többféleképpen lehet kvantumpöttyöt létrehozni, például a kvantált ellenállásnál felállított kísérlet apró módosításával is. Ekkor a két elektródát U alakban helyezzük rá a heterogén félvezető struktúrára, így az U alak által közbezárt területen és a környező 2DEG rétegben tartózkodhatnak elektronok, míg az elektródák alatt nem.



ionokkal való bombázással eltüntetik a félvezető minden olyan részét, ami nincs fémmel borítva, így csak a fém alatti kis terület marad meg izoláltan az eredeti kvantumárokából.

Figure 4.4 A quantum dot using QPCs



Note: An indication of how split-gates may be patterned to form a box-like confining region for electrons in the 2DEG. The result is two QPCs in series, with a 'quantum dot' between them. Because the depletion region can extend beyond the confines of the metal electrodes, the quantum dot can be isolated from the 2DEG outside the confining region, by pinching-off the QPCs. The only way electrons can enter the dot is by quantum mechanical tunnelling.

Persze kvantumpöttyöt hagyományos félvezető technológiákkal is létre lehet hozni: Első lépésben egy megfelelő anyagréteggel vonják be a Si-lapka felületét, majd ezt kimaratják egy elektronsugárral (1) ott ahol a kvantumpöttyöt létre akarják hozni (2). Ezután fémréteggel vonják be a felszínt (3). Utána oldószerrel eltávolítják a bevonóanyagot a félvezető tetejéről, így fém csak a leendő kvantumpötty tetején marad csak meg (4). Legvégül reaktív

A kvantumdióda

A kvantumárok és pöttyök energiaszint szerkezetének vezérlésével képesek vagyunk elektronokat beengedni, vagy megállítani. Így igazából áramot vezérelhetünk, pontosan úgy mint egy dióda, esetünkben azonban mindezt nanométeres méretben történik, egyszerre

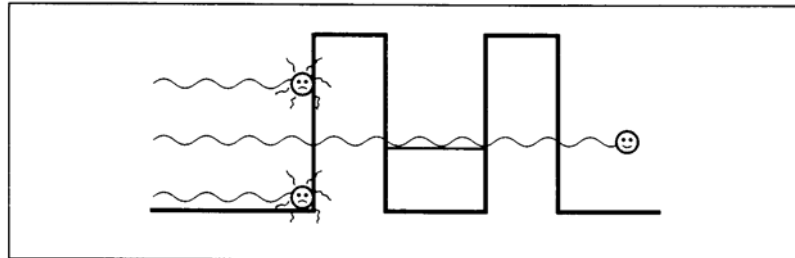
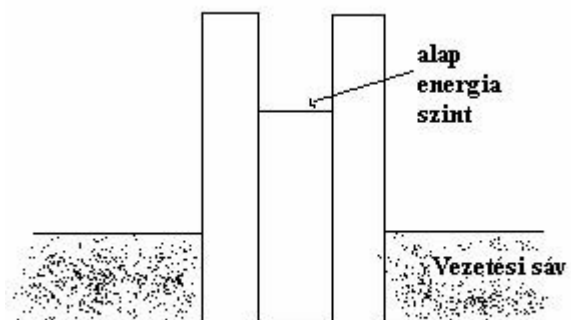


Figure 9.3 A double barrier structure containing a quantum well. Electrons with an energy corresponding to the quantum state in the well can tunnel through the structure with ease.

csupán néhány elektront mozgatunk, minimális a disszipált energia és a fogyasztás. De lássuk most, hogyan is működik egy kvantumdióda.

Azt tudjuk már, hogy ha potenciálgátakat emelünk, akkor azokon csak az olyan elektronok tudnak átjutni, amelyek a gát túloldalán találnak egy ugyanolyan energiaszintet, mint amin az adott elektron van. Ekkor a potenciálgáton való átjutás alagúteffektus segítségével történik. A belső részről, úgy tud az elektron továbbjutni, ha a külső térrészben (jobboldali 2DEG) szintén



talál egy ugyanolyan energiájú energiaszintet. Ha a belső térrész kicsi, akkor lehet, hogy a belül lévő legalacsonyabb energiájú állapot is magasabban lesz, mint a külső 2DEG vezetési sávjában az elektronok energiája. Tehát a kvantumpötty szigetelőként fog viselkedni.

Szerencsére nemcsak a potenciálgátak által közbezárt kvantumpötty energiaszintjeit tudjuk tervezetten beállítani, de akár a kvantumpöttyön kívüli térrészben lévő energiaszinteket is könnyen módosíthatjuk, ha külső feszültséget kapcsolunk a rendszerre. Kezdetben a diódánk nem vezet, mert a kvantumpöttytől balra lévő

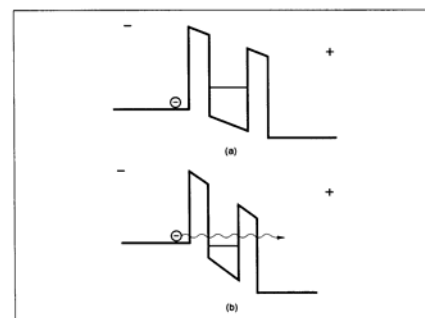
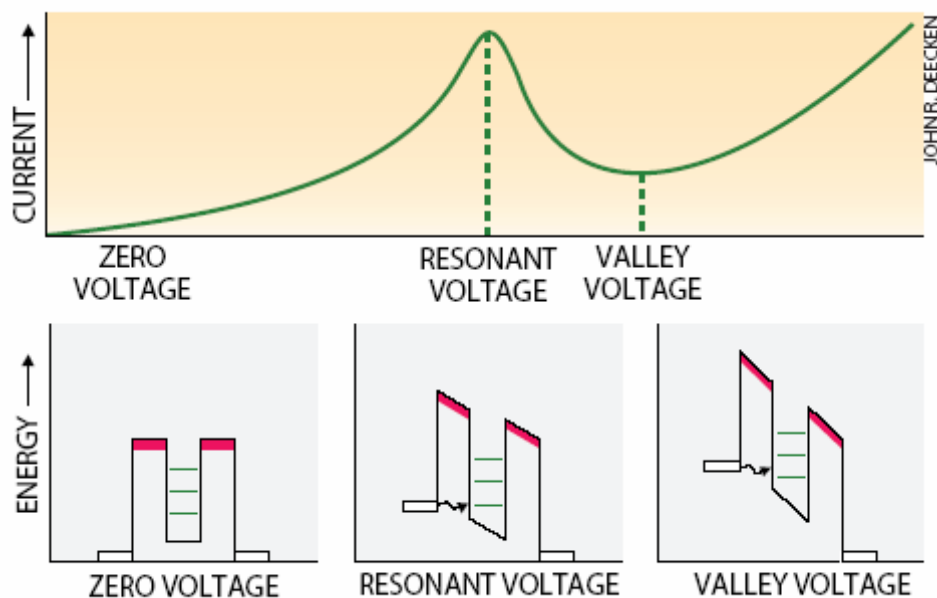


Figure 9.4 Schematic diagram of the conduction band edge in a double barrier system. In (a) the applied voltage is small and the electron cannot tunnel through to the positive side. In (b) the applied voltage is large enough so that the electron energy on the negative side is equal to the energy of the state in the quantum well.

2DEG rétegben lévő elektronok energiája kisebb, mint a kvantumpötty alapállapot energiája. Ekkor az elektronok nem juthatnak át még alagúteffektus segítségével sem. Ha növeljük a rendszerre adott feszültséget, akkor ezzel egyre lejjebb visszük a kvantumpötty belsejében (ill. a jobboldali térrészben) lévő energiaszinteket. Ha a benti E_0 energiaszint a 2DEG elektronenergiáinak tartományába esik, akkor a megfelelő energiájú elektronok alagúteffektussal át tudnak jutni a gáton, s megindul a vezetés. Valójában egyszerre csak egy elektron léphet be a kvantumpöttybe, mert ha az első már bejutott, akkor a következő belépését ebbe a parányi térrészbe a már ott levő elektron erős elektrosztatikus taszítása megakadályozza (Coulomb blokádnak). Úgy is fogalmazhatnánk, hogy az első elektron bejutása a második elektron számára jelentősen megnöveli a betölthető energiaszinteket. A kvantumpöttyből az ott levő elektron a jobbra lévő 2DEG rétegbe alagúteffektussal könnyen továbbléphet, hiszen az ottani vezetési sáv felső részén talál betöltetlen energiaszinteket. Így tehát egy olyan vezetési mechanizmus alakulhat ki, amelyben egyszerre csak egy-egy elektron vesz részt a vezetésben (egyelektronos áram).

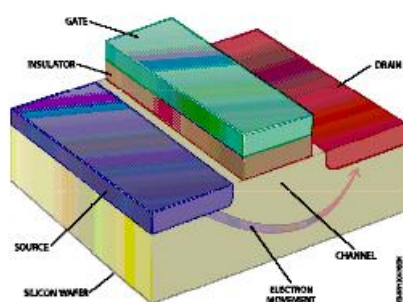
Ha a rendszerre adott feszültséget lineárisan változtatjuk, akkor az áramerősség valójában a következő függvény szerint változik:



A 2DEG vezetési sávjának felső energiaszintjei a Boltzmann eloszlás szerint gyéren betöltöttek, az energiasáv alján lévő állapotokban található a legtöbb elektron. Éppen ezért ahogy a feszültség növelésével a belső E_0 energiaszint egyre lejjebb kerül, az áramerősség

növekedése egyre gyorsabb ütemű, majd eléri maximumát, amikor E_0 a 2DEG legjobban benépesült állapotainak tartományába esik (rezonancia feszültség). A feszültséget tovább növelve az áramerősség csökkenését tapasztaljuk, mert a benti E_0 állapot a külső vezetési sáv alá kerül, s ezáltal a továbbiakban már nem vesz részt a vezetésben. A növekvő feszültség hatására bekövetkező áramerősség-csökkenés tartományában valójában negatív ellenállásról beszélhetünk. Amint a kvantumpötty egyre lejjebb tolódó E_1 állapota dominánsabbá válik a vezetésben, az áramerősség egyre nő, s egy újabb rezonancia csúcs következik. Ez a periodikus mintázat ismétlődik a továbbiakban is, amint a benti energiaszintek egymás után bekerülnek a vezetésbe ill. kicsúsznak a vezetésből.

Térvezérlésű kvantumtranzisztor

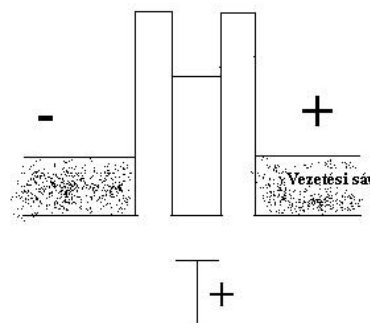


FIELD-EFFECT TRANSISTOR, the workhorse of data processing, is built as a sandwich of variously doped silicon layers. It contains a channel, a source, a drain and an insulated gate. When a positive voltage is applied to the gate, electrons move near the insulation, establishing a conduction underneath it that allows current to pass from source to drain, switching the transistor on.

Az ábrán a hagyományos térvezérlésű tranzisztor látható. A térvezérlésű tranzisztor lényege, hogy két elektróda között folyó áramot egy harmadik ún. kapuelektrodára adott feszültséggel vezéreljük. A kapuelektrodát az áramot vezető szennyezett félvezetőrétegtől egy szigetelőréteg választja el.

A kvantumdiódán alapuló térvezérlésű kvantumtranzisztor a következőképpen működik:

A kvantumpötty belső energiaszintjeit nem a teljes rendszerre kapcsolt külső feszültséggel változtatjuk, hanem alá (vagy fölé) viszünk egy elektródát, s az arra adott feszültséggel tologatjuk az energiaszinteket. Ezt a feszültséget változtatva, csak a gödörbeli energiaszinteket módosítjuk. Amint azt a kvantumdiódánál már láttuk, a belső térrészben a Coulomb blokkolás miatt egyszerre csak egy elektron léphet be. Ez valójában, egy 1 elektronnal működő térvezérlésű kvantum tranzisztor. Ezen az alapon rendkívül precíz áramstandardot is lehet készíteni.



Korábban láttuk, hogy hogyan lehet kvantumpöttyöt előállítani maratásos technikával, vagy egy kétdimenziós elektrongáz (2DEG) fölé elektródákat elhelyezve (ami különböző térrészekbe szeparálja az elektronokat). A kvantumpötty úgy viselkedik a valóságban, mint egy mesterséges atom. Diszkrét energiaszintjei vannak, de mivel lényegesen nagyobb, mint egy atom, ezért energiaszintjei egymáshoz közelebb helyezkednek el, ezért a látható fény helyett általában a hosszabb hullámhosszú infravörös sugárzással lehet gerjeszteni. Azt is mondhatjuk, hogy a kvantum pötty nem más, mint egy kívülről vezérelhető atom, mivel a tulajdonságait kontrolláltan, pl. az elektródákra adott feszültség megváltoztatásával, tudjuk módosítani. Ezek alapján olyan anyagot is csinálhatunk, aminek a tulajdonságai hangolhatók.

Kvantum interferencia tranzisztor

A kvantum interferencia tranzisztor működése az elektronok hullámtermészetén alapul. A rendszer belsejében haladó elektronáramot megosztjuk, majd újra egyesítjük. Az összetalálkozásnál az interferencia jelensége miatt, kioltás, illetve erősítés jöhet létre. Ha a két ág teljesen azonos, akkor azonos fázisban találkoznak az elektronok, így ugyanakkora áram fog folyni, mint a megosztása előtt. Ez az elrendeződés azonban lehetőséget nyújt az elektronok ágankénti manipulálására.

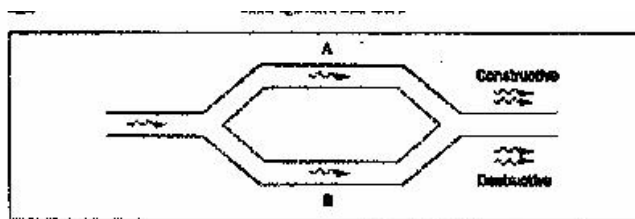


Figure 9.4 A structure for demonstrating interference of electron waves. Differences between the two paths may produce destructive, rather than constructive, interference.

Megfelelően alkalmazott elektromos

vagy mágneses térrel az egyik ágban haladó elektronok hullámfüggvénye akár 180 fokkal is eltolható, így teljes kioltást érhetünk el. A kvantum interferencia tranzisztor lényege, hogy az egyik ágföle helyezett elektródával lehetőség nyílik a rendszerben folyó áram vezérlésére.

Természetesen más elrendeződések is elképzelhetők, mint pl. az ábrán látható T-alakú elrendezés. Ebben nincs megosztás. Az elektron, mint hullám, a rendelkezésére álló teljes teret letapogatja. A T egyik száránál elhelyezett kapuelektrod teszi lehetővé az áram befolyásolását.

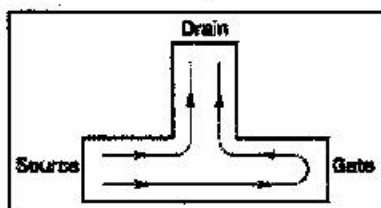


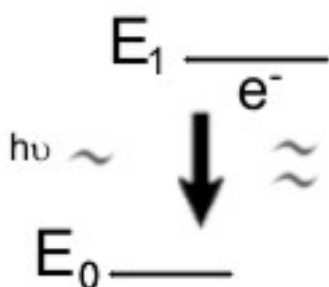
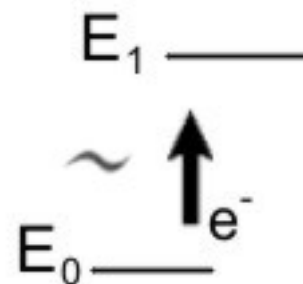
Figure 9.10 Interference of electron waves in a T-shaped structure can be considered to arise as a result of electrons following two different paths, as indicated.

Lézerek

Hagyományos lézer

Vegyünk két energiaszintet E_0 és E_1 . Ha itt van egy elektron és ezt a rendszert megfelelő hullámhosszú fénnyel besugározzuk, ($h\nu = E_1 - E_0$ energiájú fénnyel), akkor elő tudjuk azt idézni, hogy ez az e^- gerjesztett állapotba kerül és átugrik az E_1 energiaszintre. Előbb utóbb spontán emisszióval ez az elektron visszatér az E_0 energiaszintre (hacsak ez nem egy tiltott átmenet).

Einstein hívta fel a figyelmet, hogy ez a visszatérés nemcsak így történhet, hanem más módon is: az ún. indukált emisszióval.



A gerjesztett állapotban lévő e^- -t besugározzuk egy fotonnal, ami szintén $E_1 - E_0$ energiájú, akkor ez visszabillenti az e^- -t alapállapotúvá és akkor még egy ($E_1 - E_0$ energiakülönbségnek megfelelő) foton bocsát ki, ami valójában egy pont olyan (koherens vele, fázisban rezeg) foton, mint amivel besugároztuk, lényegében megduplázódik a fotonok száma.

/a spontán emisszió során is E_1 -ből E_0 -ba való visszatéréskor foton-kibocsátással szabadul meg a fölösleges energiától/ Ezt hívják indukált emisszióknak és ezen alapul a lézer működése. Na hogyan?

Ha meg tudjuk csinálni azt, hogy veszünk egy olyan rendszert, ahol az e^- -ok ebben az E_1 -es gerjesztett állapotban vannak nagy számmal, és ezt besugározom egy megfelelő frekvenciájú fotonnal, akkor az kezdetben visszabillent egy e^- -t, ebből így indukálódik két foton. Azonban ha ebben a rendszerben sok ilyen e^- van, és az indukáló fotonok sorra billentgetik vissza ezeket, akkor mindig olyan fénykissugárzás történik, ami fázisban van, ami koherens, tehát teljesen egyforma fotonok jönnek ki. Így ennek az a vége, – ha sok ilyen tudok visszabillenteni, – hogy beindul egy láncreakció-szerű folyamat, hogy teljesen fázisban, koherensen nagyon nagy számú pont azonos foton keletkezik. Ez az egy lézerimpulzus.

Mi a probléma?

Ha veszek egy rendszert, abban a részecskék (e^- -ok) a legkisebb energiájú állapotban vannak túlnyomó részben. A Boltzman statisztika mondja meg, hogy mennyi lesz E_1 gerjesztett állapotban (annál kevesebb minél nagyobb ez az energiakülönbség, de ettől is exponenciálisan függ). Tehát egy parányi töredéke van az e^- -oknak ebben az állapotban, a túlnyomó része E_0 -ban (alapállapot) van. Ha ezt besugározzuk fénnyel, akkor ami E_0 -ban van azt átbillenti E_1 -be, ami pedig gerjesztett volt azt visszabillenti alapállapotba és mivel sokkal több van E_0 -ban mint E_1 -ben ezért nem fény kisugárzást fogunk tapasztalni, hanem ilyenkor elnyelődik a foton. (abszorpció)

Ahhoz hogy az indukált emisszió megtörténjen, valamilyen trükkal el kell érni, hogy gerjesztettkben legyen a sok e^- és ne alapállapotban. Ezt úgy hívják, hogy populáció inverzió. (valahogy meg kell fordítani azt a természetes folyamatot, hogy E_1 -ben legyen a sok és nem E_0 -ban)

Fénnyel nem lehet ezt megcsinálni, mert ugyan gerjeszti az E_0 -s e^- -okat, de ugyanakkor az E_1 -ben lévőket visszabillenti... ettől nem fordul meg. A következő trükköt szokták alkalmazni: vegyünk egy olyan rendszert, amiben E_2 a következő energiaszint és valamilyen módon (lehet fény is, de általában valamilyen kémiai reakció) azt kell megvalósítani, hogy először E_0 -ból E_2 -be átbillenjenek az e^- -ok. Innen akár spontán folyamatok révén akár konverziós folyamatok révén (ütközések során átadja a rotációs gerjesztési szintek energiáját), átmegy E_1 -be és ha az $E_1 - E_0$ átmenet egy félig-meddig tiltott átmenet (nem olyan könnyen megy magától át), akkor valójában el tudom azt érni, hogy ezen a cikluson keresztül az E_1 energiaszintre felpumpáljuk az e^- -okat. Ha ezt elértem valahogy és besugározom megfelelő energiájú fénnyel, akkor ki tudok váltani egy ilyen láncreakció-szerű hatást... így megsokszorozva a fotonok számát. A jobb lézerhatás érdekében ezt igazából úgy szokták megvalósítani, hogy az „indukáló-doboz” végeire tükröt raknak: ekkor a fotonok ide-oda verődnek, még sokszorozódnak és a kibocsátott fotonok tényleg pont egyirányúak, azonos fázisúak... ugyanolyanok. Ha ez pl. egy félig áteresztő tükör akkor mindig csak egy része megy ki a többi pedig ide-oda verődik... és ebből adódik egy ilyen impulzusszerű működése a lézernek. Így működnek a hagyományos lézerek.

Kvantum kaszkád lézer

/Emlékeztetők, előzmények (13. óra): kvantum árkok, energiagátak, potenciálgödrök, alagútdióda.../

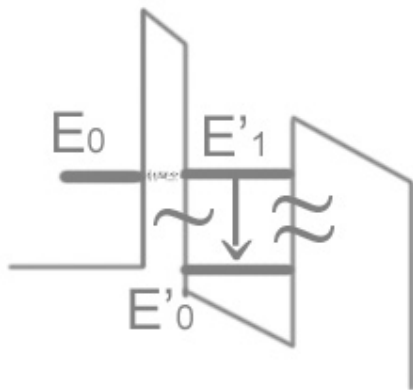
Azt hogy a potenciálgödörben milyen energiaszintek vannak a gödör mérete határozza meg, ha tudjuk kontrollálni a méretet (pl. rétegnövesztéses párologtatásos technológia), akkor beállíthatjuk az energiaszinteket. Azonban nemcsak a mérettel tudjuk szabályozni, hanem a rá kapcsolt feszültség függvényében is tudjuk fel-le tologatni ezeket az energiaszinteket. Azaz egy elektródán keresztül is vezérelhetjük az energiaszintek helyzetét.

Valójában az energiagáton akkor tud átmenni alagúthatással az e^- , ha kívül is van egy pont olyan energiaszint, ami megfelel egy bentinek. Ha a kinti szintnek nincs a kvantumárokban megfelelője, akkor az e^- nem talál megfelelő energiaszintet: nem tud átmenni. A teljes átmenet csak akkor működik, ha kívül, belül és a túloldalon is van megfelelő energiaszint.

Valójában ezen az alagúthatáson alapul a kvantum kaszkád lézerek elve. A trükk lényege, hogy kell sok-sok ilyen potenciálgödör, amelyek energiaszintjeit egyrészt a méretükkel, másrészt a rendszerre kapcsolt feszültséggel állítjuk be.

Ez egy vékony réteges struktúra sok-sok kvantumárokkal, ami úgy van beállítva, hogy az egész rendszernek lesz egy lejtése a rá adott feszültségnek megfelelően.

A külső fémelektródon vagy tömbanyagon van egy energiasáv, ahol vannak szabad e^- -ok. Kezdődjön a struktúra egy vékony réteges kvantum árokkal (nevezzük K1-nek).



Legyen az első potenciálgödörben lévő alap energiaszint olyan, hogy a külső energiasávról be tudjanak lépni alagúthatással az e^- -ok. Ezt követi egy szélesebb kvantumárok (nevezzük K2-nek), ezt az jellemzi, hogy az energiaszintek egyrészt lejjebb helyezkednek el, másrészt közelebb helyezkednek el egymáshoz. És legyen úgy ki alakítva ennek a mérete, valamint a ráadott feszültség olyan, hogy ennek az első gerjesztett szintjére tudjanak belépni az előző potenciálgödör alapállapotú e^- -jai. (Azaz ha ügyesek vagyunk, akkor el lehet érni, hogy az első kvantumárok alap energiaszintje megfelel a szélesebb gödör első gerjesztettjének.)

Most ott tartunk, hogy megvalósítottunk egy populáció-inverziószerű dolgot, mert ebben a rendszerben a K2 első gerjesztett energiaszintjén generálódnak az e^- -ok. Ezt szeretnék kihasználni a lézerhatásnál is, ezek lesznek azok az e^- -ok, amik indukált emisszióval lemennek majd az alap energiaszintre.

Probléma: Indukált emisszió során az e^- -ok alapállapotba kerülnek. Valahogy biztosítani kell, hogy ne gyűljenek fel az e^- -ok a K2 alap energiaszintjén, mivel ekkor a besugárzott foton ezeket fogja gerjeszteni és elnyelődik. A jó lézerhatás elérése érdekében innen tovább kell vezetni ezeket az e^- -okat.

Megoldás:

Előzmény: ha több azonos kvantumpöttyöt egymás mellé teszünk, akkor azok kölcsönhatásba lépnek egymással és valójában energiasávok (sok-sok energiaszint) alakulnak ki.

Itt is, ha több ilyen kvantumárkot egymás mellé rakunk, akkor el tudjuk érni azt, hogy legyen egy tartomány (energiasáv), ami azt fogja eredményezni, hogy az az e^- , ami K2-ben lekerül

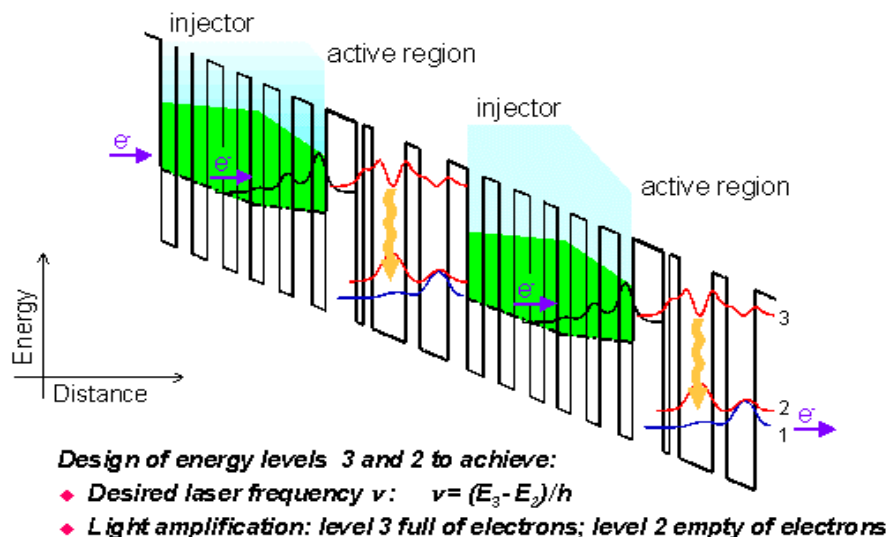
alap állapotba, az nagyon gyorsan (mivel több állapotot is talál) továbbmegy ebbe a rendszerbe.

Kaptunk egy ilyen elemet: K1 alap energiaszintjéről K2 első gerjesztettjébe becsatolódnak az e^- -ok, ott várnak, ha ezt a megfelelő fénnel besugározzuk, (ami pont az energiakülönbségnek felel meg) akkor történik egy indukált emisszió, a fotonok megsokszorozódnak.

Ez csak egy kis szelete a kvantum kaszkád lézernek. Azonban ezt tudjuk folytatni! Ezt a struktúrát ismételve egyetlen e^- -nal nem egy foton lehet kibocsátani, hanem akár több tucatot is. Csupán egy olyan réteges anyagot kell csinálni, hogy megfelelő méretűek legyenek ezek a kvantumárok, és ennek megfelelően legyenek az energiaszintjeik. Az e^- kibocsát egy foton és ezt újra és újra meg tudja tenni. Egy-egy ilyen elem vastagsága nanométer nagyságrendű, így ha csinálunk egy mikrométer vastagságú eszközt, akkor ezt több 100-szor is meg lehet vele ismételteni. Mialatt végigmegy rajta az e^- , akár 25-50 foton is kibocsát közben.

Quantum design of QC-laser

J. Faist, F. Capasso, C. Sirtori, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, A. L. Hutchinson, S. N. G. Chu, and A. Y. Cho, *Appl. Phys. Lett.* **68**, pp. 3680-3682 (1996).



Lépcsőzetesen halad az e^- egyre lejjebbi energiaszintekre. Úgy megy végig ezen a rendszeren, hogy közben akár 50 foton is kibocsát. Ez egy nagyon effektív lézer, sokkal jobb a teljesítménye, sokkal jobb energiahasznosítással dolgozik, mint a hagyományos lézerek. Nagyon precízen kell tudni építkezni, a méreteket tervezni, az energiaszinteket összehangolni, de ha ez technikailag jól meg van oldva, akkor az alagúthatás révén el tudom érni azt, hogy irányítottan lépeget az e^- .

A rétegek abban különböznek, hogy mivel vannak szennyezve (Si, Ge). És ha megfelelő simaságúra le van csiszolva, akkor azon még verődik is ide oda a keletkezett foton, még erősebb lézer hatás.

Ez egy új technológia (bő 10 éves) és sok tekintetben jobb tulajdonságokkal bír, mint a hagyományos lézerek. Általában az infravörös tartományban működnek. A kvantumárok energiaszintjeinek szeparáltsága miatt 1-2 mikrométeres hullámhossztartományban bocsátja ki a fotonokat.

Szupravezetés, Josephson effektus

Mi is áll az ellenállás hátterében?

Ha az atomtörzsek teljesen szabályosan egy tökéletes kristályban helyezkednének el, akkor nem lenne ellenállás.

Azonban a valóságban nincsen ilyen tökéletes kristály.

- egyrészt a hőmérséklet miatt az atomtörzsek nagyjából helyhez kötötten rezegnek és nincsenek tökéletes térbeli periodicitásban sem
- másrészt minden reális kristályban vannak rácshibák, diszlokációk

Az első feltételbe bele tudunk szólni, tehát ha elkezdünk hűteni egy fémeket, akkor a hőmérséklet csökkenésével mérséklődik az atomtörzsek rezgése is, a kristály egyre tökéletesebbé válik. A rácshibák miatti ellenállás viszont mindenképpen megmarad.

Így azt várhatnánk, hogyha elkezdünk hűteni egy vezetőt akkor annak az ellenállása a hőmérséklettel arányosan lineárisan csökken, de mindig marad egy minimális – a rácshibákból adódó – ellenállás.

A szupravezetés felfedezésekor – 1910-es évek tájékán – az alaptapasztalat az volt, hogy bizonyos anyagok (szobahőmérsékleten kevésbé jó vezetők) ellenállása egy darabig, ahogy azt várni lehet, a hőmérséklettel arányosan csökkent, azonban egy adott hőmérsékleten (az abszolút nullához közeli) hirtelen (néhány ezred fokon belül) leesett nullára. Ez egészen más mint, amit várhatnánk, hogy a kristályhibák miatt mindig marad ellenállás, valamint az is érthetetlennek tűnt, hogy miért ugrik ilyen hirtelen az ellenállás nullára.

E kérdésekre 1957-ben sikerült kielégítő választ adni. Az elmélet középpontjában az áll, hogy teljesen megváltozik a vezetés mechanizmusa, a szupravezetést nem kezelhetjük a hagyományos vezetés kiterjesztéseként. Szupravezetés folyamán az e^- -ok párokba rendeződve mozognak. Ez egy igen meglepő eredmény volt és két fontos kérdés is felmerült. Miért tesznek így az e^- -ok (hiszen negatív töltésük révén taszítaniuk kellene egymást) és pontosan hogyan is mozognak így nulla ellenállást eredményezve.

A miértre könnyű a válasz. Két e^- együtt alacsonyabb energiaállapotot képvisel, mint külön-külön. Hasonlóan ahhoz, hogy a hidrogén molekulát alkot.

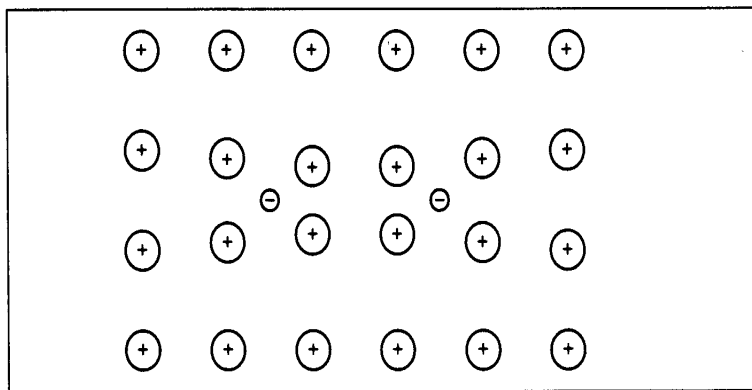


Figure 10.1 If one electron distorts a regular grid of positive ions it produces a concentration of positive charge which attracts a second electron.

A mozgó e^- -pár deformálja az atomtörzsek elhelyezkedését (kissé összehúzza az e^- irányába) az ábrán látható módon. Amerre az e^- éppen halad ott pozitív töltéstöbblet lesz, és ez az energia éppen elég ahhoz, hogy még egy e^- -t odavonzzon, így kialakítva az e^- -párokat (medicinlabda-gumiasztal hasonlat)

Kialakul egy kollektív mozgás, lényegében párként mozognak.

Szupravezető esetén, ha tekintünk egy köráramot, akkor abban az áram veszteség nélkül örökké folyik. Vannak kísérletek melyek ezen köráramok csillapítását vizsgálják, de hiába tartanak ezek már több 10 éve, máig sem sikerült mérhető intenzitáscsökkenést megállapítani.

Egy másik érdekes tapasztalat az, hogy egy sor különböző anyag képes szupravezetésre, addig a legjobb vezetők nem. Erre az a magyarázat, hogy nem képesek párokba szerveződni az e^- -ok, mivel az atomtörzsek és e^- -jaik kölcsönhatása itt viszonylag gyenge, egy laza kapcsolat, így nincs elég energia a párokba szerveződéshez. (nem jön létre lokális töltéstöbblet). Míg a nem annyira jól vezető anyagok esetén ez a kölcsönhatás erősebb, így magyarázható a szupravezetővé való válásuk is.

Miért kell az alacsony hőmérséklet ehhez a vezetési mechanizmushoz? Mivel az atomtörzsek saját (hő)rezgése elrontaná a „tökéletes kristályt”.

Mivel itt e^- -párok képviselnek egy egységet, teljesen másként viselkedik és másként is kell vizsgálnunk, mint a szabad e^- -ok vezetését. Egy e^- -pár az egy egész spinű részecske, merőben más tulajdonságokkal, mint egy különálló feles spinű e^- . Egész más szabályok lesznek érvényesek. Az e^- -ról azt tudtuk, hogy egy adott energiaállapotot azt egy e^- foglalhat el. Az egész spinű részecskénél pedig egy adott állapotot akárhány elfoglalhat. A szupravezetés vizsgálatánál kiderült, hogy itt egy olyan kollektív mozgás alakult ki, ahol az összes e^- -pár ugyanabban az energiaállapotban van. (autópálya-hasonlat, Σ átlagseb=0)

Az egész rendszert csak úgy (ellenállás: ki kell billenteni egy adott állapotból...) lehet kibillenteni (ellenállást ébresztetni), hogy az összes e^- -t átbillentjük egyszerre. Ennek a valószínűsége nagyon közelít a nullához. Gyakorlatilag nem lehet átbillenteni, és ezért ellenállást sem fogok tapasztalni.

Mire lehet felhasználni a szupravezetést?

60-as években vizsgálták az elektromágneses tér hatását a szupravezetésre. Az volt a tapasztalat, hogy megfelelő nagyságú EM tér szét tudja zúzni az e^- -párok kollektív mozgását, megint egyénileg kezdenek el mozogni, megszűnik a szupravezetés.

Kísérlet: két szupravezető közé vékony réteg szigetelőt helyezünk, és próbálunk áramot folyatni. Mi történik a szigetelőhatáron?

Ha ez a szigetelő egy vastagabb réteg, akkor a tapasztalat azt mutatja, hogy megszűnik a szupravezetés. Ennek az az oka, hogy e^- -párok nem tudnak átjutni – még alagúthatással sem – a szigetelőn, szétesnek a párok (kisebb részecskék esetén az alagúthatás is hatékonyabb).

Vékonyabb réteg szigetelő (kb. 1-2 nm) esetén az e^- -párok képesek alagúthatással átmenni, megmarad a szupravezetés. A szigetelő anyagban is szupravezetés lesz, azonban ez a leggyengébb láncszeme a rendszernek. Ha erre mágneses teret kapcsolok, akkor legelőször ebben fog megszűnni a szupravezetés. Ezen az elven alapul a Josephson kapcsoló:

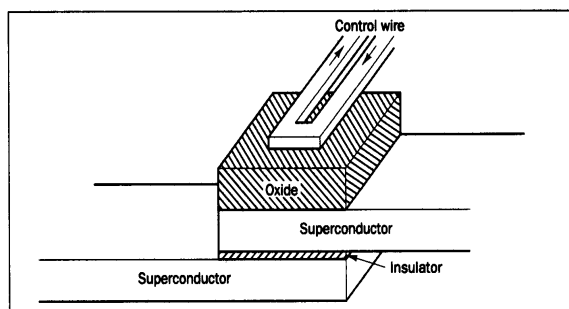


Figure 10.2 A Josephson junction.

A fenti kontrollhurokkal (nagyon kicsi árammal ill. nagyon kicsi feszültséggel) tudom azt szabályozni, hogy legyen az alsó rendszerben szupravezetés vagy ne legyen.

A mai memóriaelemek egy része is úgy működik, hogy folyik-e áram egy adott ágba vagy sem.

Előnye, hogy nagyon pici feszültséggel (század, ezredvoltage), nagyon gyorsan (tized nanoszekundum) lehet vezérelni.

Nagyon kevés töltést kell megmozgatni, nagyon kicsi az a diszzipálódó hő, ami egy ilyen kapcsolási esemény közben felszabadul.

A mai technológia egy bit információváltást 200-300 e- mozgásával ér el. A 80-as évek elején (a magas hőmérsékletű szupravezetésre felfigyeltek 120-150 Kelvinen, ehhez már folyékony hélium helyett folyékony nitrogén is elég volt) gondolták azt, hogy az informatikában majd óriási áttörést jelentenek a szupravezetőkkel készített számítógépek. Csak szupravezetőkkel építeni számítógépet elég vad ötlet, mivel a teljes rendszer adott kis hőmérsékleten tartása igen nehéz feladat., azonban lényegesen több fantázia van abban, hogy beintegráljuk a szupravezetőket a hagyományos technológiákba és egyes részeket (CPU, memória) készítsünk csak szupravezetőkkel.

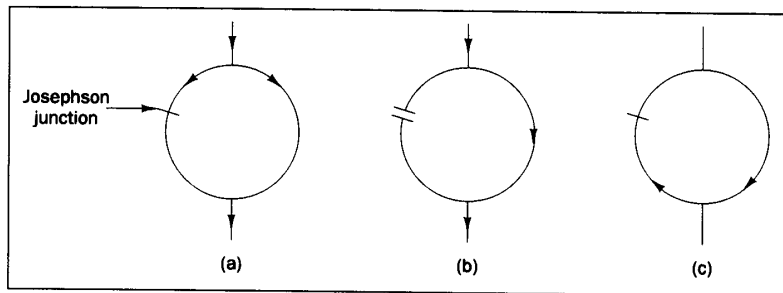


Figure 10.3 Principle of a memory element based on a loop of wire containing a Josephson junction. In (a) the junction superconducts and current flows through both arms of the loop. If the weak link is broken (b), current flows through only one arm. When the input current is switched off (c), a circulating current remains in the loop.

A Josephson effektust kihasználva nagyon egyszerűen készíthetünk (egy bitnyi információ-tárolásra alkalmas) memóriaelemeket is. Vegyünk egy szupravezető hurkot, ennek egy kijelölt pontján legyen egy szigetelő (oxid) réteg vezérlő hurokkal: azaz egy Josephson kapcsoló.

Ha ezen hurkon keresztül áramot folyatok, akkor mindkét szupravezető ágba folyik áram. Ha azonban a kapcsolóra feszültséget kapcsolunk (a mágneses tér megszünteti), akkor csupán az egyik ágba lesz áram.

Ha kikapcsolom a főáramot, akkor a Josephson kapcsoló állásától függően a következő történik:

1. megmarad egy örök köráram a hurokban (ha nincs fesz. A J-kapcsolón) /1-est tárol, a J-kapcsolóra fesz. adva törölhetjük!/
/0-t tárol/
2. nem lesz semmi áram (ha a J-kapcsoló mágneses tere megszünteti a szupravezetést)

Ez egy nagyon gyors és kis energiafelhasználású technológia, „csupán” a hőmérsékletet kell szinten tartanunk. A mai fejlesztési irányvonalak is abba az irányba mutatnak, hogy tisztán szupravezetők alkalmazása az nem járható út de az integrált technikák megvalósítása gyorsan fejlődik és jelentős teljesítménynövekedést, ill. (energia) költség-csökkentést tudunk elérni e téren.

Kvantumszámítógép

Milyen jellegű újfajta molekuláris számítási módok lehetségesek – ezeket szokták úgy nevezni, hogy kvantumszámítás ill. kvantumszámítógép. Napjainkban is csak nagyon kezdetleges rendszerekről tudunk, messze állunk még attól, hogy komplett kvantumszámítógépet építsünk, és inkább csak demonstrált elvekről van itt szó.

Ha jobban belegondolunk, akkor egyedi molekulákkal is megvalósíthatunk számítási feladatokat ill. összerakhatók olyan elemek, amik alapján bármínemű számítást meg lehet valósítani. Bizonyos tekintetben, ha molekulákkal végeztetünk számítást, akkor a kvantummechanikai törvények alapján, valójában egy nagyon masszív, parallel kalkulációra van lehetőség

Egyszerre, egy pillanat alatt lehet nagyon sokféle kezdeti feltételhez generálni végeredményt. Ha egy atomot választunk információ hordozónak, akkor nagyon sok logikai művelet könnyedén megvalósítható. Miért is lehet ill. miért célszerű egy atomot választanunk információhordozónak?

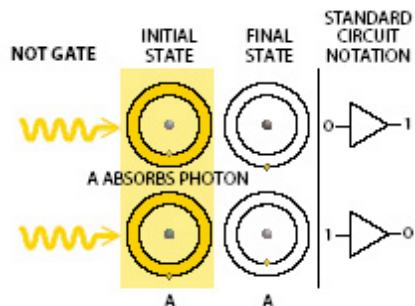
Pl.: legyen egy hidrogénatom az információhordozó. A 0 állapot feleljen meg annak, hogy az elektronja alapállapotban van, az 1-es pedig a gerjesztett állapotnak. (a H atom nem túl stabil így magában és az állapotok között magától is végbemehet ugrálás, de ettől most tekintsünk el, és vegyünk egy olyan rendszert, ahol pl. a gerjesztettből való visszatérés egy félig-meddig tiltott átmenet és önmagától nem megy végbe.) Az e- két állapotát használjuk fel az információtárolásra. Az, hogy egy atom egyáltalán használható információtároló egységként az oda vezethető vissza, hogy kvantummechanika szerint az atomoknak diszkrét állapotai vannak, az információnak szintén.

Átbillenteni könnyen tudjuk: besugározzuk a megfelelő energiájú fénnyel. A visszabillentés is ugyanilyen egyszerű, indukált emisszió történik.

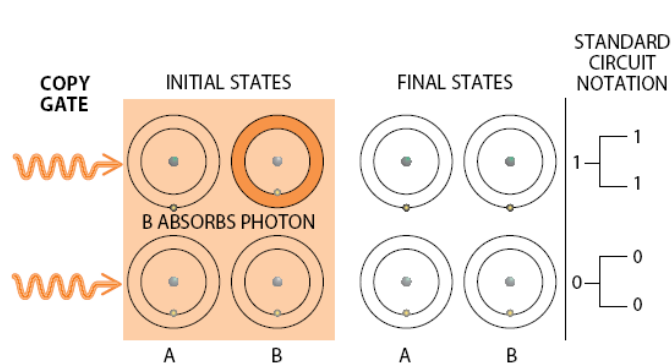
Le is tudjuk tapogatni, hogy milyen állapotban van. Vegyünk egy a gerjesztett állapot feletti energiaállapotot. Sugározzunk be a két gerjesztett állapot különbségének megfelelő energiájú fénnyel. (ez különbözik az alap és az első gerjesztett energiakülönbségtől) Ekkor:

1. ha alapállapotban volt, akkor ott is marad, a fény továbbhalad
2. ha gerjesztettben volt, akkor a magasabb gerjesztetre ugrik, ahonnan majd spontán úgylis visszatér, a fény elnyelődik (abszorpció)

Elvben akár egyetlen atom is használható arra, hogy egy elemi információtároló egységet kialakítsunk. Minden számítási folyamat során az információval műveleteket kell végezni, manipulálni kell. Hogyan lehet egyszerű elemi logikai transzformációkat lényegében fényimpulzusok segítségével elvégezni? Meg lehet azt mutatni, hogy bizonyos alapvető logikai műveletek el tudunk végezni (NOT-AND-COPY), akkor ezekből bármiféle logika felépíthető.



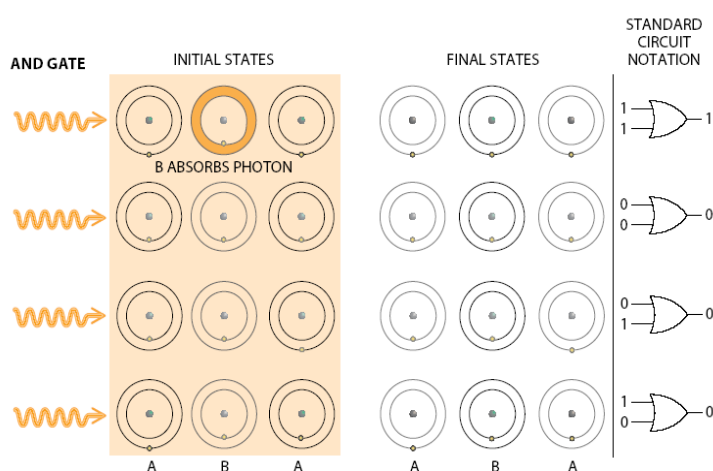
NOT kapu: arra szolgál, hogy átfordítsuk a rendszert a másik állapotába. Nagyon egyszerű a mechanizmusa, ugyanazzal a (gerjesztett-alapállapot energiakülönbségű) fotonnal besugározzuk, akkor alaptól abszorpcióval felbillen gerjesztettbe, gerjesztettből pedig indukált emisszióval visszalép alapállapotba.



COPY kapu: Használjuk fel azt a tényt, hogy ha két atomot egymás mellé helyezünk, akkor azok távolságuktól, állapotuktól függően kölcsönhatásba lépnek egymással és egy picit megváltozik az energiaszintek távolsága. Ezt akár pontosan ki is tudjuk számolni, hogy milyen mértékben változnak meg az energiaszintek.

Sugározzuk be akkora energiájú fénnyel a rendszert, ami a számításainknak felel meg. (minthogyha egy alapállapotú és egy gerjesztett állapotú atom lenne egymás mellett és ez az energia pont akkora, mint amekkora ahhoz kell, hogy az alapállapotúból gerjesztett legyen...)

- Ha a másolandó atom gerjesztett állapotban van és besugározom ezzel a fénnyel, akkor – mivel ezt úgy választottam meg – a végeredmény az lesz, hogy az alapállapotút is átbillenti.
- Ha ellenben ez eredetileg alapállapotú, akkor az az energiakülönbség, amivel kalkuláltunk, az nem fogja ezt átbillenteni, hiszen itt a kölcsönhatás más jellege miatt az energiaszintek állapota más lesz.



Az AND kapu is hasonló módon valósítható meg, mint a COPY, ugyanúgy azt használjuk ki hogy az egymás melletti atomok kölcsönhatásba lépnek egymással. Az AND kapu sematikus működése: