

*Spin és elektron transzport  
különböző félvezető  
heterostruktúrákban mágneses  
és elektromos tér jelenlétében*

Doktori értekezés tézisei

**Borza Sándor**

NymE SKK Fizika és Elektrotechnika  
Intézet

Témavezető:  
Dr. Papp György

Fizika Doktori Iskola  
Elméleti Fizika Tanszék  
Szegedi Tudományegyetem TTIK  
Szeged, 2014

## Bevezetés

Az utóbbi évtizedekben a félvezető gyártási technológia fejlődésével olyan mérettartományba eső, úgynevezett mezoszkopikus rendszereket képes az ipar előállítani, amelyekben már a töltéshordozók hullámtulajdonságai dominálnak. E nanoszerkezetekben, melyek mérete összemérhető kell, hogy legyen az elektronok hullámhosszával, átlagos szabad úthosszával és fázis koherencia hosszával, a kvantummechanika törvényeivel magyarázható új jelenségek is észlelhetővé válnak. A transzport folyamatok vizsgálata során, úgy találták, hogy az elektronok spinje (továbbiakban spin) lehet az a fizikai mennyiség, melynek felhasználása több szempontból is a legelőnyösebb. Ennek nyomán napjainkban egy új tudományág van születőben, melyet utalva a spin szerepére az információ továbbításában spintronikának neveznek. A spintronika területén az első igazán áttűtő sikert az óriás mágneses ellenállás felfedezése jelentette, mely a merevlemezek tárolókapacitásának jelentős megnövelése révén az 1990-es években forradalmasította a számítógépipart. Bár itt a spin az eszköz ellenállásának megváltoztatása révén az információ továbbításában csak közvetett szerepet játszik, a továbbiakban az eszköz klasszikusan viselkedik, azaz a töltés mennyisége jelenti az információt. Az újabb félvezetőkön alapuló kutatásokban már a spinnek szánják ezt a szerepet. A régóta tervezett, de a megvalósítástól sajnos még mindig elég távol álló kvantumszámítógépeknél is a spin lenne az a kétállapotú rendszer, amely kvantumbit szerepét játszáná.

Ahhoz, hogy a spin a fent említett szerepet betölthesse három alapvető műveletet kell tudnunk végrehajtani rajta. Először is a spint tudnunk kell injektálni, azaz megfelelően polarizált, nem egyensúlyi eloszlású spint a félvezetőbe juttatni. Ha ez megtörtént, akkor tudnunk kell a befecskendezett spint a célnak megfelelően manipulálni, változtatni. Végül az információ kiolvasásához a manipulált spint tudnunk kell detektálni. E három művelet bármelyikének a megvalósításához elengedhetlenül szükséges, hogy a spin-függő transzport folyamatokat egy alkalmazott külső mágneses vagy elektromos térrel tudjuk szabályozni [1].

A spin polarizáció létrehozására az egyik lehetséges megoldás néhány, nanométer tartományba eső, különböző mértékben higan mágnesesen szennyezett, illetve nem mágneses félvezető réteg egymásra növesztése. Az ily módon létrehozott heterostruktúrában az elektronok mágneses tér hiányában szabadon mozoghatnak, mivel a híg szennyezés nem változtatja meg jelentősen a félvezető sávszerkezetét. Viszont mágneses teret kapcsolva a rendszerre potenciálgát keletkezik a spin-fel, míg potenciálvölgy a spin-le elektronok számára, aminek

következtében a különböző spinű elektronok transzmissziós koefficiense, s így vezetőképessége is különböző lesz, azaz külső elektromos feszültség alkalmazásával spin-polarizált áram hozható létre.

## Előzmények

A különböző mértékben szennyezett félvezető rétegek egymásra növesztéséből felépülő heterostrukturákban a méretüknél fogva már a kvantum-interferencia hatások dominálják a töltéshordozók transzport tulajdonságait, mégpedig úgy, hogy a rétegek némelyike az adalékolás következtében energetikai gátként viselkedik a beeső elektronok számára, amelyek csak alagutazással képesek ezeken a rétegeken áthaladni. Az alagutazás kvantummechanikai jelenség, a klasszikus fizika törvényei szerint az elektronok áthatolása ezeken a gátakon energetikailag tiltott, mert a beeső elektronok energiája kisebb, mint az energiagát magassága. A kvantummechanika szerint viszont az elektronok az anyag hullám tulajdonságai és a hullámfüggvény valószínűségi értelmezése következtében véges valószínűséggel áthatolhatnak a potenciálgátakon, amely valószínűség a gátak szélességével exponenciálisan csökken. Ha a potenciálvölgyet a másik oldalról is egy az előzővel megegyező szélességű potenciálgát határolja és a potenciálgátak közé zárt völgy szélessége összehasonlítható az elektronok de Broglie-féle hullámhosszával, ami félvezetőkben tipikusan 10 – 100 nm, akkor az ilyen dupla gátak esetén bizonyos beeső energiákon a transzmissziós koefficiens nagyon magas, akár egységnyi is lehet, a rezonáns alagutazás következtében. A rezonáns alagutazás azokon a rezonancia energiákon jön létre, amelyeken a beeső elektronok energiája megegyezik a völgy úgy nevezett kvázi-kötött sajátállapotaival.

Kísérletileg a rezonáns alagutazást 1974-ben Tsu, Esaki, és Chang [2] észlelték először  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  heterostrukturában, amelyben a potenciálgát létrejöttét az okozza, hogy a  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  rétegben a tiltott sáv szélessége nagyobb, mint a GaAs rétegben. A kísérleti megvalósulást megelőzően véges szuperrácsban végbemenő transzport tulajdonságot vizsgálva Tsu és Esaki [3] az I-V karakterisztikában megjelenő negatív differenciális ellenállást rezonáns alagutazással magyarázta. Ennek a legegyszerűbb modellje két egyenlő derékszögű potenciálhegy közé zárt potenciálvölgy [4]. Rezonáns alagutazás hozható létre akkor is, ha olyan külső feszültséget alkalmaznak a gátakon, melynek révén elérik a katód Fermi szintjének és a völgy rezonáns állapotainak összeillesztését. Mivel a  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  rétegekben a potenciálgát spin független, ezért ez a nanoszerkezet spin polarizációra nem használható. Ahhoz, hogy a heterostruktúra spin polarizációra alkalmas legyen,

az szükséges, hogy a szennyező atom mágneses legyen. Ilyen típusú Mn-, vagy Fe-alapú mágnesesen hígán szennyezett spin szuperrácsok ötletét, amelyekben az elektronok és a lyukak térbeli spin szegregációját a kicserélődési kölcsönhatás okozza, von Ortenberg vetette fel [5], és Dai-nak és társainak [6], illetve Chou-nak és társainak [7] sikerült kísérletileg is megvalósítania. Azóta számos kísérletben hasznosítottak, illetve számos elméleti munkában vetettek fel, olyan eszközöket, melyek működése e spin függő jelenségre épül. A ZnSe/Zn<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Se típusú egyszerű paramágneses réteggel rendelkező heterostrukturán átalagutazó elektronok spin szerinti polarizációjának mágneses térrel történő szabályozhatóságát Egues [8] vetette fel. A paramágneses rétegek számának meg többszörözésével az elektronok már csak rezonáns alagutazással képesek átjutni a heterostrukturán. Az ilyen típusú heterostrukturák effektív potenciálja nemcsak a spintől függ, hanem a mágneses és elektromos tértől, illetve a szerkezet szimmetriájának (a rétegek hosszának) változásától is [9]. Ezért e hatások kombinációjának segítségével ezek spin polarizációja sokkal jobban szabályozható, amely tulajdonság megnöveli ezen eszközök jövőbeni felhasználásának lehetőségét. A rezonáns alagutazásra épülő szerkezetek transzport tulajdonságainak vizsgálatával párhuzamosan tanulmányozták ezek energia spektrumát és állapotait is [10, 11, 12], mely vizsgálatok segíthetnek a transzport tulajdonságok mélyebb megértésében.

Az óriás mágneses ellenállás effektus [13] a legegyszerűbb esetben olyan szendvicsszerkezetben jöhet létre, melyben két ferromágneses réteg között egy fémcs réteg helyezkedik el. Attól függően, hogy a két ferromágneses réteg mágnesezettsége megegyező, vagy egymással ellentétes irányú, rendre parallel és antiparallel elrendeződésről beszélhetünk, melyek mágneses ellenállása jelentősen különbözik egymástól. Tehát az egyik ferromágneses réteg mágnesezettsége irányának a megváltoztatásával az eszköz mágneses ellenállása jelentősen megváltoztatható, mely jelenség számos területen kiaknázható. A későbbi kísérletekben a ferromágneses rétegek közé néhány atomi réteg vastagságú szigetelő- vagy félvezető réteget növesztettek, amelyeken az elektronok csak alagutazással képesek áthalolni. A jelenséget nemcsak különböző mágneses tulajdonságokkal rendelkező rétegek egymásra növesztésével, hanem úgy is létre lehet hozni, hogy a kétdimenziós elektrongáz tetejére és aljára egyaránt két egymással párhuzamos ferromágneses réteget növesztünk [12, 14]. Ezek az alagutazásra épülő rendszerek azért előnyösebbek, mert sokkal kisebb mágneses terek alkalmazásával is nagyobb ellenállás változás érhető el, mely ellenállást a töltéshordozók átjutásának módja miatt alagút mágneses ellenállásnak (Tunneling Magnetoresistance, TMR) nevezik. Ellentétben a ferromágneses rétegeken alapuló rendszerekkel ez utóbbi típusú rendszerekben a spin

szerepe a mágneses ellenállás változásban elhanyagolható. A kétdimenziós elektrongázra növesztett ferromágneses szalagok számának megnövelésével az antiparallel és parallel állapot mágneses ellenállásának hányadosa, azaz az erősítés mértéke még tovább növelhető.

## Célkitűzések

A benne rejlő, még kiaknázatlan lehetőségek miatt a spintronika területe napjainkban intenzív kutatások tárgya. A spintronikai eszközök felhasználhatóságának alapvető feltétele, hogy képesek legyünk a kívánt spint előállítani, a célnak megfelelően változtatni, végül a műveletek zárásaként detektálni. A tudományterület jelenlegi állása szerint a félvezető heterostrukturákban létrejövő spin-függő transzport területén úgy tűnik, hogy a rezonáns alagutazáson alapuló spintronikai eszközök felhasználásával lehet számos fontos célt és funkcionalitást elérni, amelyek a jövőbeni spintronikai alkalmazások szempontjából elengedhetetlenül szükségesek.

Mindezen okok miatt célul tűztük ki a mágnesesen hígán szennyezett  $\text{ZnSe}/\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}/\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y\text{Se}/\text{ZnSe}/\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}/\text{ZnSe}$  félvezető heterostrukturájában párhuzamos mágneses és elektromos mező jelenlétében az elektronok spin függő alagutazásának következtében létrejövő spin-polarizált áram elméleti vizsgálatát. A tanulmányozott aszimmetrikus rendszerben az elektronok transzmissziója és a spin polarizáció foka a mágneses és elektromos terek erősségétől, illetve az alkalmazott külső feszültség polaritásától függ. Ezért célul tűztük ki az elektromos és mágneses terek együttes alkalmazásának vizsgálatát, optimalizálását, abból a szempontból is, hogy milyen erősségű terek alkalmazásakor érhetünk el nagyfokú polarizációt a rendszeren átfolyó áram viszonylag nagy értéke mellett.

Célul tűztük ki továbbá az elektronok spin függő alagutazásának elméleti vizsgálatát olyan aszimmetrikus dupla kvantum völgyekben és gátakban, amelyek  $\text{ZnSe}$ -alapú félvezető heterostrukturákban különböző mágnesesen szennyezett és nem mágneses anyagok többféleképpen elrendezett sorozataiban alakulnak ki, párhuzamos mágneses és elektromos mező jelenlétében. Ha az egyik félvezető réteget nem mágneses anyaggal szennyezzük, akkor ezzel olyan szerkezeti aszimmetriát építünk a rendszerbe, melynek elektromos és mágneses terekkel történő módosítása tág határok között biztosít lehetőséget a spin polarizáció és az áramerősség szabályozására.

A transzport tulajdonságok mélyebb megértéséhez elengedhetetlenül szükséges az elektronok energia spektrumának és állapotainak vizsgálata. Ezért célul tűztük ki ezek tanulmányozását egy olyan nem mágneses/mágneses  $\text{ZnSe}/\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$

heterostruktúrában, amely két olyan anyag közé van helyezve, mely anyagok az elektronok számára gátként viselkednek. Az így kialakuló völgyre merőleges, illetve párhuzamos mágneses mezőt kapcsolva a spin-fel elektronok egy gáttal, míg a spin-le elektronok egy völgygel találják magukat szemben a határfelületen. Ez a különböző spinű elektronok térbeli szeparációjához vezet, aminek következtében változatos sáv szerkezet jön létre. A modellünk egy végtelen magas falakkal határolt, egy nem mágneses és egy mágneses rétegből kialakuló kvantum völgy. Célul tűztük ki továbbá az elektronok állapotainak vizsgálatát külső elektromos térben, amely a probléma véges magasságú falakra történő általánosításával együtt lehetőséget teremthet a kvantumvölgy transzport tulajdonságainak tanulmányozására.

Az óriás mágneses ellenállást hasznosító eszközök újabb generációjában már az alagút mágneses ellenállás jelenségét használják az eszköz működésekor. E jelenség a félvezető heterostruktúra tetejére és aljára növesztett ferromágneses szalagok alkalmazásával is létrehozható. Ezért célul tűztük ki annak az elméleti vizsgálatát, hogy a GaAs heterostruktúrában létrehozott kétdimenziós elektrongáz tetejére és aljára növesztett ferromágneses szalagok száma miként befolyásolja a rendszer mágneses ellenállás hányadosát, illetve módosított mágneses ellenállás hányadosát.

## **Alkalmazott módszerek**

A ZnSe alapú rendszerek transzport tulajdonságainak elméleti vizsgálata esetén általánosan elfogadott feltevés, hogy a transzport ballisztikusnak tekinthető. Ez azt jelenti, hogy a rendszerben nincs jelen semmilyen elektron szórás folyamat, azaz az elektronok átlagos szabad úthossza összemérhető a minta méreteivel. Ezen egyszerűsítés kis elektron sűrűségek és nagy tisztaságú minták esetén megtehető, mely utóbbi feltételhez a gyártási technológiák fejlődésével egyre közelebb kerülünk. Modellünkben egyelektron állapotokkal számoltunk, melyekre alkalmaztuk az effektív tömeg közelítést, és az elektronok effektív tömegét a parabolikus profilú vezetési sávban (amely a transzport tulajdonságokat meghatározza) minden rétegben azonosnak vettük. Az elektronok Hamilton-függvényének felírásakor a külső elektromos és mágneses terek mellett az egyaránt spin függő Zeeman felhasadást és kicserélődési kölcsönhatást, továbbá az egyes rétegekben az ugyanazon elektronsávok energiájának esetleges különbözőségének következtében fellépő elektromos potenciált vettük figyelembe. A  $Mn^{2+}$  ionok és az elektronok közötti kicserélődési kölcsönhatás függ a  $Mn^{2+}$  ionok  $z$  irányú spinjének termikus átlagától, melyet egy módosított (5/2)-es Brillouin-függvényel közelítettünk. A különböző mértékben higan mágnesesen szennyezett rétegekben a  $Mn^{2+}$  ionok közöttily módon

kissé különböző erősségű kölcsönhatást oly módon vettük figyelembe, hogy az egész heterostruktúra hőmérsékletéhez hozzáadtunk egy az adott rétegben a Mn-Mn kölcsönhatás erősségétől függő, az adott rétegre jellemző értéket. Modellünkben a mágneses térre merőleges mozgást a Landau-nívók segítségével leválasztottuk a mágneses tér irányú mozgásról, majd az immár egydimenzióssá vált probléma megoldásakor az egyes rétegekben kialakuló potenciálokat négyzög alakú potenciálhegyekkel és völgyekkel közelítettük. Az ily módon egydimenziósra redukált probléma Schrödinger-egyenletét a transzfer mátrix módszer segítségével oldottuk meg, majd az így kapott transzmissziós koefficiensből az elektronok csoportsebességének és az egyes elektron állapotok betöltöttségét megadó Fermi-Dirac eloszlásfüggvényének felhasználásával számoltuk ki a heterostruktúrán átfolyó áramsűrűséget.

Az oxid rétegek közé zárt  $\text{ZnSe}/\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$  heterostruktúrát modellünkben egy végtelen magas falak által határolt kvantumvölgygel közelítettük. A rendszer Hamilton-függvényének felírása során az előző bekezdésben ismertetett megfontolásokat követtük, azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben olyan kismértékű Mn szennyezéssel számoltunk, hogy Mn-nal szennyezett paramágneses rétegek és a nem szennyezett rétegek határán a kis mértékű Mn szennyezés következtében létrejövő vezetési sáv eltolódást a témában megjelent korábbi publikációkkal [8, 9, 15, 16] összhangban elhanyagolhattuk. A kétdimenziós elektrongázra merőleges irányú mágneses mező alkalmazásakor a mágneses térre merőleges síkban történő mozgás a Landau-szintek felhasználásával ebben az esetben is leválasztható a mágneses tér irányába eső mozgásról. Így a hullámfüggvény szorzatokra bontásával a probléma egydimenziósra redukálható. A kétdimenziós elektrongáz síkjába eső mágneses tér esetén az elektronok Schrödinger-egyenletét a Landau-mértéket használva írtuk fel. Kihhasználva, hogy a Hamilton-operátor felcserélhető az elektronok impulzusának e síkba eső komponenseivel, a hullámfüggvény ebben az esetben is szorzat alakban kereshető. Végül a differenciálegyenleteket mind a két esetben a véges differencia módszer segítségével oldottuk meg.

A GaAs kétdimenziós elektrongáz tetejére és aljára növesztett ferromágnesek szőrt terét Dirac-delta alakú mágneses térrel közelítettük. A probléma Hamilton-operátorát az egyelektron effektív tömeg közelítést használva írtuk fel. A vektorpotenciált a Landau-mértéket alkalmazva vettük fel. Kihhasználva a rendszer transláció invarianciáját a hullámfüggvényt szorzat alakban írtuk fel, majd megfelelő dimenziómentes egységek bevezetésével a problémát egy egydimenziós

alagutazó problémára redukáltuk. A vezetőképesség számolásakor a Fermi-felület felén átfolyó elektronok áramát átlagoltuk ballisztikus transzportot feltételezve.



## Új tudományos eredmények

1. Kiszámítottuk a higan mágnesezen szennyezett  $\text{ZnSe/Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se/Zn}_{1-y}\text{Mn}_y\text{Se/ZnSe/Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se/ZnSe}$  félvezető heterostruktúrában párhuzamos mágneses és elektromos mező jelenlétében az elektronok spin függő alagutazásakor létrejövő transzmissziós koefficiént, spin polarizációt és árapolarizációt. Az általunk alkotott modell bármilyen mágnesezen higan szennyezett II-VI típusú félvezető rendszerre alkalmazható. Megmutattuk, hogy a tanulmányozott aszimmetrikus rendszerben az elektronok transzmissziója és a spin polarizáció foka a mágneses és elektromos terek erősségétől, illetve az alkalmazott külső feszültség irányától függ. Kimutattuk, hogy megfelelő mágneses tér esetén a rendszer kimenő árama közel 100%-os spin polarizációt mutat, ezért az eszköz spin szűrőként alkalmazható [I].
2. Kiszámítottuk a  $\text{ZnSe/Zn}_{1-y}\text{Be}_y\text{Se/ZnSe/Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se/ZnSe}$  és  $\text{ZnSe/Zn}_{1-z}\text{Cd}_z\text{Se/ZnSe/Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se/ZnSe}$  heterostruktúrákban kialakuló aszimmetrikus dupla kvantum völgyekben és gátakban átalagutazó elektronok spin függő transzmisszió koefficiéntjét, spin polarizációját és árapolarizációját. Kimutattuk, hogy a tanulmányozott rendszerben az elektronok transzmissziója és a spin polarizáció foka a mágneses (az  $s-d$  kicserélődési kölcsönhatáson keresztül) és elektromos terek erősségétől, illetve az alkalmazott külső feszültség irányától függ, amelyek együttesen egy magasan spin-polarizált gázt hoznak létre. Megmutattuk, hogy az effektív potenciál különbözősége vezet az ellenkező spinű elektronok jellegzetesen különböző transzmissziójához, amely a mágneses tér növelésével fokozható. Az eredményeink szerint a polarizáció foka szabályozható az elektromos tér irányának segítségével. Kimutattuk továbbá, hogy a tanulmányozott szerkezetek dióda tulajdonságokkal rendelkeznek, miközben megfelelő erősségű mágneses tér segítségével a spin-fel elektronok áramát lecsökkentjük. Ezért megfelelő külső elektromos és mágneses terek mellett a tekintett szerkezetek kettős szerepet játszhatnak, egyaránt alkalmazhatóak spin szűrő eszközként és diódaként [II].
3. Kiszámítottuk az elektronok energia spektrumát, állapotait, sebességét és állapotsűrűségét egy  $\text{ZnSe/Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$  nem mágneses/mágneses heterostruktúrában, amely két olyan anyag közé van helyezve, mely anyagok az elektronok számára gátként viselkednek, a kialakuló völgyre merőleges, illetve azzal párhuzamos mágneses mezőben. Kimutattuk, hogy egy potenciál lépcső alakul ki a nem mágneses és a mágneses anyag közötti átmenetnél, mivel a spin-fel elektronok egy gáttal, míg a spin-le elektronok egy völgygel

találják magukat szemben a határfelületen, ami a spin-fel és a spin-le elektronok térbeli szeparációjához vezet. Bemutattuk, hogy ez egy szokatlannak mondható csoportsebességet, valamint egy szintén szokatlannak mondható állapotsűrűség függvényt eredményez. Megmutattuk, hogy ennek következtében gazdag sáv szerkezet jön létre, amely a merőleges elektromos tér segítségével hangolható, továbbá, hogy hogyan lehet befolyásolni az elektron állapotokat egy ilyen elektromos tér segítségével. Kimutattuk azt is, hogy ez a manipuláció az elektron hullámfüggvényének elektromos tér indukálta térbeli eltolása következtében jön létre, konstans elektron sűrűség mellett. A modellünk alapján nyilvánvaló, hogy bármely más végtelen magas falak közé bezárt nem mágneses/mágneses heterostruktúra esetén is hasonló eredmények adódnak, mint az ebben a munkában tárgyalt heterostruktúra esetében [III].

4. Az óriás mágneses ellenállás vizsgálata kapcsán, melyet a GaAs kétdimenziós elektron gáz tetejére és aljára növesztett párhuzamos ferromágnesekkel lehet megvalósítani, kimutattuk, hogy a rendszer mágneses ellenállás hányadosa erősen függ a ferromágneses egységcellák számától, és már egy dupla egység alkalmazásakor is az erősítés mértéke nagyságrendileg  $4.9 \times 10^{13}$ . Megmutattuk, hogy a módosított mágneses ellenállás hányados oszcillál, amely oszcilláció csúcseinak a számát az egységcellák száma határozza meg. A vizsgálataink szerint kísérletileg megvalósítható paraméterek esetén a GaAs heterostruktúrában a módosított mágneses ellenállás hányados értéke akár 55% is lehet, realisztikus elektron sűrűség mellett. Kimutattuk továbbá, hogy rezonancia felhasadás jön létre bizonyos Fermi-energiákon a módosított mágneses ellenállás hányados görbéiben, amikor ezt a Fermi-energia függvényében ábrázoljuk. Ez azt jelzi, hogy egy ilyen mágneses szerkezet előnyös lehet a szelektív elektron injektáló eszközök számára [IV].

## Publikációs lista

[I] G. Papp, S. Borza, and F. M. Peeters, *J. Appl. Phys.* (IF = 2,498) **97**, 113901 (2005).

[II] G. Papp, S. Borza, and F. M. Peeters, *Phys. Status Solidi b* (IF = 0,896) **243**, 1956 (2006).

[III] S. Borza, F. M. Peeters, P. Vasiolopoulos, and G. Papp, *J. Phys.: Condens. Matter* (IF = 1,886) **19**, 176221 (2007).

[IV] G. Papp and S. Borza, *Solid State Commun.* (IF = 1,979) **150**, 2023 (2010).

## Irodalomjegyzék

- [1] J. Fabian, A. Matos-Abiague, C. Ertler, P. Stano, I. Zutic, *Acta Physica Slovaca* **57**, 565 (2007).
- [2] L. L. Chang, L. Esaki, and R. Tsu, *Appl. Phys. Lett.* **24**, 593 (1974).
- [3] R. Tsu and L. Esaki, *Appl. Phys. Lett.* **22**, 562 (1973).
- [4] G. Papp, A. Baldereschi, Alagutazás félvezetőben, *Fizikai Szemle* **46**, 268-272 (1996).
- [5] M. von Ortenberg, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1041 (1982).
- [6] N. Dai, H. Luo, F. C. Zhang, N. Samarth, M. Dobrowolska, and J. K. Furdyna, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3824 (1991).
- [7] W. C. Chou, A. Petrou, J. Warnock, and B. T. Jonker, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3820 (1991).
- [8] J. Carlos Egues, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4578 (1998).
- [9] Y. Guo, B.-L. Gu, H. Wang, and Y. Kawazoe, *Phys. Rev. B* **63**, 214415 (2001).
- [10] A. Matulis, F. M. Peeters, and P. Vasilopoulos, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 1518 (1994).
- [11] J. Reijniers and F. M. Peeters, *J. Phys: Condens. Matter* **12**, 9771 (2000).
- [12] G. Papp and F. M. Peeters, *J. Phys: Condens. Matter* **16**, 8275 (2004).
- [13] [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2007/popular-physicsprize2007.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/popular-physicsprize2007.pdf)
- [14] G. Papp and F. M. Peeters, *J. Appl. Phys* **100**, 043707 (2006).
- [15] N. Dai, H. Luo, F. C. Zhang, N. Samarth, M. Dobrowolska, and J. K. Furdyna, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3824 (1991).
- [16] K. Chang and F. M. Peeters, *Solid State Commun.* **120**, 181 (2001).