

CSONTOS Miklós

**Nagynyomású mágneses transzport mérések
(III,Mn)V mágneses félvezetőkön**

Ph.D. téziszűzet

**Témavezető: Prof. MIHÁLY György
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem
Fizikai Intézet
Fizika Tanszék**

BME

2007

Bevezetés

Mágneses félvezető anyagok kutatása a '80-as évek végétől, az alacsony hőmérsékleti molekulásugaras epitaxiális (MBE) mintaelőállítási módszer gyors fejlődésének köszönhetően vált lehetővé. Az eljárás segítségével az egyensúlyi oldhatósági határt meghaladó mértékben építhetők be mágneses atomok hagyományos félvezetők kristályrácsába. A legintenzívebben kutatott (III,Mn)V típusú mágneses félvezetőkben a szubsztitucionális Mn^{2+} ionok egyszerre biztosítják a lokalizált mágneses momentumokat és az azok közötti kölcsönhatást közvetítő sáv-lyukakat. Ugyanakkor a fenti anyagok mágneses- és transzport tulajdonságait az eredeti félvezető sáv szerkezete, valamint a különböző lyuk-sávok spin-pálya kölcsönhatása is jelentősen befolyásolja. A töltéshordozók által közvetített csatolás miatt a ferromágneses alapállapot külső elektromos terekkel befolyásolható. Ez egyúttal lehetővé teszi a jelenlegi félvezető-technológiák felhasználását a jövőbeni mágneses félvezető alapú spintronikai eszközök előállításánál.

Kísérleti technika

Az (In,Mn)Sb, (In,Mn)As valamint (Ga,Mn)As vékonyréteg mintákat Prof. J. K. Furdyna csoportja növesztette a Notre Dame-i Egyetem Fizika Tanszékén. A minták jellemzően 230nm-es vastagsága lehetővé tette a fenti anyagok tömbi tulajdonságainak vizsgálatát. A doktori munkámhoz kapcsolódó kísérleteket a BME Fizika Tanszékének Alacsony Hőmérsékletű Laboratóriumában végeztem. A mérések során kerozinnal feltöltött nyomáscella segítségével $p = 3\text{GPa}$ -ig (30kbar) terjedő hidrosztatikus nyomásokat alkalmaztam. A nyomáscella használata egyúttal egy új kriosztát-betét megépítését is szükségessé tette. A magnetotranszport méréseket hat-kontaktusos Hall-elrendezésben, az 1.4-300K hőmérséklet- valamint a 14T-ig kiterjedő mágneses tér tartományban végeztem.

Célkitűzések

Doktori munkám célkitűzése (III,Mn)V mágneses félvezetők mágneses- és transzport tulajdonságainak kísérleti vizsgálata volt. A rácsállandótól függő mikroszkopikus paraméterek finom hangolása érdekében a kísérleteket hidrosztatikus nyomás alatt végeztem. A kiterjedt sáv-állapotok valamint a lokális kicserélődési kölcsönhatás nyomás általi megváltoztatásával végzett mérések a makroszkopikusan megfigyelhető mágnesezettség és transzport jelenségekért felelős fizikai folyamatok vizsgálatának új útját jelentik.

Az utóbbi évek kutatásai nyomán a mágneses félvezetőkben létrejövő, töltéshordozók által közvetített mágneses kölcsönhatás számos részlete vált ismeretessé. Ugyanakkor a ferromágneses fázisátalakulás mikroszkopikus eredete továbbra is alapvető kérdés maradt. Ezért a nyomás alatt végzett méréseim első csoportjában a Curie-hőmérséklet rácsállandó-függését vizsgáltam. A kísérletileg tapasztalt Curie-hőmérséklet növekedést a lecsökkent rácsállandó által megnövelt hullámfüggvény-átfedések következtében felelősödött mágneses csatolásnak tulajdoníthatjuk.

A jövőbeni spintronikai alkalmazások szempontjából fontos kérdés a spin-polarizált áramok létrehozása, illetve a határfelületeken keresztül történő spin-injektálás megvalósíthatósága. Emiatt különlegesen fontos a töltéshordozók spinfüggő szórási folyamatainak megértése. A lokális kicserélődési kölcsönhatás spinfüggő transzport jelenségekben játszott szerepének tisztázása érdekében fémes (In,Mn)Sb minták mágneses ellenállását vizsgáltam. Ennek során a töltéshordozók spin-polarizációjának meghatározására is lehetőség nyílt.

A mágneses félvezetőkre épülő spintronikai eszközök integrált számítási- és adattárolási funkciói olyan tömbi tulajdonságokon alapulnak, amelyek külső elektromos térrel befolyásolhatók. Az ilyen egységek mágneses állapota legegyszerűbben a síkjukra merőleges kis mágneses térben

mért Hall-ellenállás segítségével határozható meg. Ebben többnyire az anomális Hall effektus (AHE) dominál, amelynek térfüggése az anyag makroszkopikus mágnesezettségét tükrözi. A jelenség eredetének feltérképezése érdekében az AHE térfüggésére irányuló méréseimet olyan nagy mágneses terekig végeztem, amelyek messze meghaladják a spintronikai alkalmazások tartományát.

Az eredmények hasznosítása

A doktori munkám során végzett kísérleti vizsgálatok olyan alapkutatói területhez kapcsolódnak, amely (III,Mn)V mágneses félvezetők ferromágnességének jobb megértését célozza. Mindazonáltal a tanulmányozott anyagok a jövőbeni spintronikai alkalmazások szempontjából is fontosak. Epitaxiálisan növesztett vékonyrétegekben a hullámfüggvény-átfedések nem csak nyomás alkalmazásával, hanem a mágneses réteg és a szubsztrát közötti, az eltérő rácsállandók miatt fellépő mechanikai feszültségek segítségével is befolyásolhatóak. Ezeket a feszültségeket a minta előállítás során megfelelően hangolva a minta síkjában jóval nagyobb hullámfüggvény átfedéseket lehet létrehozni, mint külső nyomás alkalmazása esetén. A megfigyelt nyomás-effektusok arra utalnak, hogy a mágneses csatolások MBE módszerekkel történő módosítása új lehetőséget jelenthet a nanométeres méretskálájú spintronikai eszközök tömbi mágneses szerkezetének tervezésében.

Tézispontok

Doktori munkám főbb eredményeit az alábbi tézispontokban foglaltam össze.

1. Hidrosztatikus nyomás (III,Mn)V típusú mágneses félvezetők para-

mágneses-ferromágneses fázisátalakulására gyakorolt hatását vizsgálva fémes jellegű (In,Mn)Sb mintákban jelentős mértékű Curie-hőmérséklet növekedést tapasztaltam. Ez a jelenség kétféle hatás eredményének tulajdonítható: (i) a lokális kicserélődési kölcsönhatás nyomás által indukált $\frac{\partial \ln J_{pd}(p)}{\partial p} = 0.02 \text{ GPa}^{-1}$ mértékű növekedésének, amely az elemi cella térfogat-csökkenésének következtében lép fel, valamint (ii) a kiterjedt lyuk-állapotok effektív tömegének $\frac{\partial \ln m_{\text{eff}}(p)}{\partial p} = 0.07 \text{ GPa}^{-1}$ mértékű megváltozásának, amely a tiszta InSb-ra jellemző tulajdonság. A kísérletileg megfigyelt $\frac{\partial \ln T_C(p)}{\partial p} = 0.09 \text{ GPa}^{-1}$ Curie-hőmérséklet növekedés megegyezik az átlagtér elméletek által jóslott értékkel, ezáltal erős bizonyítékkal szolgál a ferromágnesség töltéshordozók által közvetített jellegére. (Ga,Mn)As és (In,Mn)As mintákon végzett hasonló kísérletek segítségével megmutattam, hogy a nyomás által indukált Curie-hőmérséklet növekedés a (III,Mn)V típusú mágneses félvezetők általános tulajdonsága, noha a töltéshordozó-koncentráció csökkenése részben kompenzálhatja az effektust. [1,2]

2. Tanulmányoztam a mágneses ellenállás eredetét olyan rendezetlen rendszerekben, amelyek egyszerre tartalmaznak ferromágneses tartományokat és különálló paramágneses momentumokat. A nagy mágneses terekben végzett transzport kísérletek segítségével megmutattam, hogy a nagy negatív mágneses ellenállást a paramágneses összetevőkön végbemenő spinfüggő szórás okozza. A kis terű mágneses ellenállás térfüggésének a Curie-hőmérséklet alatti, négyzetesről lineárisra történő megváltozása az időtükrözési szimmetria sérülésének a jele, amely további bizonyítékkal szolgál a spin-polarizált szórásra. A mágneses ellenállás induló meredekségéből meghatároztam a töltéshordozók spin-polarizációját (In,Mn)Sb-ban, amely 2.1K hőmérsékleten 30%-nak adódott. Megmutattam továbbá, hogy a spin-polarizáció hőmérséklet-

függése követi a remanens mágnesezettség hőmérsékletfüggését. [3,4,5]

3. Megmutattam, hogy az (In,Mn)Sb mágneses ellenállásának hőmérséklet- és térfüggése jól leírható mind T_C alatt, mind pedig T_C felett a kicserélődési kölcsönhatási állandónak a spinfüggő szórási erősségben való, másodrendig történő figyelembe vételével. A modell alapján a mágneses ellenállás hőmérséklet- és térfüggése $\mu_B B / k_B T_{\text{eff}}$ szerint skálázódik, ahol $T_{\text{eff}} = T - T_C$ a paramágneses fázisban. A szórási erősség a modelltől levezethető. A többi paraméter, mint például T_C , összhangban áll a független mérések eredményeivel. Hidrosztatikus nyomás alkalmazásával megmutattam, hogy a mágneses ellenállás nyomás által indukált növekedése a kicserélődési kölcsönhatási állandó nyomásfüggését tükrözi, míg a T_{eff} effektív hőmérséklet nyomásfüggése jó egyezést mutat a Curie-hőmérsékletével. Mivel a nyomás által indukált változások a modell keretein belül újabb paraméterek bevezetése nélkül leírhatóak, a nyomás alatt végzett kísérletek megerősítik a modell konzisztenciáját. [3]
4. Tanulmányoztam a nagy terű Hall effektust (In,Mn)Sb, (In,Mn)As valamint (Ga,Mn)As mágneses félvezetőkben. Megmutattam, hogy a nagy terű anomális Hall effektus együtthatója (In,Mn)As-ban és (In,Mn)Sb-ban térfüggő. Az ellenállással és a mágnesezettséggel való összehasonlítás alapján megmutattam, hogy az anomális Hall ellenállás térfüggése ezekben az anyagokban nem magyarázható a skew-scattering illetve a side-jump modellek keretei között. Megmutattam, hogy (In,Mn)Sb esetén az anomális Hall ellenállás térfüggésének a lineáristól való eltérése nem tulajdonítható a normális Hall együttható többsáv eredetének. Analízisem lehetővé tette a Lorentz erőttől származó normális-, illetve az anomális Hall járulékok egyértelmű szétválasztását.

5. Megmutattam, hogy az (In,Mn)Sb anomális Hall vezetőképessége független a Mn koncentrációtól és a nyomástól, ami az anomális Hall effektus tisztán intrinsic jellegére utal. Az anomális Hall vezetőképesség hőmérséklet- és mágneses tér függését a különböző lyuksávoknak a ferromágneses kicserélődésből származó felhasadás miatt bekövetkező relatív elmozdulásával értelmezem, a legújabb, Berry-fázison alapuló elméletekkel összhangban. Javaslatom szerint ezt a mechanizmus a ξ_S anomális Hall együttható kicsi, a mágnesezettségben elsőrendű korrekciójával vehető figyelembe. Ezt a feltételezést a nagy terű mágnesezettség és az anomális Hall vezetőképesség összehasonlításával igazoltam. [6]

Publikációs lista

A Ph.D. tevékenységemhez kapcsolódó publikációk:

- [1] M. Csontos, G. Mihály, B. Jankó, T. Wojtowicz, X. Liu and J. K. Furdyna, *Pressure-induced ferromagnetism in (In,Mn)Sb dilute magnetic semiconductor*.
Nature Materials **4**, 447 (2005).
- [2] M. Csontos, G. Mihály, B. Jankó, T. Wojtowicz, W. L. Lim, X. Liu, and J. K. Furdyna, *Effect of hydrostatic pressure on the transport properties in magnetic semiconductors*.
Phys. Stat. Sol. (c) **1**, 3571 (2004).
- [3] M. Csontos, T. Wojtowicz, X. Liu, M. Dobrowolska, B. Jankó, J. K. Furdyna, and G. Mihály, *Magnetic Scattering of Spin Polarized Carriers in (In,Mn)Sb Dilute Magnetic Semiconductor*.
Phys. Rev. Lett. **95**, 227203 (2005).

- [4] M. Csontos, J. Balogh, D. Kaptás, L. F. Kiss, A. Kovács, and G. Mihály, *Magnetic and transport properties of Fe-Ag multilayers*. Phys. Rev. B **73**, 184412 (2006).
- [5] J. Balogh, M. Csontos, D. Kaptás, G. Mihály, *Enhanced granular magnetoresistance due to ferromagnetic layers*. Solid State Commun. **126**, 427 (2003).
- [6] M. Csontos, T. Wojtowicz, X. Liu, B. Jankó, J. K. Furdyna, and G. Mihály, *Intrinsic Anomalous Hall Effect in (In,Mn)Sb Dilute Magnetic Semiconductor*. Phys. Rev. Lett., publikálás alatt (2007).

Egyéb publikációk:

- [7] J. Balogh, M. Csontos, D. Kaptás, L. F. Kiss, T. Pusztai, J. Swerts, S. Vandezande, K. Temst, C. Van Haesendonck, and G. Mihály, *Magnetic properties of superparamagnet/ferromagnet heterostructures*. Phys. Stat. Sol. (c) **1**, 3235 (2004).
- [8] J. Balogh, A. Gábor, D. Kaptás, L. F. Kiss, M. Csontos, A. Halbritter, I. Kézsmárki and G. Mihály, *Giant Magnetoresistance of a Single Interface: magnetoresistance of Ag/Fe/Ag trilayers*. in *Kondo Effect and Dephasing in Low-Dimensional Metallic Systems*, 181-184, Eds. V. Chandrasekhar et al., Kluwer Academic Publishers (2001).