

Kvantový Hallův jev

Tomáš Bárta, Zuzana Bobková, Lukáš Buchta
Jiří Jelínek, Martin Ševčík

Gymnázium Nad Štolou, SPŠ Třebíč, Gymnázium Velké Meziříčí,
Gymnázium Blansko, SPŠ Frýdek Místek

facebook.com/tombarta
facebook.com/profile.php?id=1819932833
facebook.com/profile.php?id=1209532514
facebook.com/jelinekjiri
facebook.com/profile.php?id=100000031861427

Abstrakt

V tomto pokusu jsme zkoumali kvantový Hallův jev a pokoušeli se změřit Hallovo napětí na vzorku polovodiče. Tento vzorek jsme si nařezali, vytvořili vodivé spoje a připojili k patici. Za pokojových teplot byla vodivost v pořádku, avšak po dosažení velmi nízkých teplot kontakty nevydržely.

1 Úvod

Dnes často využívaným fyzikálním principem je Hallův jev objevený na konci 19. století Edwinem Hallem. Jedná se o účinek magnetického pole na plochý polovodič zapojený ke zdroji. Využívá se mimo jiné pro určení standartu odporu a na 2D elektronovém plynu lze pozorovat kvantový Hallův jev.

2 Teorie

Hallův jev

Při umístění zapojeného plochého vodiče do magnetického pole působí na pohybující se elektrony Lorentzova síla. Je kolmá na směr pohybu náboje i na siločáry magnetického pole. Trajektorie elektronů je tedy superpozicí přímočarého a kruhového pohybu¹.

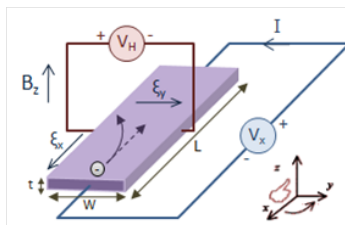
$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Kde \mathbf{F} je Lorentzova síla, \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole, \mathbf{B} je vektor magnetické indukce, \mathbf{v} je vektor rychlosti nabitě částice a q je velikost náboje částice. Kolmo k \mathbf{E} lze naměřit Hallovo napětí způsobené vychýlením elektronů.

$$U_H = R_H \frac{IB_y}{d}$$

U_H je zmíněné Hallovo napětí, R_H je Hallova konstanta, I je protékající elektrický proud, B_y magnetická indukce kolmá na destičku tloušťky d . Hallova konstanta má rozměr $m^3 A^{-1} s^{-1}$ a umožňuje stanovit typ vodivosti polovodiče.

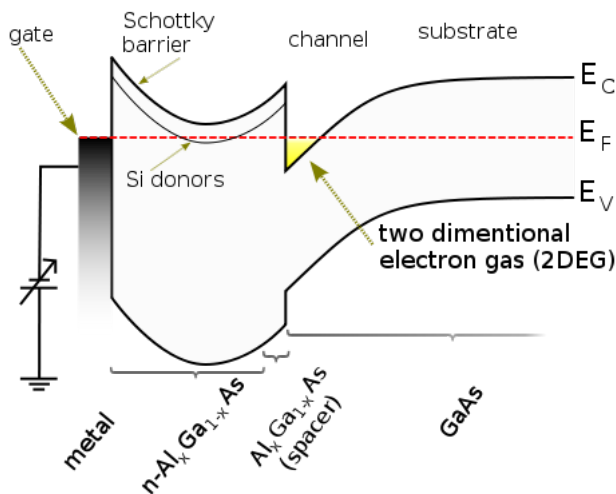
Na základě uvedených vztahů jsme očekávali, že Hallovo napětí bude lineárně závislé na velikosti magnetické indukce, neboť lze očekávat, že bude přímo úměrné Lorenzově síle, která je lineárně závislá na magnetické indukci.



Obrázek 1: Hallův jev

Kvantový Hallův jev

Kvantový Hallův jev je možno pozorovat pouze na elektronovém 2D plynu, což je běžný elektronový plyn, ve kterém se elektrony mohou hýbat pouze v ploše. Ten vznikne zachycením elektronů v kvantové jámě². Ta se může objevit na rozhraní mezi polovodiči vlivem vyrovnání energií jejich vodivostních pásů.



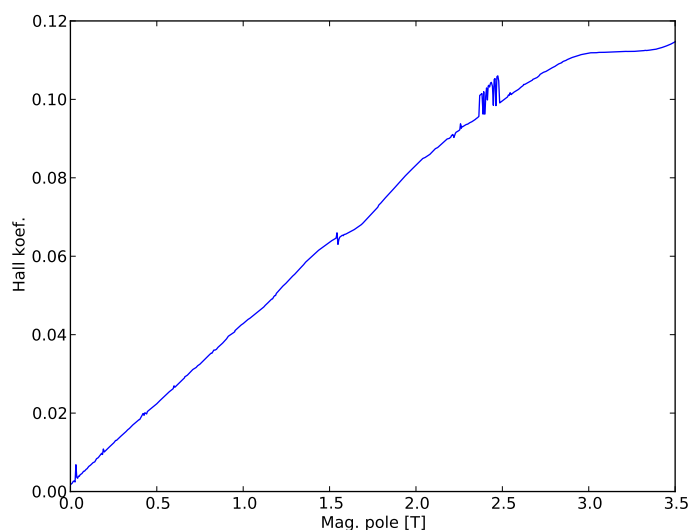
Obrázek 2: Kvantová jáma

Takovéto rozhraní mezi polovodiči se vytváří pomocí tzv. molekulární epitaxe, což je nanášení vrstev molekul jednotlivých polovodičů na sebe ve vakuu. Při tomto jevu nabývá Hallův odpor diskrétních hodnot.

$$R_H = \frac{h}{ne^2}$$

h je Planckova konstanta, n udává jednotlivé excitované stavy a e elementární náboj.

Při určitých diskrétních hodnotách magnetické indukce bude trajektorie elektronů cykloidní, elektrony se tedy nebudou kumulovat na jedné straně vodiče a Hallovo napětí

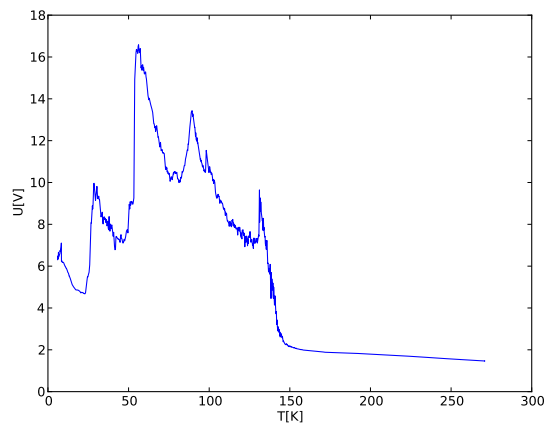


Obrázek 3: dříve naměřené hodnoty na Cukrovarnické (očekávaný průběh)

nebude růst. To se na závislosti Hallova napětí na indukci projeví tím, že budeme pro určité hodnoty pozorovat schůdky³, naznačující, pro které hodnoty B_y jsou trajektorie cykloidní. Kvantový Hallův jev je při dnešních technických možnostech pozorovatelný pouze za velmi nízkých teplot a ve velmi silném magnetickém poli.

3 Experiment

Samotný experiment jsme prováděli na poskytnutém vzorku AlGaAs, GaAs a GaAs-n, kde n znamená dotovaný polovodič. Ze vzorku jsme odřízli kousek o rozměrech 4,5mm na 4,5mm. 2D elektronový plyn však nemůže díky rozdílným podmínkám existovat v okrajích vzorku. Abychom se k 2D elektronovému plynu dostali, vytvořili jsme kontakty nanesením india na vzorek a následným žíháním v dusíkové atmosféře. Indium takto prodifundovalo skrz materiál a silně lokálně dopovalo polovodič elektrony a vytvořilo tak vodivé cesty. Poté jsme takovéto kontakty napájeli k patiči. Vzorek jsme následně spolu s elektromagnetem dali do kapalného helia a začali postupně ochlazovat až na 4K. Sledovali jsme jak se v závislosti na teplotě a magnetické indukci mění Hallovo napětí. Po pozorování hodnot jsme došli k závěru, že nám kontakty během ochlazování vymrzly. Nízká teplota způsobila přesun kritického množství elektronů z vodivostního pásu do valenčního a přestože za pokojové teploty kanálky dopované indiem vedly proud výborně, vymrznutí této jejich funkce zabránilo, což ilustruje následující grafické zpracování⁴ výstupu z měřících přístrojů: U zde značí napětí mezi svorkami zdroje. Při teplotě kolem 150K ale odpor výrazně vzrostl, tedy aby se udržel stejný proud, vzrostlo s odporem i napětí na svorkách zdroje.



Obrázek 4: Průběh napětí na svorkách zdroje v závislosti na teplotě

Závěr

Za daných podmínek jsme nebyli schopni Hallovo napětí změřit, neboť kontakty na vzorku výrazně ztratily na vodivosti, zřejmě se nedostaly až na 2D elektronový plyn. Chtěli bychom poděkovat Fyzikálnímu ústavu v Cukrovarnické za přístup na moderní pracoviště a našemu garantovi ing. Štěpánu Svobodovi za morální podporu, předané vědomosti a umožnění podílet se na měření vzorku, které před námi ještě nebylo vykonáno. Dále děkujeme ČVUTu a FJFI ČVUT a Jimmymu z Wiki.