



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ДЕПАРТМАН ЗА МАТЕМАТИКУ И
ИНФОРМАТИКУ



Владимир Голуб
Миљић Јована
Ивана Антић

Галваномангнетни ефекти

семинарски рад

Нови Сад, 2010.

Садржај

1	Предговор	3
1	Увод	4
2	Халов ефекат	5
2.1	Едвин Херберт Хол.....	5
2.2	Холов ефекат.....	6
2.3	Холов ефекат у полупроводницима	9
2.4	Холов ефекат у јонизованим гасовима	10
3	Магнетоотпорност	10
4	Корбино ефекат	12
5	Ефекти Етингсхаузена и Нернста	12
5.1	Валтер Нернст	12
5.2	Алберт фон Етингсхаузен	13
5.3	Ефекти Етингсхаузена и Нернста	13
6	Литература	14

1 Предговор

Тема овог рада су галваномангнетни ефекти:

- Халов ефекат,
- трансверзална магнеторезистенција,
- Ettingshausen-ов ефекат и
- Nernst-ов ефекат.

Владимир Голуб
број индекса 545/06
Јована Миљић
број индекса 799/06
Ивана Антић
број индекса 81/06

Нови Сад, април 2010.

1 Увод

Физичке појаве које настају када у материјалима постоји заједничко деловање магнетног и електричног поља називају се галваноманетне појаве. У галваноманетне појаве спадају: Hall-ов ефекат, Ettingshausen-ов ефекат, попречна(трансверзална) магнеторезистенција и Nernst-ов ефекат. Галваноманетни ефекти су у блиској вези са термомагнетним ефектима.

Спољашње поље може бити електрично, магнетно, оптички сигнал, или температурни градијент. Они мењају дистрибуцију унутрашње енергије која опет мења нека електронска својства, као што је концентрација или покретљивост носача.

Нека се густина електричне струје j трансверзално простира у магнетном пољу H_z , на пример, уз x . Тада посматрамо следеће попречно- попречне ефекте:

(1) Hall-ов ефекат: електрично поље дуж y .

(2) Ettingshausen-ов ефекат: температурни градијент дуж y .

Такође се анализирају и следећи попречно- лонгитудинални ефекти:

(3) трансверзална магнеторезистенција: промена електричног потенцијала дуж x (у смеру струје).

(4) Nernst-ов ефекат: температурни градијент дуж x .

Нека је густина електричне струје j дуж H . Најважнији је ефекат лонгитудиналне магнеторезистенције или промена електричног потенцијала дуж H .

2 Халов ефекат

2.1

Едвин Херберт Хол



Амерички физичар (1855-1938). Хол је рођен у Великим Водопадима у Мејну, и студирао је на Џонс Хопкинс Универзитету, у Балтимору, где је докторирао 1880. После годину дана у Европи, прикључио се факултету Харвард и био је постављен за професора физике 1895., где је остао до одласка у пензију 1921. Док је радио своју тезу, Хол је почео да разматра проблем који је првенствено поставио Максвел, а односи се на снагу коју проводник, који преноси струју, има у магнетном пољу. Да ли сила делује на проводник или струја? Тврдио је да ако је струја је под утицајем магнетног поља онда треба да постоји "стање стреса...струје која пролази кроз једну страну жице". Хол користити танке златне фолије и 1879. је открио први пут да електрични потенцијал делује вертикално на струју и

магнетно поље.

Страна фолије која је на вишем напону зависи од знака наелектрисања преносиоца; Холов рад је показао да су у металима носиоци наелектрисања негативног знака. Данас је познато да је преносник овог негативног наелектрисања електрон.

Ефекат је од тада познат као *Холов ефекат*.

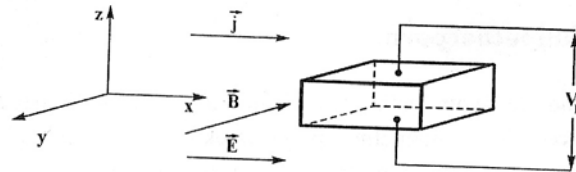
Једноставна интерпретација је да носиоци наелектрисања који се крећу дуж проводника трпе трансверзалну силу и имају тенденцију да се наносе на једну страну. Знак Холовог напона даје информацију о томе да ли су носиоци наелектрисања позитивни или негативни.

Више од века након Холовог открића Клаус фон Клицинг 1985. је добио Нобелову награду за физику за рад на *Холовом ефекту*. Пре почетка рада фон Клицинг је мислило да је износ разлика потенцијала на крајевима фолије (траке) био у директној пропорцији са снагом магнетног поља, што је већа снага магнетног поља, већа је разлика потенцијала. Фон Клицинг је показао да под посебним условима ниске температуре, јаког магнетног поља, у дводимензионалним електронским системима (у коме се електрони су везани за кретање у равни), напон односно разлика потенцијала се повећава са порастом јачине магнетног поља.

2.2

Холов ефекат

Демонстрацију Холовог ефекта приказаћемо на слици 1.¹



Слика 1. Илустрација Холовог ефекта код узорка облика паралелопипеда

Укључивање електричног поља \vec{E} доводи до појаве струје густине \vec{j}

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (1)$$

Истовремено на носиоце наелектрисања делује, због присуства магнетног поља \vec{B} и Лоренцова сила \vec{F}

$$\vec{F} = evB\vec{k} \quad (2),$$

где је \vec{k} одговарајући орт узимајући у обзир геометрију као на слици 1.

Лоренцова сила се може дефинисати и на овај начин:

За магнетно поље јачине B (дато осом z), и за честице које теку брзином v (дато осом x) које трпе Лоренцову силу F_L (дато осом y) важи следећи израз:

$$F_L = -qvB \quad (3),$$

где је q наелектрисање честица.

Ова сила изазива скретање честица тако да се ствара несклад између напона на различитим странама проводника. Скретање честица се наставља све док електрично поље E_y као резултат ове неравнотеже произведе силу

$$F_y = qE_y \quad (4)$$

која поништава Лоренцову силу.

Под дејством Лоренцове силе у правцу \vec{k} орта ће се кретати носиоци наелектрисања без обзира да ли су у питању електрони или шупљине, јер промена знака наелектрисања би била праћена и променом смера брзине дрефта. Тако да се под дејством ове силе концентришу носиоци наелектрисања који ће генерисати ново поље са Холовим напонем V_h .

У пракси, равнотежно стање $F_L + F_y = 0$ се постиже готово моментално стварајући стање мировања Холовог поља

$$E_y = vB \quad (5).$$

Дакле, Холов ефекат је резултат разлике потенцијала (Холов напон) у електричном проводнику кроз који електрична струја протиче у присуству магнетног поља.

Правац разлике потенцијала нормалан је на правац магнетног поља и нормалан је на правац струје.

¹ Слика је скенирана из литературе [1], глава 9, страна 279.

Густина електричне струје дата је са

$$J_x = nqv \quad (6),$$

где је n концентрација носиоца наелектрисања.

Холова отпорност је дефинисана:

$\rho_{yx} = \frac{E_y}{J_x}$ (7) из које произилази да коришћењем (5) и (6) добијамо:

$$\rho_{yx} = \frac{B}{nq} \quad (8).$$

Холов коефицијент је дат са:

$$R_0 = \frac{\rho_{yx}}{B} \quad (9),$$

а како нам је позната једначина (8) следи да:

$$R_0 = \frac{1}{nq} \quad (10).$$

У оквиру теорије о слободним електронима простих метала, очекује се да је q наелектрисање електрона $-e$, а за n је узето да буде $n = Zn_A$, где је Z валенца метала, а n_A концентрација атома. Тада важи:

$$R_0 = \frac{-1}{n_A Ze} \quad (11).$$

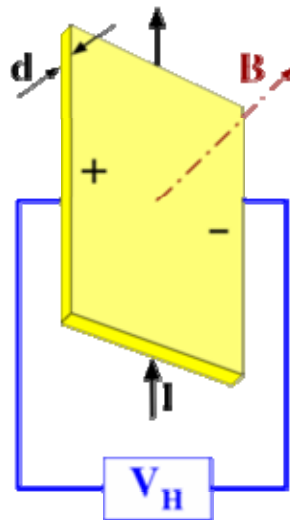
Једначина (11) приближно важи у једноставним моновалентним металима али опада драстично за друге материјале, често чак и дајући погрешан знак.

Објашњење за неуспех једначине (11) био је један од великих првих тријумфа квантне теорије материје

За једноставне метале где постоји само један тип носиоца наелектрисања (електрони) Холов напон V_H је дат са:

$$V_H = \frac{-IB}{dne} \quad (\text{Слика 2}), \text{ где } I \text{ представља јачину струје која протиче кроз}$$

плочу(траку, фолију), B је магнетна индукција, d је дебљина плоче, e је наелектрисање електрона, а n је концентрација преносиоца наелектрисања.



Слика 2.

Теорија структуре зона показује како судари са периодичним низом атома у кристалу проузрокују да носиоци струје буду шупљине које су позитивног наелектрисања при чему ти носиоци мењају знак Холовог коефицијента. Могуће је да се створи електрон гаса, у специјалним униполарним транзисторима, који је, у ствари дводимензионалан. Тада Холова отпорност за идеализован систем у две димензије је дат са:

$$\rho_{xy} = -\rho_{yx} = \frac{B}{n_s e} \quad (12),$$

где n_s представља концентрацију електрона по јединици површине.

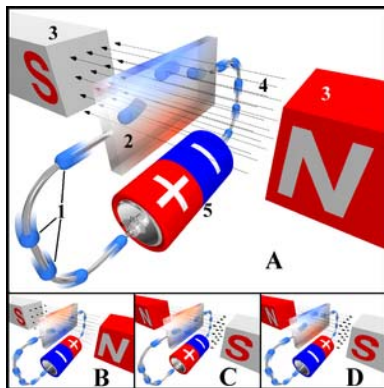
Међутим, ако се мери вредност ρ_{xy} за високо-квалитетне уређаје може се приказати као функција од B , линеарно понашање предвиђено једначином (12) је посматрано само за ниске области. На високим областима Холова отпорност је независна од B . Вредности ρ_{xy} су прилично тачно дате универзалном релацијом:

$$\rho_{xy} = \frac{h}{e^2 \nu} \quad (13),$$

где је h Планкова константа, а ν је цео број или разломак. Апсолутну тачност са којом једначина потврђена је $\frac{1}{10^6}$. Квантна јединица Холове отпорности

једнака је: $h/e^2 \simeq 25,812.80 \Omega$.

Објашњење ове невероватне појаве укључује више квантно-механичких ефеката. У присуству јаког магнетног поља и ниске температуре, може се посматрати квантни Холов ефекат, што је квантизација Холовог напона. У квантном режиму ρ_{xx} , дисипативна лонгитудинална отпорност, тежи нули у Холовој висоравни. Претпоставља се да када је температура једнака нули, дисипација (расипање) је једнака нули и тада једначина (13) сигурно важи. Скоро потпуно одсуство дисипације у квантном Холовом режиму подсећа на суперпроводљивост.



Слика 3. Дијаграм Холовог ефекта који приказује ток електрона.

Легенда:

1. Електрони
2. Холови елементи или Холов сензор
3. Магнети
4. Магнетно поље
5. Извор напајања

Опис:

На цртежу "А", Холов елемент заузима негативан поларитет на врху ивице (представљено плавом бојом) и позитиван на доњем рубу (представљено црвеном бојом). На "В" и "С" цртежу, или електрична струја или магнетно поље је обрнуто, па изазива да се поларизација промени. На цртежу "Д" извршено је окретање и струје и магнетног поља, што доводи до тога да Холов елемент поново преузме негативан поларитет на горњој ивици.

Треба истаћи да детаљно третирање овог ефекта мора узимати у обзир низ фактора. Пре свега се то односи на типове носиоца наелектрисања, њихову концентрацију и покретљивост. Код полупроводника је од значаја да ли се ради о случају слабих, јаких, или довољно јаких магнетних поља.

У сваком случају, Холов ефекат интензивно одражава микро особине материјала и зато пружа повољне могућности за примену у испитивању параметара од значаја за кинетичке процесе и детекцију неких физичких величина.

Холов ефекат се користи као индиректан доказ о постојању шупљина као слободних квазичестица, а мерење температурне зависности неких параметара везаних за ову појаву омогућују одређивање карактеристика и величина енергетских процеса и покретљивости носилаца наелектрисања.

Такође се на основу овог ефекта израђују широко коришћени уређаји који су без покретних делова, а омогућују мерења јачине магнетног поља. Овакви магнетометри су релативно малих димензија и имају практичне сонде које карактеришу магнетно поље у жељеној тачки.

Холов ефекат има примену у неким реле уређајима, модулаторима, мултипликаторима фреквенција, појачивачима итд.

2.3 Холов ефекат у полупроводницима

Када се преносник струје - полупроводник излаже у магнетном пољу, носиоци наелектрисања у полупроводнику трпе силу у правцу вертикалном на магнетно поље и струју. Због равнотеже, напон се појави на ивицама полупроводника. Једноставне формуле за Холов коефицијент постају сложеније за полупроводнике, где обично и шупљине и електрони који могу бити присутни у различитим концентрацијама и имају различиту покретљивост. За умерену јачину магнетног поља једначина Холовог коефицијента гласи:

$$R_H = \frac{-n\mu_e^2 + p\mu_h^2}{e(n\mu_e + p\mu_h)^2}, \quad (14)$$

где је n концентрација електрона, p концентрација шупљина, μ_e покретљивост електрона, μ_h покретљивост шупљина, а e апсолутна вредност електронског наелектрисања.

За широко примењене области користи се аналоган израз изразу за тип једног преносника:

$$R_H = \frac{1}{(p - n)e}. \quad (15)$$

2.4

Холов ефекат у јонизованим гасовима

Холов ефекат у јонизованим гасовима (плазма) се значајно разликује од Холовог ефекта материје (где је Холов параметар увек врло инфериоран у односу на јединство). У плазми, Холов параметар може узети било коју вредност. Холов параметар β у плазми је однос између електрона гирофреквенције Ω_e и електрон-тешких честица судара фреквенције ν :

$$\beta = \frac{\Omega_e}{\nu} = \frac{eB}{m_e \nu}, \quad (16)$$

где је e наелектрисање електрона ($1,6 \times 10^{-19}$ кулона); B је магнетно поље (јединица је тесла); m_e је маса електрона ($0,9 \times 10^{-30}$ kg).

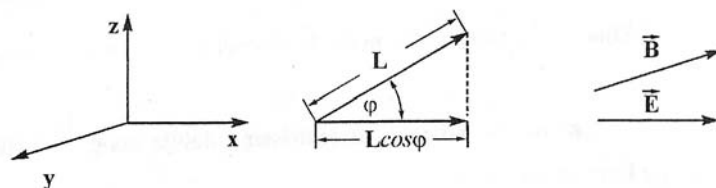
Холова вредност параметра повећава се са повећањем јачине магнетног поља.

Два вектора \mathbf{J} и \mathbf{E} чине **Холов угао** θ који такође даје Холов параметар:

$\beta = \tan \theta$, где је \mathbf{J} густина струје која није колинеарна са вектором електричног поља.

3 Магнетоотпорност

Под дејством електричног поља електрони се између два судара крећу праволинијски. Утицај магнетног поља узрокује измену ове путање те би у правцу електричног поља могло доћи до скраћења пређеног пута (Слика.²)



Слика 4. Илустрација утицаја магнетног поља на путању електрона у електричном пољу

Наиме, ако је L дужина слободног пута и под дејством магнетног поља долази до скретања праволинијског пута под углом φ у односу на правац електричног поља, ефективан слободан пут има вредност $(L \cos \varphi)$. Тако се ефективан слободан пут смањује под дејством магнетног поља, а електрична отпорност расте.

² Слика је скенирана из литературе [1], глава 9, страна 280.

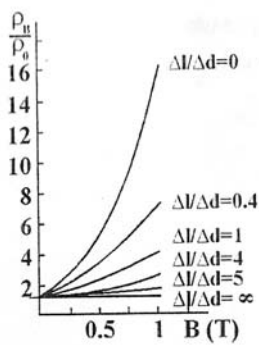
У области релативно слабих магнетних поља, зависност специфичне отпорности има облик:

$$\rho = \rho_0(1 + H_0 B^2), \quad (17)$$

где је H_0 коефицијент магнетоотпорности.

Са порастом јачине магнетног поља, смањује се коефицијент магнетоотпорности што утиче на успоравање пораста отпорности и достизање сатурације промене у односу на раст поља.

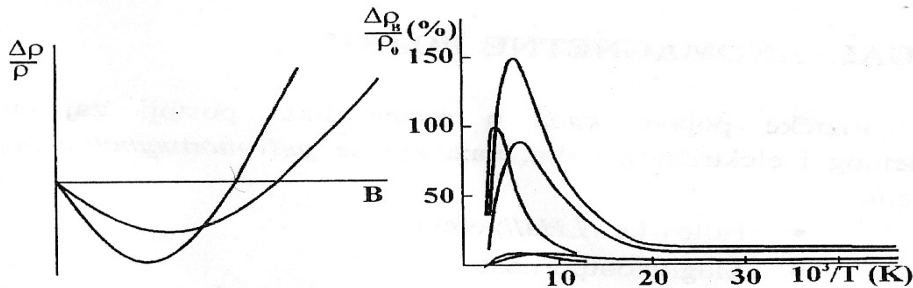
Посматрајући узорак релативно малих димензија пресека, могло би се закључити да се може очекивати одсуство ефекта магнетоотпорности због утицаја Холовог поља. Холово поље би могло да компензује утицај магнетног поља па не долази до изражаја ефекат магнетоотпорности. Брзина носилаца наелектрисања је различита, тако да магнетно поље има утицај и на носиоце наелектрисања који су и бржи и спорији од средње вредности дрефтовске брзине. Резултат је да Холово поље умањује овај ефекат, али га не неутралише. Ефекат магнетоотпорности зависи и од узорка. На слици 5 приказана је зависност магнетоотпорности код узорка у форми диска (диск Корбина), за различите односе дужина и радијуса.



Слика 5

Може се видети да Холово поље има све мањи утицај што је однос дужине и пресека већи (крива 1, однос дужине и пресека тежи бесконачности, а зависност отпора од магнетног поља изостаје). Са друге стране утицај магнетног поља је најизразитији при достизању минималног односа дужине и пресека (крива 6, однос дужине и пресека тежи нули).

Могу се запазити у неким случајевима промене које доводе до смањивања специфичне отпорности у неким интервалима вредности магнетног поља. На слици 6 приказано је понашање релативне специфичне отпорности за телурид живе састава $Cd_{0.25}Hg_{0.75}Te$, у зависности од јачине магнетног поља (а) и температуре (б).



Слика 6.

Уочљива је област негативне магнетоотпорности и присуство изразитих максимума на кривој зависности ове величине од температуре.

4 Корбино ефекат

Орсо Марио Корбино (30. април 1876.– 23. јануар 1937) је био италијански физичар и политичар. Радио је као професор у Месини (1905) и Риму (1908). Проучавао је утицај спољашњих магнетних поља на кретање електрона у металима и открио је Корбино ефекат. Корбино је радио са Дамиано Макалусом при чему су открили Макалусо-Корбино ефекат, снажна магнетна ротација равни поларизације код посматраног таласа близу линије апсорпције материјала кроз који светлост путује. Корбино ефекат је феномен сличан Халовом ефекту, али на металном узорку у облику равни диска, производи "кружну" струју кроз диск.

5 Ефекти Етингсхаузена и Нернста

5.1

Валтер Нернст



Немачки физички хемичар и физичар **Валтер Херман Нернст** (1864-1941) је познат по теоријама хемијског афинитета које је убацио у трећи закон термодинамике. За овај рад је 1920. добио Нобелову награду из хемије. Помогао је развоју модерне физичке хемије, електрохемије, термодинамике, хемије чврстих тела и фототохемије. Основао је Институт Физичке Хемије и Електрохемије у Готингену (Göttingen). Сем трећег закона термодинамике, познат је још и по: Нернствој лампи, Нернстовиј једначини, Нернстовом ефекту, Нернст-Планковој једначини итд.

5.2

Алберт фон Етингсхаузен



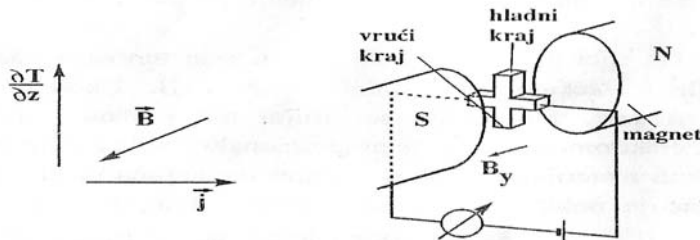
(седи, други с лева) Аустријски физичар (1850-1932). Био је професор физике на технолошком факултету у Грацу. Такође је предавао електрично инжењерство, а пре тога је био асистент Лудвигу Болцману. Са колегом Нернстом познат је по Етингсхаузеновом и Нернстовом ефекту.

5.3

Ефекти Етингсхаузена и Нернста

Компензовање дејства Лоренцове силе са силом која је последица Холовог напона односи се на усредњене вредности код носилаца наелектрисања. Као и код ефекта магнетоотпорности, у интервалу различитих брзина слободних носилаца наелектрисања, запајају се „хладнији“ и „топлији“ носиоци. У интеракцији судара са решетком ово може да доведе до размене енергије, односно до хлађења или загревања.

Када се градијент температуре јавља у нормалном правцу на магнетно поље и струјни ток, ради се о ефекту Етингсхаузена (Слика 7) и важи релација:

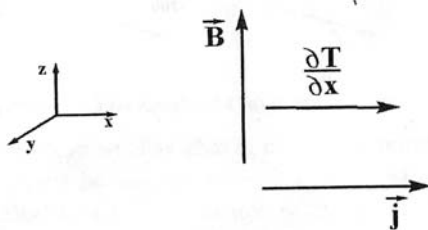


Слика 7.

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = -P_E I_X B_y, \quad (18)$$

где је P_E коефицијент Етингсхаузена.

Када се градијент температуре јавља дуж струјног тока (Слика 8), ради се о Нернстовом ефекту, односно о уздужном галваномagnetном ефекту. Он не зависи од правца магнетног поља. Измена смера струјног тока доводи до промене знака градијента температуре.



Слика 8.

6 Литература

- [1] Експериментална физика кондензоване метерије;
Драгослав М. Петровић, Светлана Р. Лукић; Универзитет у Новом Саду; Нови Сад, 2000.
- [2] www.wikipedia.org