

СЕНЗОРИКА НА ИНДИВИДУАЛНИТЕ ПОТЕНЦИАЛИ НА ХОЛ

SENSORICS OF THE INDIVIDUAL HALL POTENTIALS

S. V. Lozanova

Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences

“Acad. G. Bonchev” Str., Bl.2, Sofia 1113, Bulgaria

Email: lozanovasi@abv.bg

Abstract

A regularity related to the individual Hall surface potentials of the devices has been observed and interpreted. The potential of the sensor boundary from which the Lorentz force takes away the carriers is linear with the magnetic field, regardless of the value of the supply current. However, the Hall potential on the opposite surface, which has an increased electrons concentration, after a certain induction value increases nonlinearly. The new properties are due to the magnetically controlled surface current in the conductive materials. The occurrence of nonlinearity is a criterion for the quality of the surface of the respective Hall side. An express method for surface investigation of semiconductors with a focus on the microelectronic industry has been formulated and experimentally tested.

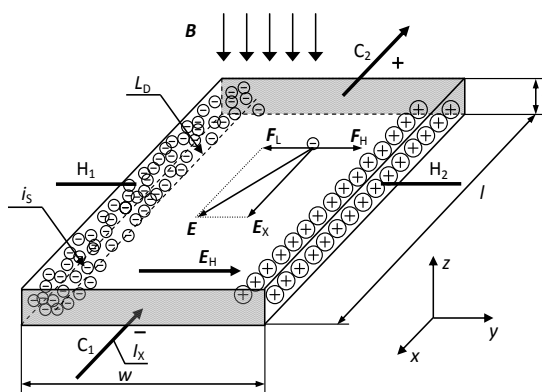
Keywords: Hall device, surface quality, sensorics, individual Hall potentials, Lorentz force

ВЪВЕДЕНИЕ

Независимо от утвърдилата се представа, че ефектът на Хол е едно от малкото перфектно изучени явления, до скоро не се обръщаше внимание на индивидуалните потенциали φ_{H1} и φ_{H2} на Холовите страни. Факторът, предоставящ сензорна информация за различни характеристики на проводящите материали е диференциалното напрежение на Хол $V_{H1,2}$ – алгебричната сума от потенциалите φ_{H1} и φ_{H2} :

$$V_{H1,2} = (r_H/qn_0t)I_0B \quad (1)$$

където n_0 е обемната равновесна концентрация на носителите, t е дебелината на Холовата пластина в посока на приложеното магнитно поле B , $I_0 \equiv I_x$ е захранващият образец ток и r_H е факторът на Хол, свързан с доминиращия разсейващ механизъм в даден температурен интервал ΔT , [1 - 7].



Фиг. 1. Схематично представяне на ортогонален образец на Хол с паралелепипедна форма. Указана е дължината на Дебай L_D , обозначенията са общоприетите в ефекта на Хол. Контакти C_1 и C_2 са захранващи.

Когато силата на Лоренц F_L отклонява електроните на ляво, в дясната приповърхностна зона с контакт H_2 остават некомпенсирани електрични товари на „оголените“ положителни йони N_s , Фиг. 1. Това са леги-

ращите донорни примеси в регулярната кристална решетка на основния полупроводник, например, Si, GaAs, InSb, InAs, InP, Ge и др. Колкото е по силна индукцията B и/или токът I_x , толкова повече донорни слоеве остават без компенсиращите ги електрони. В резултат дължината на Дебай L_D , определяща размера на нарушената електронеутралност на дясната зона, нараства [1,2,7]. Общият товар N_+ генерира положителната компонента на полето на Хол $\varphi_{H2} = 0.5E_{H2}$. Така при стайна температура $T = 300$ К в нарастващо магнитно поле B и/или захранващ ток I_0 не се променя линейността на потенциала $\varphi_{H2}(B)$, свързан с положителното зарядово състояние на дясния интерфейс. Различна е ситуацията върху лявата страна на образеца с контакт H_1 , Фиг. 1. Силата F_L концентрира върху нея допълнителни електрони, количеството товари $-\Delta n(F_L)$ на които съвпада с това на донорните йони N_{D+} , $|\Delta n| = N_{D+}$. Колкото е по-силен токът I_0 и/или индукцията B , толкова е по-висока концентрацията на неравновесните електрони $-\Delta n$ в приповърхностния слой с ширина L_D . Съгласно представите за ефекта на Хол, тези електрони са *статично* разположени върху лявата страна. Товарът $-\Delta n$ определя отрицателната компонента на потенциала на Хол $\varphi_{H1} = -0.5E_{H1}$.

Изложената информация е следствие от общоприетия модел на Хол явлението. Неотдавна, обаче бяха експериментално установени закономерности, наследващи от теорията: а) отклонените електрони към съответния интерфейс от силата F_L са *подвижни*, и б) в поле B тези токоносители формират линейен и нечетен магнитноуправляем повърхностен ток $\pm i_s(I_0, B)$, [8]. Друг пробив в разбирането за този ефект е установената връзка между състоянието на повърхността на Холовите страни и концентрацията на допълнителните електрони $\Delta n(F_L)$. Данните се съдържат в зависимостта на индивидуалния Холов потенциал $-\varphi_{H2}(I_0, B)$ от тока I_0 и полето B . До сега информацията за повърхностните характеристики в общия случай е косвена и има полуемпиричен характер, резултатите са свързани с апроксимирани зависимости, съдържащи множество *ad hoc* допускания за по-

върхностните процеси и дефекти. Друго ограничение е ниската измервателна точност поради косвените данни за параметрите на повърхността и невъзможността съществена част от влизашите в уравненията величини да се определят експериментално, [1,7]. Чрез представените тук резултати е формулиран във висока степен експериментално верифицируем метод за изследване качеството на повърхността. В настоящата статия е представен този подход, интерпретацията му и неговия импакт в микроелектрониката.

ГАЛВАНОМАГНЕТИЗЪМ НА ИНДИВИДУАЛНИТЕ ПОТЕНЦИАЛИ НА ХОЛ

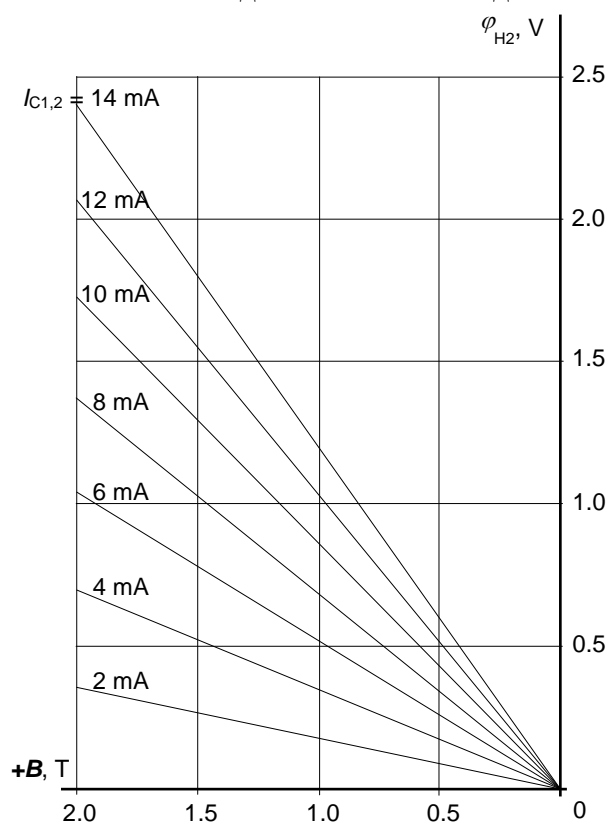
Представява интерес връзката на индивидуалните потенциали φ_{H1} и φ_{H2} със структурните особености на Холовите страни. Този проблем до сега не е изследван в теорията и практиката на Хол явлението. При отклонение на електроните от силата на Лоренц F_L към лявата страна, Фиг. 1, протича още и следният процес. Повърхността неминуемо съдържа включвания в кристалната решетка, деформации, дефекти, особености в легирането и израстването на полупроводниковите кристали, нарушения в регулярността на кристалната решетка, енергетични нива на Там, евентуални деформации или механични напрежения и т.н. Те водят в зависимост от температурата T до разнообразие от разсейващи механизми за движещите се в приповърхностния слой (интерфейс) електрони. До определено ниво на концентрацията на пресираните от силата F_L токоносители (стойност на индукцията B_0 при фиксиран ток $I_x = \text{const}$), електроните се очаква да „покрият електростатично“ всевъзможните дефекти, т.е. да се „изравни“ електростатично релефът от кристалните нарушения по повърхността. Реално такъв галваноманетичен механизъм не следва да оказва въздействие върху линейно нарастващата отрицателна компонента на полето на Хол $-0.5E_{H1}$, т.е. зарядовото формиране на „чистото“ отрицателно поле на Хол. При това наблюдаваната също от нас закономерност - магнитноуправляемият повърхностен ток $\pm \Delta i_s(B, I_0)$ също нараства

линейно във функция на полето \mathbf{B} и захранването I_x . Ето защо до стойности на индукцията $B \leq B_0$ при параметър $I_x \equiv I_{C1,2} = \text{const}$, повърхностният ток $i_s(\mathbf{B}, I_0)$ не променя линейността на отрицателния Холов потенциал $-\varphi_{H1}(-\mathbf{B})$. В този обхват на индукцията $B_0 \leq |\pm B|$ зависимостите на потенциала $\varphi_{H1}(-\mathbf{B})$ и на диференциалното напрежение на Хол $V_{H1,2}(\mathbf{B})$ са *линейни и симетрични* и са в съответствие с теорията на Хол ефекта. При по-нататъшното увеличаване на индукцията $B > B_0$, токът $i_s(\mathbf{B}, I_0)$ започва съществено да нараства. Причината е в електрично неутрализираните приповърхностни дефекти от увеличаващата се концентрация на пресираните от силата F_L електрони. Съпротивлението R_S на приповърхностния слой с контакт H_1 намалява като ръстът на концентрацията на електроните Δn_S води до още по-съществен ток $i_s(\mathbf{B}, I_0)$. Той създава в лявата приповърхностна област пад на напрежението, въздействащ на потенциала: $\varphi_{H1}(-\mathbf{B}) \sim i_s(\mathbf{B}, I_0)$. Зависимостта $\varphi_{H1}(\mathbf{B})$ при индукция $B \geq B_0$ не се очаква да е линейна. Потенциалът $\varphi_{H1}(-\mathbf{B})$ става нелинейно нарастващ след индукция B_0 за повърхността с повишената концентрация на електроните. В действителност скоростите на електроните в област с ширина L_D не следва да са с една и съща стойност. Неминуемата дисперсия на скоростите и на концентрацията Δn зависят от големината на тока I_x , индукцията B , т.е. от силата F_L и от профила на примесните повърхностни състояния, респективно механизмите на разсейване при съответна температура T . Ето защо нелинейността на потенциала $\varphi_{H1}(\mathbf{B})$ експериментално е регистрируема, когато средната скорост v_S на електроните, формиращи тока $i_s(\mathbf{B}, I_0)$ в приповърхностната зона най-вероятно се изравни и превиши обемната v_0 , $v_0 \leq v_S(\mathbf{B})$. По тази причина след критичната стойност на магнитната индукция B_0 потенциалът $\varphi_{H1}(\mathbf{B})$ върху контакт H_1 следва да е нелинейно нарастващата функция на полето \mathbf{B} . Той ще нараства по-бързо от стандартния „чист“ Холов сигнал - $\varphi_{H1}(\mathbf{B})$ предвид особеностите в намаляване на съпротивлението R_S на повърхностния слой.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОВЕДЕНИЕТО НА ПОТЕНЦИАЛИТЕ φ_{H1} И φ_{H2}

Експерименталното изследване на поведението на индивидуалните потенциали на Хол в хомогенни (паралелепипедни) полупродникови структури е осъществено с опитната постановка, описана в [8 - 10].

На Фиг. 2 са показани зависимостите на потенциала $\varphi_{H2}(\mathbf{B})$ при различни стойности на захранващия ток $I_{C1,2}$ за силициев образци с регулярна правоъгълна геометрия, когато силата на Лоренц F_L отклонява електроните към страната с контакт H_1 . До максимално възможната в нашите експерименти стойност на магнитната индукция $B = 3.0$ Т се наблюдава линейно поведение.

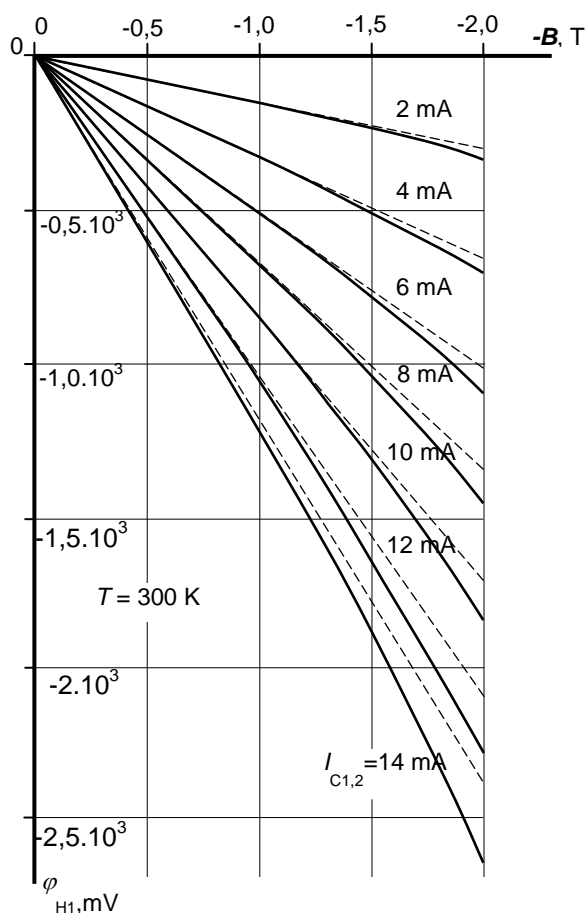


Фиг. 2. Характерно поведение на Холовия потенциал $\varphi_{H2}(\mathbf{B})$ във функция на магнитното поле $+\mathbf{B}$ при параметър захранващия ток $I_{C1,2}$ за силициев паралелепипеден образец; силата на Лоренц F_L отклонява електроните към страната с контакт H_1 , $T = 300$ К. Офсетът е предварително нулиран.

Когато силата на Лоренц F_L отнема електрони от съответната Холова повърх-

ност, тя естествено се зарежда положително. Потенциалите $+\varphi_{H1}(\mathbf{B})$ или $+\varphi_{H2}(\mathbf{B})$ в един и същ образец, при съответната поляризация на полето $\pm \mathbf{B}$, също са положителни като линейността им се запазва до максимално високата в нашите експерименти индукция $B = 3.0$ Т. Регистрираната магниточувствителност чрез потенциалите $\varphi_{H1}(\mathbf{B})$ и/или $\varphi_{H2}(\mathbf{B})$ в линейния участък на изследваната серия структури съставлява $SRI(\varphi_{H1}) \approx 85$ V/AT.

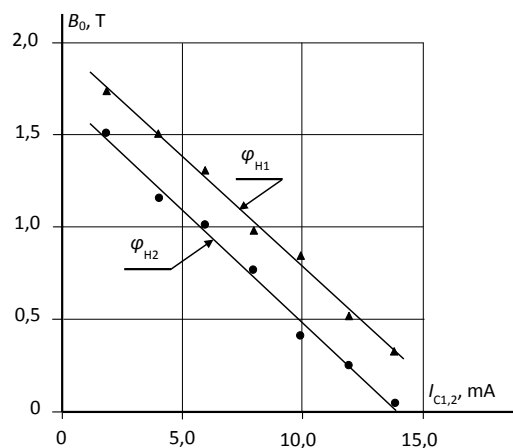
На Фиг. 3 са показани експерименталните зависимости на потенциала $\varphi_{H1}(-\mathbf{B})$ при различни стойности на захранващия ток $I_0 \equiv I_{C1,2}$ за силициевия образец, Фиг. 1, когато силата на Лоренц F_L пресираща токоносителите към страната с контакт H_1 . Потенциалът $-\varphi_{H1}(-\mathbf{B})$ е отрицателен и след определени критични стойности на индукцията B_0 , в зависимост от тока $I_0 \equiv I_{C1,2}$, стартира нелинейност.



Фиг. 3. Типични експериментални зависимости на Холовия потенциал $\varphi_{H1}(-\mathbf{B})$ при различни стойности на захранващия ток $I_0 \equiv I_{C1,2}$ за силициева правоъгълна структура, силата на Лоренц F_L отклонява електроните към страната с контакт H_1 , $T = 300$, К. Офсетът е предварително нулиран.

Аналогично е поведението и на потенциала $\varphi_{H2}(\mathbf{B})$ на същия образец ако силата F_L концентрира електроните към повърхността с контакт H_2 . Всичките изследвани образци при указаното условие за посоките на силата F_L демонстрират без изключение характерното поведение от Фиг. 2 и Фиг. 3. Колкото е по силен токът I_x , толкова по-съществено е изразена нелинейността, като тя настъпва при по-ниска стойност на индукцията B_0 . Друга важна особеност е, че нелинейността в отделните образци стартира при различни стойности на критичната индукция B_0 .

На Фиг. 4 са показани зависимостите $B_0(I_x \equiv I_{C1,2} \equiv I_0)$ на критичните индукции B_0 , при които стартира нарастващата нелинейност в потенциалите $\varphi_{H1}(\mathbf{B})$ и $\varphi_{H2}(\mathbf{B})$ на двете Холови страни за съответната поляризация на полето \mathbf{B} . Съществено е, че с увеличаване на тока I_0 индукциите B_0 в първо приближение намаляват линейно като за двете Холови повърхности те са отместени една спрямо друга. Поведението на другите сензори от изследваните серии е аналогично. В някои от тях линейната графика на потенциал φ_{H1} е с по-ниски стойности от тази на потенциал φ_{H2} . Изводът е, че критичната индукция B_0 зависи при прочие равни условия от качеството (дефектите, деформациите, механичните напрежения и т.н.) на Холовата повърхност на полупроводниковия материал.



Фиг. 4. Зависимост на критичните индукции $B_0(I_{C1,2})$, определящи началото на нелинейните участъци на Холовите потенциали в съответствие с данните за $\varphi_{H1}(\mathbf{B})$ и $\varphi_{H2}(\mathbf{B})$ при силициеви правоъгълни образци, $T = 300$ К.

Това означава, че при ток $I_0 = \text{const}$ стойностите на индукцията B_0 , при които стартира отклонението на потенциалите $\varphi_{H1}(\mathbf{B})$ или $\varphi_{H2}(\mathbf{B})$ от правата линия (силата F_L концентрира носителите върху съответните страни с контакти H_1 или H_2) ще са различни.

ПОТЕНЦИАЛИТЕ Φ_{H1} И Φ_{H2} КАТО ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ И МЕТРОЛОГИЧЕН МЕТОД В СЕНЗОРИКАТА

Получените резултати и проведените анализ позволяват формулиране на неизвестна до сега закономерност в сензориката на Хол. Индивидуалният потенциал върху Холовата повърхност на елементите, от която силата на Лоренц отнема токоносителите е линеен от магнитното поле, независимо от стойността на захранващия ток и на индукцията. Потенциалът на Хол на срещуположната повърхност, която е с повишена концентрация на електроните, обаче след определена критична стойност на индукцията B_0 , зависи от захранващия ток I_0 , се очаква да е нарастващо нелинеен. Новата закономерност се дължи на магнитно управляемия повърхностен ток $i_s(\mathbf{B}, I_0)$ в проводящите материали, като настъпването на нелинейността при фиксирани параметри I_0 и B е критерий за качеството на повърхността на съответната Холова страна.

От особено значение за сензориката е фактът, че критичните индукции B_0 за конкретните образци са различни. Съгласно предложената от нас интерпретация, причината е качеството на повърхността – дефекти, особености в легирането и израстването на полупроводниковите структури, нарушения на кристалната решетка, евентуални деформации или механични напрежения и др. Колкото електростатично е „по-релефна“ съответната повърхност, толкова по-висока е стойността на индукцията B_0 , за да се осъществи нейното „изглаждане“ - да се „повиши нейното качество“ чрез допълнителни от силата F_L електрони. Неочакваният за практиката извод е, че по-качествената повърхност (с по-малко дефекти) е тази, за която критичните индукции B_0 са с по-ниска стойност, Фиг. 4. От гледна точка сензориката на Хол, обаче по-добрият вариант

за приложенията са „релефните“ (с „по-ниско качество“) Холови страни. При тях стойностите на индукцията B_0 са по-високи, което дефинира по-широк обхват на линейност за практическо приложение на съответния потенциал, например φ_{H1} и диференциалното напрежение $V_{H1,2}(\mathbf{B})$. Този резултат е следствие на галваномагнитните особености в поведението на индивидуалните потенциали на Хол, докато диференциалното напрежение $V_{H1,2}(\mathbf{B})$ „усреднява“ чрез алгебрично сумиране индивидуалните нелинейности. До сега обяснението за генезиса на нелинейността на елементите на Хол, така и методологията за нейното минимизиране е било неадекватно. Освен това този важен резултат обяснява комутационната или реверсивната грешка, влошаваща метрологията на сензорите на Хол - различната степен на нелинейност за двете посоки на магнитното поле $\pm \mathbf{B}$.

Новото разбиране за природата на индивидуалните потенциали на Хол дава възможност да се детайлизира управлението на повърхностната проводимост чрез външно електрично поле, както е при MOS транзисторите с напрежението на гейта V_G . В този случай определяща е ролята на повърхностния потенциал Y_s в полупроводниковите (силициевите) структури. С напрежението на гейта $\pm V_G$ се осъществява изгъване в приповърхностната област на проводимата E_C и валентната E_V енергетични зони, и нивото на Ферми E_F в необходимия режим – обогатяване, инверсия или обедняване. С помощта на напрежението $\pm V_G$ се променя повърхностния потенциал Y_s , респективно проводимостта и режима на функциониране на MOS транзистора.

Следователно информацията за началната стойност на потенциала Y_s е от съществено значение. Управлението на индивидуалния потенциал $\varphi_{H1}(-\mathbf{B})$ с електрони чрез силата F_L т.е. с магнитното поле \mathbf{B} , съответстващо на режим обогатяване на интерфейса съдържа данни за стартовата (началната) стойност на повърхностния потенциал Y_s . Ето защо потенциалите φ_{H1} и φ_{H2} включват важна информация за състоянието и качеството на повърхността, което е ново направление в приложенията на ефекта на Хол. Изводът е, че индивидуалните

Холови потенциали представляват изследователски и метрологичен метод в сензориката.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия е обосновавана и доказана съществено нова страна на ефекта на Хол, полезно увеличаваща знанието за това явление. Тя се заключава в поведението на индивидуалните потенциали на Хол. Наблюдавано е нелинейно нарастване на единия потенциал след определена стойност на индукцията на магнитното поле. Стойността на магнитното поле при която възниква нелинейността се определя от качеството на повърхността - колкото повече са дефектите, толкова стойността на индукцията, при която тя стартира е по-висока, и обратно. Подходът е експресен и позволява проверка на качеството на силициевите пластини в процеса на производство на схемите и елементите.

*Изследванията са осъществени със съдействието на Националния център за компетентност
QUASAR № BG05M2OP001-1.002-0006*

REFERENCES

- [1] Monch W., Semiconductor Surface and Interfaces, 3rd Edit., Spriger, 2013.
- [2] Sze SM. Semiconductor Sensors, Wiley-Intersc., New York, 1994.
- [3] Heidari H, Bonizzoni E, Gatti V, et al., CMOS vertical Hall magnetic sensors on flexible substrate, IEEE Sens. J., 2016, p. 8736.
- [4] Kaufmann T. On the Offset and Sensitivity of CMOS-based Five-contact Vertical Hall Devices, in "MEMS Technology and Engineering", v. 21, 2013.
- [5] Roumenin CS., Solid State Magnetic Sensors, Amsterdam, Elsevier, 1994.
- [6] Neumaier D, Pindl S, Lemme M. Integrating graphene into semiconductor fabrication lines, Nat. Mater., 2019; 18, p. 525.
- [7] Peka GP. Fizicheskie iavlenia na poverhnosti poluprovodnikov, Kiev, Visha skola, 1984.
- [8] Roumenin C, Lozanova S, Noykov S. Experimental evidence of magnetically controlled surface current in Hall devices, Sensors and Actuators, 2012; A 175: 45-52.
- [9] Lozanova SV, Roumenin Ch S. Paralell-field silicon Hall effect microsensors with minimal design complexity, IEEE Sens. J 2009; 9(7):p. 761.
- [10] Lozanova S, Altunyan L, Noykov S, Ivanov A, Roumenin C. A nonlinearity induced by the Lorentz force in Hall devices, Compt. rendus ABS, 2017; 70(7): 1011-1018.