

Холлын Хувиргагч ба Түүний Хэрэглээ

П.Түвшинтөр^{1,*}, Д.Төмөрбаатар¹, Г.Шилагарди¹, Х.Цоохүү¹, М.Отгонбаатар¹
В.И.Прокошин², А.П.Драпезо²

¹National University of Mongolia, Ulan Bator, Mongolia,

²Институт тепло- и массообмена им. А.А. Лыкова НАН Беларуси, 220072, Минск, ул. П.Бровки, д.15, Беларусь,

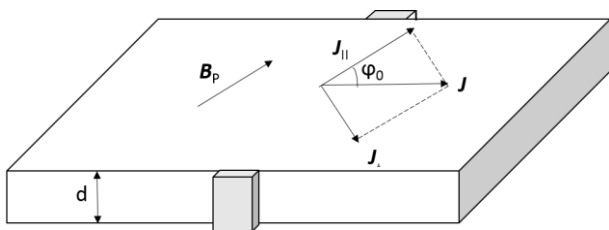
n-InSb_{1-x}Bi_x-i-GaAs бүтэцтэй гетероэпитаксиаль нимгэн хальсыг Те-ээр чанаржуулахад түүний гүйдэл зөөгчдийн концентрац ихсэж, температурын тогтвор сайжрав. Vi-ийн атом зангилгаа хооронд байхад хаалттай зонд донорын түвшинг үүсгэж байв. Теллураар чанаржсан гетероэпитаксиаль нимгэн хальсаар үйлдсэн холлын хувирагчийн мэдрэмж бараг нэг эрэмбээр нэмэгдэхийг ажиглав.

ОРШИЛ

Дамжуулагч ба хагас дамжуулагчид цахилгаан ба соронзон орон нэгэн зэрэг үйлчлэхэд үүсэх кинетик эфффектийг гальваномангнетик үзэгдэл гэнэ. Холлын эфффект энэ үзэгдлийн нэг юм. **B** индукцтэй соронзон оронд байгаа **d** зузаантай хагас дамжуулагчаар **p** нягттай гүйдэл гүйж байвал түүнд перпендикуляр чиглэлд үүсэх потенциал ялгавар буюу хүчдэл:

$$V = R_H I B_n d^{-1} + R_p I B_p^2 \sin(2\phi_0 / 2d) \quad (1)$$

Үүний **B_n**- соронзон индукцийн векторын нормаль байгуулагч, **B_p**- соронзон индукцийн векторын ялтсын хавтгай дээрх байгуулагч, ϕ_0 - гүйдлийн нягтын вектор **J** ба **B_p** хоёрын хоорондох өнцөг ϕ_0 , R_p - холлын планар эфффектийн коэффициент болно. Холлын планар эфффект хагас дамжуулагчийн хувийн эсэргүүцэл хөндлөн соронзон оронд өөрчлөгдсөнөөс үүсдэг (1-р зураг).



1-р зураг. Холлын планар эфффект.

Энд $J_{||} = J \cos \phi_0$ ба $J_{\perp} = J \sin \phi_0$ нь соронзон орон **B_p**-д параллель ба перпендикуляр чиглэсэн гүйдлийн байгуулагч юм. (1) томъёоноос харвал анхны дөхөлтөд (планар эфффектийг тооцохгүй бол) холлын хүчдэл дээжийн зузаанд урвуу пропорционал ажээ. Иймээс орчин үед холлын

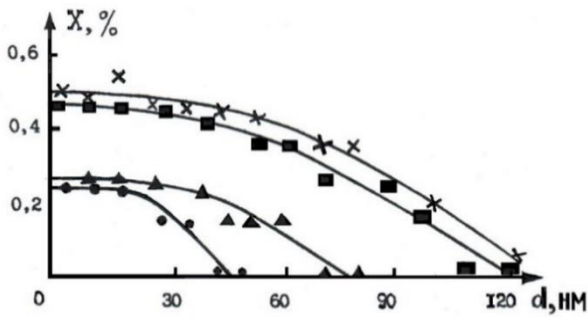
хүчдэлийг ихэсгэхийн тулд эпитаксиаль нимгэн хальсыг хэрэглэдэг болжээ [1].

1. ЭПИТАКСИАЛЬ НИМГЭН ХАЛЬС

Кристалл торынх нь тогтмол бараг адилхан нэг кристалл дээр нөгөө кристаллын нимгэн үеийг хатуу төлөвтэй бодисыг вакуумд ууршуулах, эсвэл хий буюу шингэн төлвөөс тундасжуулах замаар үйлдсэн нимгэн хальсыг гомоэпитаксиаль хальс гэнэ. Хэрэв хоёр бодисын кристалл торын бүтэц өөр байвал гетероэпитаксиаль нимгэн хальс гэнэ. Эдгээр гетероэпитаксиаль нимгэн хальсны зузаан 1-2 мкм орчим, ууршуулж байгаа бодис ба түүнийг өөр дээрээ тундасжуулан суулгах суурь бодис хоёрын кристалл торын тогтмолуудын ялгаа 10% иас хэтэрч болохгүй.

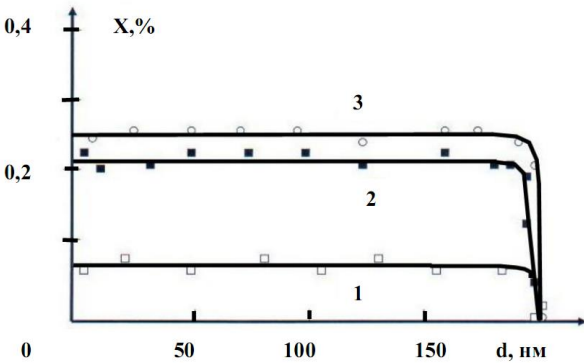
Мөн суулгах бодисын молекулуудын урсгалаар суурь бодисоо буудуулж ч болно [2]. Жишээлбэл, хагас хөндийрүүлэгч арсенид галийн (GaAs) гадаргууг 5 дугаар бүлгийн элементээр буудуулдаг [3]. Бид энэ аргыг арай хялбарчилсан. Эхний шатанд өндөр температурт вакуумд ууршуулах аргаар n-InSb-i-GaAs бүтэцтэй гетероэпитаксиаль нимгэн хальсыг гарган авсан. Хоёрдох шатанд энэ хальсаа бага хэмжээний висмутын хамт кварцан ампулд хийгээд дулаан боловсруулалтад оруулахад диффузийн процесс явагдаж сэндвич маягийн бүтэцтэй n-InSb_{1-x}Bi_x ... n-InSb-i-GaAs-ийн нимгэн хальс үүсэв. Энэ нимгэн дээжийн гүнээр висмут жигд биш тархсан байв (2-р зураг). Висмутын тархалтыг 1.4МэВ энергитэй гелийн ионы резерфордын урвуу сарнилын спектрийг ашиглан тодорхойллоо. Бүх туршилт ба хэмжилтийг $5 \cdot 10^{-4}$ Па даралттай орчинд гүйцэтгэв.

* Electronic address: tuvshintur@num.edu.mn



2-р зураг. 290°C, 370°, 400°C-ийн температурт гүн дагуух висмутийн тархалт. Ханалт болох хугацаа 2 цаг.

Гуравдугаар шатанд сэндвичээ $3 \cdot 10^{-4}$ Па даралттай стандарт вакуумын камерт удаан хугацааны турш изотермээр халааж дараа нь аажуухан хөргөсөн. Дулаан боловсруулалтын улмаас висмут InSb -ийн гүн дагуу диффузлэн тархсаар суурь бодис GaAs-д хүрсэн байв (3-р зураг). Энд висмут $InSb_{1-x}Bi_x$ стехометрийн бүтэцтэй, n төрлийн дамжиц бүхий хатуу уусмалыг үүсгэх замаар нимгэн хальсны гүнээр бараг жигд тархсан байв. Харин x-ын хэмжээ дулаан боловсруулалтын температураас хамаарч байлаа.



3-р зураг. 6 цагийн турш халаасны дараа нимгэн хальсны гүнээр висмут тархсан байдал. Ханалтын температур : 1-330°C, 2-370°C, 3-400°C.

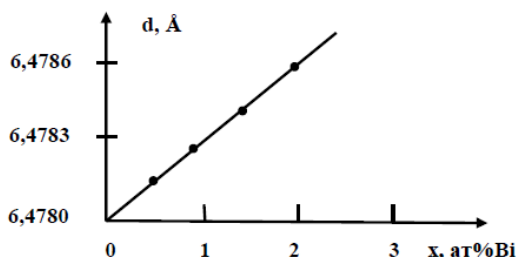
Хоёрдугаар шатанд эпитаксиаль нимгэн хальс $InSb_{1-x}Bi_x$ үүсэх процесс дараах маягаар явагдана. Диффузийн улмаас эпитаксиаль хальсны гадаргууд залгигдсан висмут цаашаа InSb -ийн нимгэн хальсны гүн рүү диффузээр нэвчин орно. Энэ үед сурьмагийн атомыг висмутийн атомаар халахад зузаарч байгаа нимгэн үе тэлэлтэд орно. Тооцооноос үзвэл, гетероген хилийг үүсгэх материалуудын торын үе харилцан адилгүйгээс болж хуримтлагдах хүчлэг, висмутийн концентрац ихсэхэд шугаман хуулиар өснө. Хүчлэгийн хэмжээ бага бөгөөд висмутын концентрац 1.2% байхад харьцангуй деформаци 0.06%-иас хэтрэхгүй. Суурь бодис GaAs, мөн InSb ба $InSb_{1-x}Bi_x$ -ийн холимгоос тогтох нимгэн эпитаксиаль үеийн дулаан тэлэлтийн коэффициентийн харилцан адилгүйгээс үүсэх хоёрдох төрлийн

хүчлэг тасалгааны температураас ханалтын температур хүртэлх өргөн хязгаарын дотор дулаан тэлэлтийн коэффициентийн ялгавард пропорционал байх ажээ. Харьцангуй деформацид өгөх түүний нэмэр висмутийн концентрац 1.2% байхад 0.05% орчим байна. Энэ хоёр деформацийн нийлбэр эффект 0.11% байгаа нь $InSb-InSb_{1-x}Bi_x$ -ийн хатуу уусмал үүсэхэд буй болох нэмэлт дислокацийг үүсгэх критик деформациас бараг 2 дахин бага байна. Энэ бол нимгэн хальсанд дурьдсан температурын мужид висмутийн уурыг ханах хэмжээнд нь хүртэл диффузийн замаар нэмэгдүүлэхэд торын тогтмолын зөрөөгөөс болж шинээр дислокаци үүсэхгүйгээр үл барам висмутаар баяжуулснаас үүсэх торын эвдрэл харимхай деформацийн мужаас халихгүй байв.

2. ТЕЛЛУРААР ЧАНАРЖУУЛСАН ЭПИТАКСИАЛЬ НИМГЭН ХАЛЬС

Туршлагын үр дүнгээс харвал вакуумд ууршуулах аргаар үйлдсэн бидний эпитаксиаль нимгэн хальсны доторх гүйдэл зөөгчийн хөдлөх чадварыг өсгөж, мөн хугацаа ба температурын тогтворыг сайжруулах шаардлагатай билээ. Хэрэв энэ асуудлыг шийдэж чадвал холлын хувиргагчийн хэмжээг багасгахын хамт геомагнитийн орон ба тогтмол соронзон орон хир зэрэг нэгэн төрөл болохыг шалгах чадвартай болтол мэдрэмжийг нь сайжруулж болох хэт ирээдүй харагдаж байв. Энэ зорилгоор бид гарган авсан гетероэпитаксиаль нимгэн хальсаа теллурээр чанаржуулав. $A^{III}B^V$ төрлийн нэгдлийн B^V -ийг B^{VI} -аар солиход n-төрлийн дамжуулалттай болно. Ингэснээр бид гүйдэл зөөгчдийн тоог нэмэгдүүлж чадна. Эхлээд вакуумд ууршуулах аргаар $(1 \cdot 10^{18} - 9 \cdot 10^{18}) \text{ см}^{-3}$ хэмжээний гүйдэл зөөгчдийг агуулсан теллурээр чанаржсан гетероэпитаксиаль бүтэцтэй n-InSb-i-GaAs-ийн нимгэн хальсыг гарган авлаа. Дараа нь теллурээр чанаржсан n-InSb-i-GaAs-ийн эпитаксиаль нимгэн хальсаа бага хэмжээний висмуттэй хамт вакуумжуулсан ампулд хийгээд дулаан боловсруулалтад оруулж диффузийн процесс явуулахад висмутээр ханасан теллурээр чанаржсан сэндвич маягийн бүтэцтэй n-InSb1-xBix ... n-InSb -i-GaAs -ийн гетероэпитаксиаль бүтэц үүсэв. Эцэст нь сэндвичээ $3 \cdot 10^{-4}$ Па даралттай вакуумын стандарт камерт байрлуулаад удаан хугацааны турш изотермээр халааж байснаа аажуухан хөргөлөө. Дулаан боловсруулалтад оруулсны дараа стехометрийн бүтэц нь дулаан боловсруулалтын температур ба x-ээс хамааран өөрчлөгдөх, бүх эзэлхүүнээр нь висмут жигд тархан байрласан n-төрлийн дамжицтай n-

$\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x$ хатуу уусмалын нимгэн хальс бүрэлдсэн байв. 4-р зурагт диффрактограммын үр дүнгээс тооцон олсон кристалл торын тогтмол d ба висмутийн концентрац хоёрын хамаарлын график үзүүлээ.

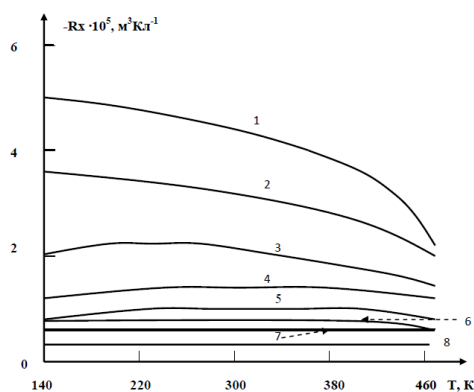


4-р зураг. $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x$ хатуу уусмалын торын параметр висмутын концентрац x -ээс хамаарах.

3. ТЕЛЛУРААР ЧАНАРЖСАН ЭПИТАКСИАЛЬ НИМГЭН ХАЛЬСНЫ ФИЗИК ШИНЖ ЧАНАР

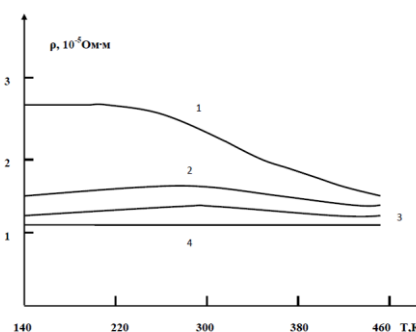
Аливаа хагас дамжуулагчийн физик шинж чанар юуны өмнө холлын коэффициент, цахилгаан эсэргүүцэл ба дифференциал термоцахилгаан хөдөлгөгч хүчний (термо-цхх) температурын хамаарлаар тодорхойлогдоно. Одоо бид гаргаж авсан теллурээр чанаржсан гетероэпитаксиаль нимгэн хальсныхаа эдгээр шинж чанарыг судлая. 5-р зурагт $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs/Te}$ дээжийн холлын коэффициент R_x -ын температурын хамаарлыг харуулжээ. Теллураар чанаржуулсан дээжийн бага температур дэх холлын коэффициент бараг тогтмол бөгөөд температур өсөхөд бага зэрэг өөрчлөгдөж байгаа нь хувийн дамжицын гүйдэл зөөгчдийн өгсөн нэмэртэй холбоотой юм (6-р зураг). Чанаржуулалтын түвшин өсөхөд гүйдэл зөөгчдийн концентрац бүх температурын мужид тогтмол байна (7 ба 8-р шугам). Цэвэр InSb -ийг бодвол висмутийг агуулсан дээжийн холлын коэффициентийн температурын хамаарал арай нарийн бүтэцтэй $x=0.2\text{ат.}\% \text{Bi}$ байхад температур ихсэхийн хамт холлын коэффициент өсөх ба висмутийн концентрац ихсэхэд энэ хамаарал хадгалагдсаар байна. Энэ нь зангилаа хооронд орших висмутийн атомууд донорын шинжтэй байдгийг харуулах ажээ. Харин температур ихсэхэд тэдгээр нь кристалл торын зангилаан дээр очиж суувал сурьматай изовалент учир хаалттай зонд донорын түвшин үүсгэхгүй. Үүнээс болж цэнэг зөөгчдийн концентрац багасахад холлын коэффициент өснө. 100°C -аас их температурт холлын коэффициент модулиараа багасч байгаа нь дулааны энергиэр хувийн гүйдэл зөөгчид

дамжуулалтын ба валентын зонд гарч ирсэнтэй холбоотой ажээ.



5-р зураг. Теллураар чанаржуулсан, ба чанаржуулаагүй $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$ -ийн нимгэн хальсны холлын коэффициентын температурын хамаарал.

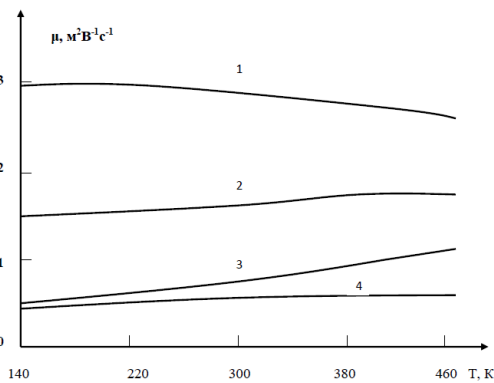
Хувийн эсэргүүцэл ρ -ын температурын хамаарал электронуудын концентрац $n = (eR_x)^{-1}$ ба тэдгээрийн хөдлөх чадвар хоёрын аль алины температураас хамааран өөрчлөгдөхөөс шалтгаалах тул нилээд нарийн бүтэцтэй юм. Температур өсөхөд цэнэг зөөгчдийн хөдлөх чадвар электронууд фононоос сарниснаас болж багасна (6-р зураг). Висмутийн концентрац ихсэхэд эсэргүүцэл өсч байгаа нь (1 ба 2-р муруй) голцуу электронуудын хөдлөх чадвар багассанаас болохоос биш цэнэг зөөгчдийн концентрац өссөнтэй холбоогүй. Теллураар чанаржсан дээжийн эсэргүүцэл донорын теллурын атомын үүсгэх гүйдэл зөөгчдийн концентрац өссөнөөс болж багасжээ (3 ба 4-р муруй).



6-р зураг. $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$ бүтэцтэй нимгэн хальс ба мөн теллурээр чанаржсан уул нимгэн хальсны хувийн эсэргүүцлийн температурын хамаарал. 1- $x=1.2\text{ат.}\% \text{Bi}$, 2- $x=0.2\text{ат.}\% \text{Bi}$, 3- $n_{\text{Te}}=7.68 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 4- $n_{\text{Te}}=1.02 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$.

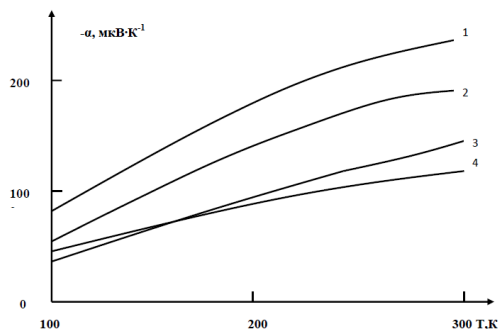
Нэгэнт хувийн хувийн эсэргүүцэл $\rho = (en\mu)^{-1}$ тул концентрац n ба хөдлөх чадвар μ шинж төрх ρ температураас хамаарах хамааралд тусгалаа олно. 7-р зурагт электроны хөдлөх чадвар μ -ын температурын хамаарлыг үзүүлжээ. Висмутийн концентрац ихсэхэд хөдлөх чадвар багасч байгаа нь висмутийн атом InSb -

ийн торыг сунгаж гаргасан торын эвдрэлээс электронууд сарних эффект нэмэгдсэнтэй холбоотой юм. $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$ бүтэцтэй эпитаксиаль нимгэн хальсны доторх электронуудын хөдлөх чадвар температур ихсэхэд бага зэрэг өсч байгаа үзүүлэлт тэдгээр нь ионжсон хольцийн атомуудаас сарниснаас болжээ. Эдгээр хольцийн атомууд InSb -ийн хоосон зайд суусан висмутийн ионууд буюу эсвэл донорын түвшингүүдийг үүсгэдэг залгилаа хооронд суусан эдгээр ионууд юм. Теллуурээр чанаржуулсан дээжийн гүйдэл зөөгчдийн хөдлөх чадвар температураас бараг хамаарахгүй байгаа нь ионжсон хольцийн атом ба торын фононоос сарних хэмээх хөдлөх чадварыг ихэсгэдэг ба багасгадаг хоёр сарнилын механизм нэгэн зэрэг үйлчилснээс болжээ. Температур өсөхөд халаалтын улмаас үүсэх хувийн дамжицийн цэнэг зөөгчдийн концентрац тийм их биш тул теллуурээр чанаржсан дээжүүдийн хувийн цахилгаан эсэргүүцэл температураас хамаарч бараг өөрчлөгдөхгүй.



7-р зураг. $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$ нимгэн хальс ба теллураар чанаржуулсан уул хальсны электроны хөдлөх чадварын температурын хамаарал. 1- $x=0.1$ ат. % Bi , 2- $x=0.2$ ат. % Bi , 3- $x=1.2$ ат. % Bi , 4- $n_{\text{Te}}=1.02 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Бидний гарган авсан $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$ -ийн гетероэпитаксиаль нимгэн хальсны дифференциал термо-цхх ба түүний температурын хамаарлыг 8-р зурагт харууллаа.

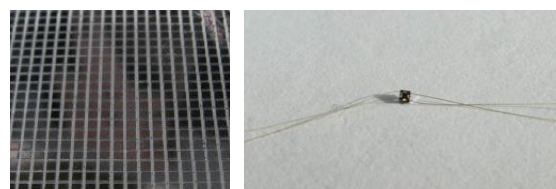


8-р зураг. $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$ нимгэн хальс ба теллураар чанаржуулсан уул хальсны дифференциал термо-цхх ба түүний температурын хамаарал.

Графикаас харвал, (77-220)K температурын мужид манай дээжийн дифференциал термо-цхх температураас бараг шугаман хамааралтай бөгөөд температурын 300K хүртэл нэмэгдүүлэхэд $\alpha(T)$ бараг ханах утгадаа ойртож байна. Энэ нь температур ихсэхэд дулааны энергиэр үүсгэсэн электронууд шинээр буй болсонтой холбоотой ажээ. Висмутийн концентрац ихсэхэд шинээр донорын төвшнүүд үүссэнээс дифференциал термо-цхх модулиараа багасна.

4. ТЕЛЛУРААР ЧАНАРЖУУЛСАН ЭПИТАКСИАЛЬ НИМГЭН ХАЛЬСНЫ ХЭРЭГЛЭЭ

Дээр дурьдсан судалгааны үр дүнгээс үзвэл, теллураар чанаржсан гетероэпитаксиаль бүтэц $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$ -ийн физик үзүүлэлт мэдэгдэхүйц сайжирч гүйдэл зөөгчийн концентрац 10^{18} см^{-3} хүртэл өсч тэдгээрийн хөдлөх чадвар висмутийн ионжсон атомаас сарниснаас болж нэмэгджээ [4]. Теллураар чанаржуулаагүй байхад хөдлөх чадварыг нэмэгдүүлэх ийм үзэгдэл ажиглагдахгүй байв [5]. Мөн гүйдэл зөөгчдийн концентрац n нэмэгдсэнээс холлын коэффициент багасч, дээжийн эсэргүүцэл ρ илэрхий буурав. Ялангуяа гетероэпитаксиаль нимгэн хальсны зузаан бараг нэг эрэмбээр багассанаас гадны соронзон орон дахь холлын потенциал ялгавар хэдэн арав дахин нэмэгдэж, түүний мэдрэх чадвар сайжирч, бэсрэг холлын хувиргагчийг хэрэглэн ахуй ба эрдэм шинжилгээний судалгаанд хэрэглэдэг тогтмол соронзон орны нэгэн төрөл чанарыг бараг цэг бүхэн дээр шалгах боломжтой боллоо. 9-р зургийн а,б-д гетероэпитаксиаль нимгэн хальсыг ургуулах суурь бодис, (GaAs) мөн төгсгөлүүдэд нь гүйдэл ба потенциалыг хэмжихэд зориулсан алтан утас гагнасан холлын бэсрэг хувиргагчийн зургийг харуулав.



(а) (б)

9-р зураг. Эпитаксиаль нимгэн хальсыг ургуулах суурь бодис (а), холлын бэсрэг хувиргагч (б).

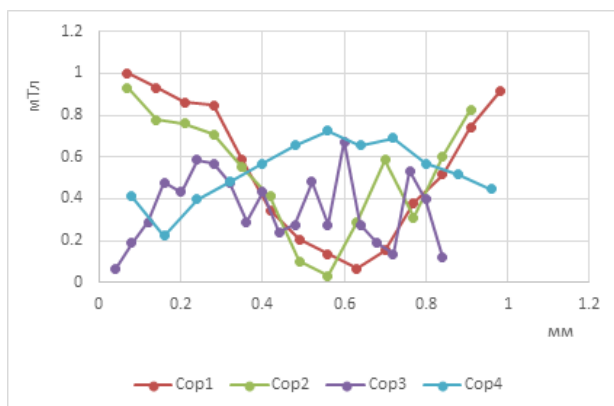
Холлын бэсрэг хувиргагч бүхий магнетометрийг хэрэглэн ахуйд хэрэглэдэг тогтмол соронзонгуудын нэгэн төрөл чанарыг

шалгасан үр дүнг графикаар дүрслэн үзүүлэв. Графикаас үзвэл ахуйд хэрэглэдэг тогтмол соронзонгуудын соронзон оронг нэгэн төрөл байлгах онцын шаардлагагүй ажээ.

ДҮГНЭЛТ

1. Теллураар чанаржсан гетероэпитаксиаль нимгэн хальс $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs/Te}$ -ийн гүйдэл зөөгчдийн концентрац нэмэгдэж, эсэргүүцэл багассанаас холлын потенциал ялгавар ихэссэн.
2. Эпитаксиаль бүтцийн доторх висмут зангилаа InSb -ийн зангилаа хооронд байхдаа донорын шинжтэй зангилаа дээр суувал сурьматай изовалент тул донорын түвшин үүсэхгүй.
3. Теллураар чанаржсан $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$ -ээр үйлдсэн гетероэпитаксиаль нимгэн хальсаар үйлдсэн холлын хувиргагчийн мэдрэх чадвар теллураар чанаржаагүй нимгэн хальсыг бодвол бараг нэг эрэмбээр илүү байна.
4. Теллураар чанаржсан гетероэпитаксиаль нимгэн хальсаар үйлдсэн магнетометрээр соронзон орны нэгэн төрөл чанарыг бараг цэг бүхэн дээр тодорхойлж болно.

ҮР ДҮН



10-р зураг. Янз бүрийн тогтмол соронзоны нэгэн төрөл чанарын үзүүлэлт.

НОМ ЗҮЙ

- [1] Прокошин В.И., Шепелевич В.Г, Ярмолович В.А., Устройство автоматика и робототехника на эффекте Холла. Минск, 1991.
- [2] T. Fujii, H. Suzuki, S. Hiyamiru. S_n -doped GaAs films grown by molecular beam epitaxy. Kujitsu Sci and Techn.J., 1979. Vol.15, pp.121-130.
- [3] Прокошин В.И., Драпезо А.П., Шилагарди Г., Х. Цооху, Ярмолович В.А. Синтез и исследование свойств полупроводниковых структур $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$, перспективных для изготовления миниатюрных элементов Холла

повышенной стабильности // Наноструктуры в конденсированных средах. Сборник научных статей, Минск, Изд. Центр БГУ, 2011, С. 141-146.

- [4] Прокошин В.И., Ярмолович В.А. Драпезо А.П., Шилагарди Г. Синтез и исследование свойств полупроводниковых структур $n\text{-InSb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{-i-GaAs}$, в том числе легированных теллурием, перспективных для изготовления высокостабильных миниатюрных элементов Холла // Сборник докладов Международной научн. конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела», 18-21 октября 2011 г., Минск, в трех том. А.Н. Вркисин, Том 3, С.208-210.
- [5] Прокошин В.И., Шепелевич В.Г, Ярмолович В.А., Игнатенко Е.А. Распределение висмута в пленках InSb-InBi // Доклады АН БССР 1989. Т. 32, №12. С. 1090–1092.