

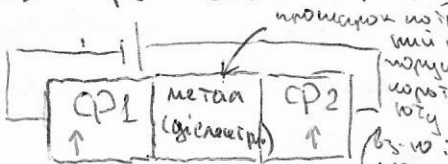
Оцінювані перевали: а) напівсповна потужність (потрібно лише переключити спін) б) висока швидкість (для перемикачів розвернути спін, а не черпати заряд з напів)

Елементи електроніки

Спінтроніка - напрям наноелектроніки, у якому для роботи інформацією поряд із зарядом використовують і спін ел-на

Гігантський магнітоопір (ГМО)

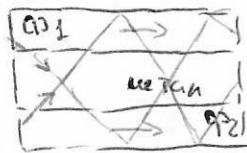
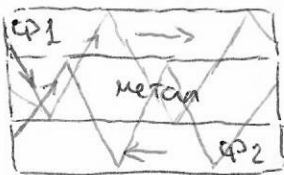
Магнітоопір - зміна електропровідності матеріалу в М.П. пов'язаний зі зміною траєкторії під дією сили Лоренца, але це спотворення має бути істотним на довжині вільного пробігу \Rightarrow ефект спадкий (21%), спостерігається в сильних полях, при низькій Т. \Rightarrow ГМО - в шаруватих структурах (до 100%) нешаруваті по спину ел-ни із зовн. мережі проходять Ф1 у порядку виступ розташування свого спіну \Rightarrow струм стає спін поляризованим. При проходженні через тонкий шар металу ця поляризація не втрачається. Якщо $\uparrow\uparrow$, то ~~спін~~ вільно входить в шар Ф2, якщо $\uparrow\downarrow$, то ел-ни відбиваються від границі найчастіше Ф1 та Ф2 з різних феромагнетиків - магнітокоріткою та магнітомажкою, який перемагнітується в полх, де перший залишається з незмінним вектором \vec{J} . Якщо посередній феромагнетик - то можливе тунелювання, причому коефіцієнт проходження суттєво падає при $\uparrow\downarrow$ - називається ефект магнітного тунелювання (ТМО)



\uparrow - напрям намагніченості товщини шарів - нанометри

Фермагнетик метал Ф2 \uparrow - напрям намагніченості товщини шарів - нанометри

Ця поляризація не втрачається. Якщо $\uparrow\uparrow$, то ~~спін~~ вільно входить в шар Ф2, якщо $\uparrow\downarrow$, то ел-ни відбиваються від границі найчастіше Ф1 та Ф2 з різних феромагнетиків - магнітокоріткою та магнітомажкою, який перемагнітується в полх, де перший залишається з незмінним вектором \vec{J} . Якщо посередній феромагнетик - то можливе тунелювання, причому коефіцієнт проходження суттєво падає при $\uparrow\downarrow$ - називається ефект магнітного тунелювання (ТМО)

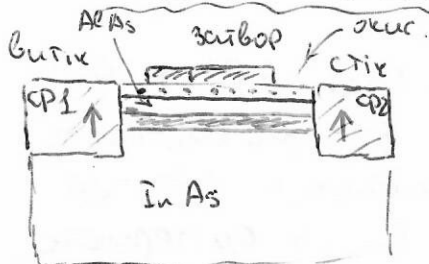


\rightarrow траєкторія електрону

Спостереження ГМО можливе і в довгодовжній конфігурації. При цьому на практиці частіше вживаються саме вона, до в поперетній

опір шарів товщиною більша і менша ніж за абс. величиною

Спінний польовий транзистор



Витік і стік - феромагнетики, стік працює як спінний фільтр. Канал виготовлено з InAs. Витік і стік - феромагнетики, стік працює як спінний фільтр.

Витік і стік - феромагнетики, стік працює як спінний фільтр. Канал виготовлено з InAs. Витік і стік - феромагнетики, стік працює як спінний фільтр.

Якщо на затворі напруга, то при русі ел-на по каналу відбувається процесія спіну внаслідок спин-орбітальної взаємодії. Якщо швидко на $180^\circ \Rightarrow$ струм проходить до кінця.

+ прикладна напруга. Для ел-на, що рухається трансформуються в М.П. (2 факт. Битів - 0 та 1)

Якщо з такою потужністю вибрати $\uparrow \downarrow$ - то транзистор з каналом, який індукується

Для 1D-каналу розкинуто швидкість електронів не важливий, так як кінт процесії $\sim v$ та \sim часу проходження каналу τ_{tr} , а $\tau_{tr} \sim v^{-1}$

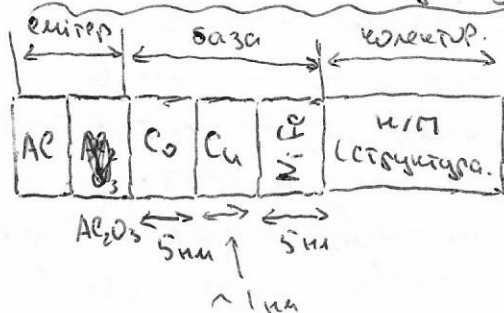
З іншого боку, якщо порівнювати спінний та кінт канали, то

- для спінного низька напруга керування (низьке енергоспоживання) суперечить високій швидкості:
при $U_{g\downarrow} \Rightarrow$ подовження каналу (щоб відстань перевернути спин) \Rightarrow знизиться швидкість + збільшиться струм у закритому стані (через релаксацію спину)
- не вдається досягти 100% інжекції спин-поляризованого струму та 100% фільтрування.

сд-2
Е

\Rightarrow спінний транзистор постачається кремнієвому

Спін-канальний транзистор



це схоже на діод Шоткі

Al - джерело ел-в

Co - Ф1 (магнітохоресткий)

Si - метал

NiFe - Ф2 (магнітохоресткий)

тобто в базі реалізовано канал,

що керується магнітним полем.

на границі NiFe - н/п - бар'єр Шоткі, щоб струм лише в одні дік.

Якщо колектор $n-i-p^+$ структура (n-AlGaAs - GaAs - p^+ -AlGaAs)

то ~~можна реалізувати~~ (канална з квантовою ямкою), то можна

реалізувати люмінесценцію в ямі (ел-ни від емітера, зреш з p^+), інтенсивність якої залежить від Л.П.

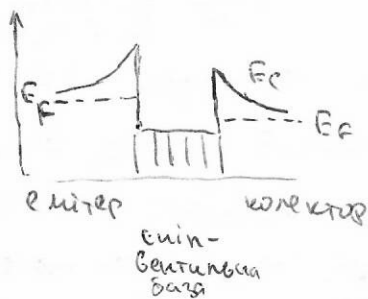
Можно реалізувати і таким чином



крайні шари на базі (Pt та Au) для формування бар'єрів Шоткі з якісним випрямляючим ефектом

Висота емітерного бар'єру (Si-Pt)

більша ніж колекторного (Si-Au) на $\sim 0,1$ eV

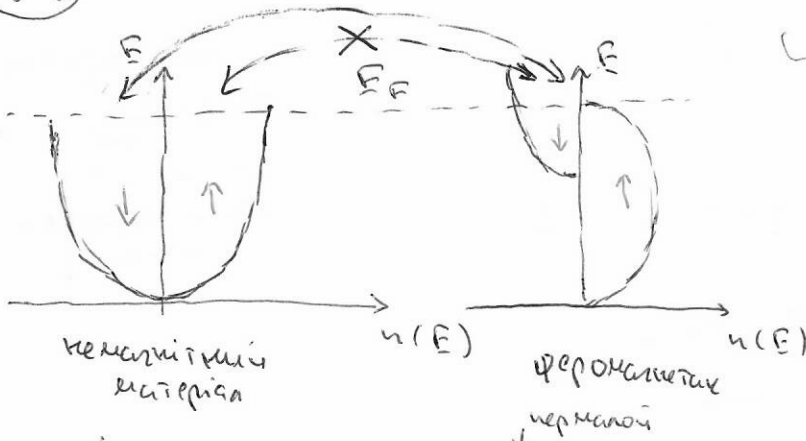


спін-поляризована база

Д1

C-J-A

ел-ки з $E > E_F$ беруть участь у транспортних процесах, дозволені станні ел-в з протіканням спином - нижче E_F , а отже не можуть рухатися по феромагнітну



власний магн. момент матеріалу

Спинова поляризація

$$P_s = \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n_{\uparrow} + n_{\downarrow}} \quad \leftarrow \text{конц. ел.-в}$$

$P_s, \%$	Co	Fe	Ni	Ni ₈₀ Fe ₂₀	C ₉₀ O ₁₀	MnAs	MnSb	Ni ₂ MnAl	Ni ₂ MnGe	C ₉₀ MnGa
T_c, K	1388	1043	627	770	386	318	587	35	~100%	320
T_c, K										690

сплавні Хейсберг

(в квантові)

При інжекції власнігос розсієння виникає у спин, довжина спинові релаксації

$$l_s = (v_{in} v_F \tau_{\uparrow\downarrow})^{1/2}$$

v_{in} - довж. вільн. пробігу при неупр. розсієнні

v_F - шв-ть Фермі

$\tau_{\uparrow\downarrow}$ - час релаксації спину

для n-Si при $T = T_{min}$ $P_s \leq 5\%$, проте $l_{s,n} \approx 230 \text{ нм}$
 $l_{s,p} \approx 310 \text{ нм}$

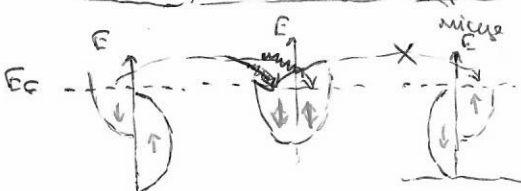
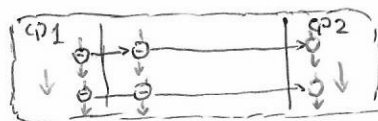
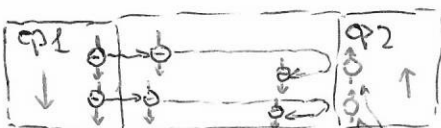
Д2

магнітоопір

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R_H - R_0}{R_0}$$

додатний : траєкторія електрона циклоїда, шлях пройдений ніж зіткненням такий ж самий, але переміщення лінійне менше $L \sim L_0 (1 - \frac{1}{2} \mu^2 \hbar^2)$

від'ємний : зв'язаний зі спин-залежним розсієнням на дефектах, фоновому в-в з дефектами, стручковим перенесенням заряду залученню ці механізми позв розгляди.



ієкає достатньо енергетичних станів і тому відбувається відхилення

(Ф-м велич)
 ієкає достатньо енергетичних станів і тому відбувається відхилення
 магнітоопір та тунельного магнітоопір (Б-в Борншо...
 ст. 274-284

23) кут повороту спіну $\varphi = 2 \alpha_s m^* E_{\perp} L / \hbar^2$

C-1-15

α_s - стала Раунди (коэф. спин-орбітальної взаємодії)

E_{\perp} - перпендикулярне поле в каналі (від затвора)

L - довжина каналу

як наслідок цистин струму

$$I = I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

$$I_0 = \frac{2e}{h} \int_{-\infty}^{\infty} dE [\delta(E - E_F) - \delta(E + eV_{b-c} - E_F)]$$

нова енергія ел-а

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \pm \alpha_s k$$

тобто при $k=0$

стану вироджені по спіну

Спині \uparrow та \downarrow - інженія спин-поляризованих носіїв у активній області

викликає появу циркулярно поляризованої люмінесценції

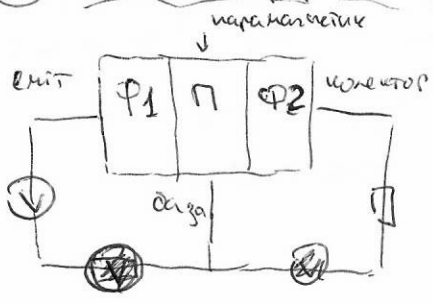
керування спіном носіїв а) за допомогою шару тонкої магнітної плівки, розташованого між активним шаром

б) спінові інженія з ферромагнітного металу

24

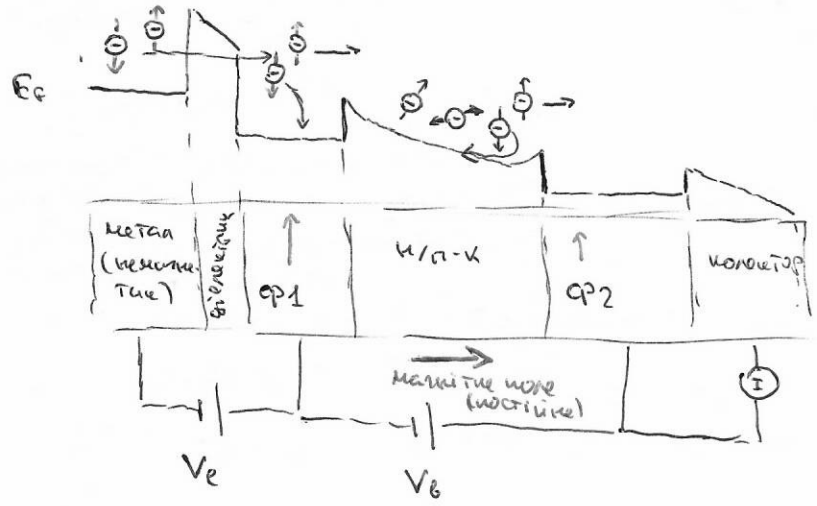
Зона структура напівпровідника відрізняється від діодної структури звичайною наявністю третьої, четвертої d- та f- ел-ми атомів перехідних та рідкоземельних елементів.
Ідеальний ферромагнітний н/п: $T_{\text{Курі}} > T_{\text{кип}} \Rightarrow$ можливе створення областей с и та р проводимості в одному кристалі, висока ступінь поларизації

Е Спінний тр-р Діонсона



CP1 - поларизатор спінів ел-в струму колектора визначається напрямком векторів намагніченості Ф1 та Ф2
Основний недолік - напруги дуже малі, бо всі контакти омні, а не вентильні (всі скради - метал)

Transit time spin transistor (також - провідний спінний тр-р)



4-електродний пристрій
при $V_b > 0$ парі електронів з домішкою спінової інжекцією в базу Ф1. Там ел-ми з основним спіном розсіюються, а з основним проходять через Ф1 та бар'єр шоткі. Спінатно метал/діелектрик/Ф1 - інжектор спіно-поларизованих ел-в.
н/п-ч в зовнішньому постійному м.п., швидкість ел-в в колекторі керується (модулюється) V_b

Визначається преекція спіну рухомих ел-в з напруженою частотою

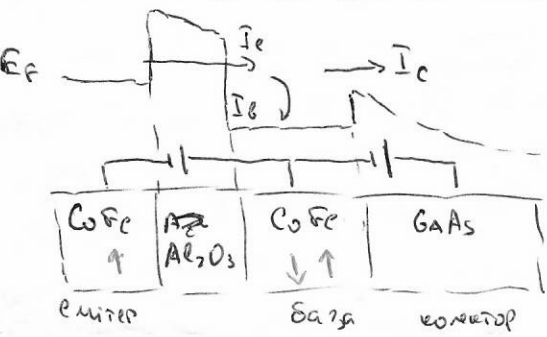
$$\varphi = \frac{g \mu_B B}{\hbar} \frac{L}{v}$$

g - g-фактор, μ_B - магнетон Бора, L товщина н/п.

Через Ф2 в колектор потрапляють лише ел-ми в з певною проекцією спіна тобто V_b модулює струм, що визначається на V_b - транзисторна ф-я

Практично для досягнення глибокої модуляції струму $\gamma = \frac{I_{on}}{I_{off}}$

Лінійний тунельний тр-р



напрямок на гарячих ел-х (напевно для бази-колекторного переходу)

геометричні розміри емітера та бази вибрані таким чином, що кожен координативна сила в базі мала, і тому її намагніченість контролюється зовнішнім полем

Замість магніто-м'яких та жорстких матеріалів може бути структура



— феромагнетики м'які, але для зносу з шарів закріплення за допомогою з'єднання в-р сл-в а-р та а-р => антиферромагнетик, який стає жорстко зв'язаним з шаром феромагнетика, який виводить на а-р => магнітні центри

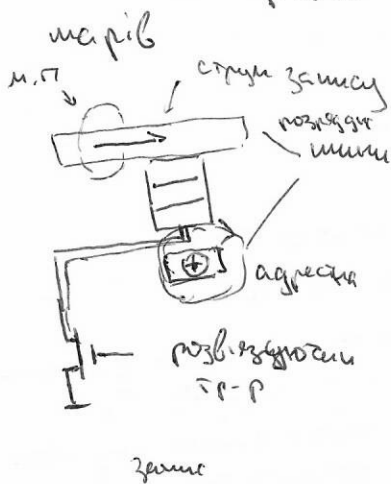
зв'язки м.п. (невеличкі) мають вплив на а-р => магнітні центри шару феромагнетика

завдяки взаємній орієнтації атомів маг. шарів періодично змінюється від товщини проміжного немагнітного (від $\uparrow\uparrow$ до $\uparrow\downarrow$, наз. осцилюючого родмінна в-р-р), найчастіше товщина вибирають так, щоб $\uparrow\downarrow$, а тоді в магнітному полі шир зменшується (мінімуми), коли з'являються довж. поле домін. в-р-р

(CF-1)

(A)

(B) Завдяки спіновій кінетикі в MRAM з'єднаний як Т-р. При записі він закритий, при зчитуванні відкривається, струм через нього швидко змінюється від взаємної орієнтації магнітності



швидкість перемищення електронів "спінити" магніт

(на зносу?)

рис. ст. 266 Шугаєв

Перший MRAM

- час відбору даних < 10 нс (в 5 раз менше ніж для флеш)
- час запису < 2 нс (на 3 порядки менше)
- енергоспоживання на бит (в 3 рази менше ніж для флеш)

Шугаєв, ст. 261

(C) Якщо енергія фотона достатньо велика, то реалізуються всі переходи => k -ті електронів з $m_s = \frac{1}{2}$ та $m_s = -\frac{1}{2}$ спінити. Якщо ж це фотон недостатньо для переходів з відскаку зони => електронів з $m_s = -\frac{1}{2}$ в E_c дуже придатно в зразку довше.

д) для феромагнетика перебіг погугує концентрації електронів \uparrow та \downarrow => можна інжектувати. Для немагнітного провідника стан з нероз'ясненою k -то сл-в з різними спінами нерівновесний => релаксація, її χ -рний час порядку 10^{-8} с (що багато порівняно з релаксацією імпульсу) ступінь спінової поляризації $\sim \exp(-\frac{x}{L_s})$, де x - відстань від межі між феромагнетиком та немагнітним

L_s - спінова диф. довжина (завдяки => зв'язані: дифуз довжин сл-ва)

Якщо між флеш шаром феромагнетика немагнітний провідник, то однієї вимоду реалізуються через спектри чужості (в-р Рудермана - Кіттл-Лауца - Іоїди), енергія $\omega = -J(\vec{m}_1, \vec{m}_2)$, \vec{m}_i - магнітні центри шару

одомітний інтеграл $J \sim \frac{\sin(2k_F d)}{d^2}$ k_F - фермітський хв в-р сл-в чужості, d - товщина шару

шп спінових вентиле неможливо змусити фтеном $R = R_{00} + \Delta R \sin^2(\frac{1}{2}\theta)$ θ - кут між магнітними

C-3

перевити: великий магн. ефект при те
і напруженості, тому не вживаються на
низький коэф. підсилення струму перешкоди
до датчиків магн. елементів

Елементарні струми складаються з гарячих сл-в, щоб вони

потрапили в колектор, необхідно

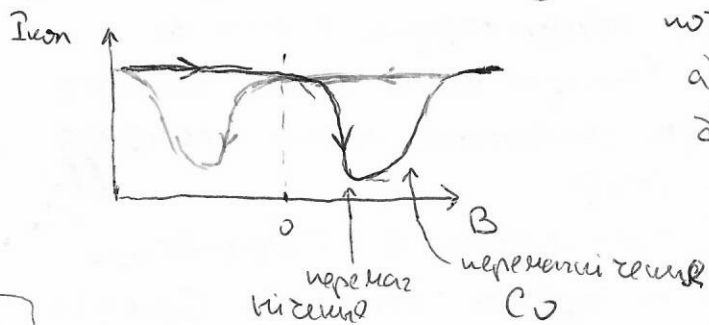
а) пройти магнітний вентиль

б) мати енергію достатню

для подолання бар'єру.

змінової зовн. В, можна результати
втрата енергії "гарячих" ел. в базі
магнітовідгук

$$I_M = (I_{\uparrow\uparrow} - I_{\downarrow\downarrow}) / I_{\uparrow\downarrow}$$



ДЧ,
C-1-3

Спінити збереження та стигування інформації

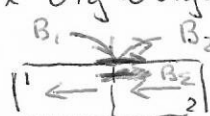
Стандартний захис інформації - формування послідовності

магнітних доменів, напрям намагнічення. Яких відповідає "0" або "1"

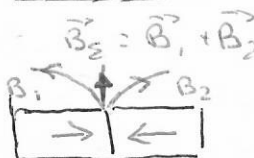
одні домен



граничі
доменів



силові лінії



тобто на границі двох різних
доменів є поле, спрямоване

перпендикулярно до площини розташування диска (стрічки)

Стандартний метод зчитування - індукційний: проходить
шпівка, в якій виникає струм ~~напрямок якого~~ при розташу-

ванні над границею між доменами з різними знаменами

Головка на ГМО:

кожен раз при зміні "знаку"
послідовності бітів відбувається

переміщення шару NiFe, а

отже і зміна опорів всієї

системи. Чутливість такої шпівки

вища індукційної, що дозволило

збільшити щільність дисків (зменшити
розмір домена).

Елемент ГМО може використовуватися і безпосередньо для

зберігання інформації як елемент електрично залежної пам'яті

через існування двох стійких станів - MRAM (magnetic

random access memory)

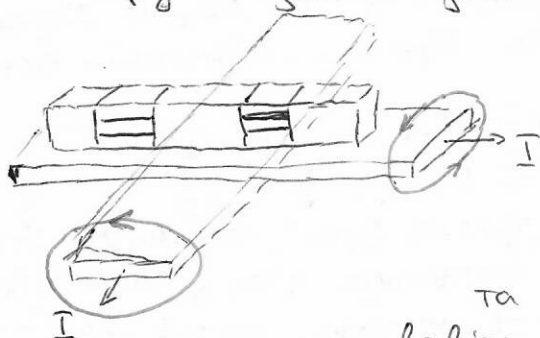
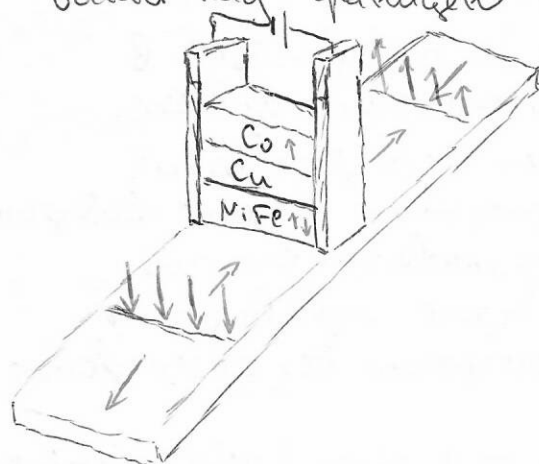
захис за допомогою системи

паралельних ліній, які [система]

перетинаються. По лініям, які

відповідають потрібному стовпчику

та рядку пропускають струм, індукція якого
вдвічі менша за необхідну для переміщення.



CD-1
B

$E_{\uparrow\downarrow}$ (антиферромагнетик), $E_{\uparrow\downarrow}$ (ферромагнетик) - магнітні напівпровідники, але спадки з-рн фазово переходу поредку $10 \pm 20 K$ $E-4$

Розростаються також ефекти пам'яті на ефекті спин-залежного тунелювання - там мають бути певні струми (кількість енергетичних рівнів), але можливе використання лише однієї конфігурації, що якої при зменшенні площі елемента суттєво зростає електричний опір

Одним з основних недоліків спінтроніки є її орієнтація на використання металів, тоді як сучасні технології орієнтовані на напівпровідники. Спін-поліризовані електрони можуть бути введені в напівпровідники: а) оптично, за допомогою світла з певною поляризацією, але цей підхід застосовний лише в одне певному класі кристалів (напр. GaAs), де є певне спін розщеплення зон + можна може бути застосований в інтегрованих вирадах

б) інжекцією з металевих ферромагнетиків, але на границі суттєві розсієння. наліто внаслідок коли на границі диференціальна тунелюють наз. "розведені" магнітні

Один з варіантів виходу - створення магнітних напівпровідників на основі A_3B_5 та A_2B_6 левованих Fe, Co, Mn

Але суттєво розширює магніт + температура Кюрі $\leftarrow (CD-2,2)$ ніжте кімнатної (напр. для $Ga_{1-x}Mn_xAs$ - $120 \pm 150 K$). збільшить перехідних металів $-4s^2 \Rightarrow$ вимірювання в A_2B_6

З іншою боку, а) на сучасному етапі одержка інформації відбувається в н/п мікросхем, а збереження - на магнітних дисках.

Використання магн. н/п-в дозволило б розрізняти процесор та пам'ять на одному чіпі, при цьому введення-виведення

б) магн. н/п, здатні приймати та підсилити оптичні сигнали, дозволило б реалізувати пряме перетворення інформації з оптичного вигляду в електронне без детектування

Магнітні н/п: 2 підходи: рухати носії, е-ти та дірки (через рух м'яких м'яких, ніж у вільних н/п-х) + локалізувати е-ти атомів перехідних та рідкоземельних металів \Rightarrow крім Fe, Co, Cu ще й третя зона, члвона d-іон-е-ти

\rightarrow а) фотон з певною поляризацією має спин $(\hbar_s) + 1$ якщо E^- обертається за годинниковою стрілкою і -1 якщо проти. При цьому швидкість електронів спин останньої змінюється на ± 1 .

у GaAs зона провідності сформована з s-станів $\Rightarrow l=0, j=\frac{1}{2}$

валентна зона з p-орбіталей $\Rightarrow l=1, j=\frac{3}{2}; \frac{1}{2}$

при $j=\frac{3}{2}$ - дві підзони (важкі та легкі дірки), наскільки ми знаємо співвідносять, $j=\frac{1}{2}$ - це зона відщеплення зони з мінімальною енергією

При поглинанні фотона з $m_s = +1$ переходу $m_s = -\frac{3}{2} \rightarrow m_s = -\frac{1}{2}$ та $m_s = -\frac{1}{2} \rightarrow m_s = \frac{1}{2}$ з зона + перехід з $m_s = -\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$. Швидкості цих переходів $3:1:2 \leftarrow (CD-1,2)$

