



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 136474

(13) U

(51) МПК

H01L 29/66 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2019 00843**

(22) Дата подання заявки: **28.01.2019**

(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: **27.08.2019**

(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: **27.08.2019, Бюл.№ 16**

(72) Винахідник(и):

**Білоголовський Михайло
Олександрович (UA),
Житлухіна Олена Сергіївна (UA),
Шамась Віталій Віталійович (UA)**

(73) Власник(и):

**ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА,
вул. 600-річчя, 21, м. Вінниця, 21021 (UA)**

(74) Представник:

Хаджинов Ілля Васильович

(54) СПОСІБ ІНЖЕКЦІЇ СПІН-ПОЛЯРИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОНІВ У НАДПРОВІДНИКИ

(57) Реферат:

Спосіб інжекції спін-поляризованих електронів у надпровідники включає створення квантового контакту нормального немагнітного металу, спінового фільтра та надпровідника з електричним струмом, який проходить крізь нього. Потік електронів із нормального немагнітного металу спрямовують на розгалуження двох вихідних провідників, один із яких містить спіновий фільтр, а другий є надпровідником, віддаленим просторово від спінового фільтра для придушення магнітного зв'язку між ними, але пов'язаним з ним завдяки квантовій заплутаності електронних станів у вихідних провідниках.

UA 136474 U

Корисна модель належить до спінтроники, нової галузі електроніки, що базується на квантових властивостях електронного спіну з двома умовними станами (спін догори, спін униз), і може бути використана для створення новітніх наноелектронних пристроїв, дія яких ґрунтується на впливі магнітного моменту усередині надпровідника, створеного шляхом інжекції надлишкових квазічастинок із некомпенсованим сумарним спіном, на його основні характеристики.

Добре відомим і ефективним методом керування властивостями надпровідника є інжекція в нього надлишкових квазічастинок із некомпенсованим позитивним або негативним зарядом і, відповідно, з несиметричним заповненням гілок спектра квазічастинкових збуджень. Такі нерівноважні ситуації в надпровідниках мають назву станів із зарядовим розбалансом [1]. Останнім часом у рамках спінтроники почав розвиватися новий спосіб контролю за властивостями надпровідника, який базується на інжекції квазічастинок із некомпенсованим сумарним спіном [2]. Для створення в ньому спінового розбалансу зазвичай використовують додаткове джерело спін-поляризованих електронів, яке приводиться в безпосередній контакт із надпровідником. Таким джерелом може бути провідний феромагнетик (метал або напівпровідник) із спонтанною спіноюю впорядкованістю носіїв заряду в намагніченому стані. Часткова зміна спінової орієнтації електронів із зовнішнього ланцюга відбувається під впливом струму високої густини, який проходить через феромагнітну плівку. Слід відмітити, що виконані таким чином експерименти [3] довели високу ефективність цього методу створення нерівноважного стану в надпровіднику.

Наступним кроком у розвитку методів інжекції спін-поляризованих електронів в надпровідник стало застосування спінових фільтрів, надтонких плівок феромагнітних сполук у стані ізолятора, здатних фільтрувати електрони вибірково відповідно до їх спінової орієнтації. Внаслідок обмінного розщеплення дно зони провідності в такому матеріалі знаходиться при різних енергіях для електронів зі спіном догори і електронів зі спіном униз, що призводить до залежності висоти тунельного бар'єру в такому спіновому фільтрі від спінової орієнтації, а значить, і до залежності ймовірності квантово-механічного тунелювання крізь такий нанорозмірний прошарок від напрямку електронного спіну [4]. До сполук, які можуть бути використані для спінової фільтрації, належать феромагнітні напівпровідники EuS і EuO , оксиди BiMnO_3 , NiFe_2O_4 , CoFe_2O_4 , а також деякі нітриди, зокрема GdN .

Спіновий фільтр дозволяє використовувати немагнітні метали як інжектор, в такому разі ступінь спінової некомпенсованості потоку електронів на виході фільтра цілком визначається різницею висот потенціальних бар'єрів для двох спінових напрямків. Такий пристрій, вибраний за найближчий аналог, являє собою тришаровий тунельний перехід з немагнітним інжектором NM , спіновим фільтром SF і надпровідником S (фіг. 3) [4]. Але така конструкція має недоліки. Порівняння вольт-амперних характеристик гетероструктур на основі двох NbN надпровідних електродів із нанорозмірним спін-фільтруючим проміжком GdN і немагнітним прошарком AlN виявило суттєве зменшення величини енергетичної щільності в NbN плівках від 2.25 меВ в переходах з немагнітним AlN бар'єром до 1,65 меВ в переходах з магнітним GdN бар'єром [5]. Цей результат свідчить про наявність приповерхневої деградації надпровідних електродів, які знаходяться в безпосередньому контакті зі спіновим фільтром.

Відомий спосіб поділу пучка світла або іншого електромагнітного випромінювання на два окремих промені за допомогою пристрою, відомого як сплітер (фіг. 3). Якщо цей пристрій працює в квантовому режимі зарядового транспорту, тобто потоки квазічастинок залишаються фазово-когерентними, тоді квантові стани окремих частинок в обох пучках будуть зберігати взаємозв'язок один з одним, навіть у випадку, коли вони будуть суттєво рознесені в просторі. Цей факт є наслідком квантово-механічного явища, яке має назву квантової заплутаності, і полягає у виникненні кореляцій між спостережуваними фізичними властивостями об'єктів, які на цей час не мають ніякого фізичного контакту один з одним, але мали його в минулому. Саме квантова заплутаність, яка надає можливість дистанційного впливу на квазічастинки в твердотільних структурах, є основою даного способу інжекції спін-поляризованих електронів у надпровідники.

Для того, щоб уникнути прямого впливу магнітної плівки на надпровідну, необхідно просторово віддалити їх.

В основу корисної моделі поставлено задачу вирішення цієї проблеми шляхом застосування квантового сплітера, котрий розщеплює потік квазічастинок на два, зберігаючи квантову когерентність.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі інжекції спін-поляризованих електронів у надпровідники, що включає створення квантового контакту нормального немагнітного металу, спінового фільтра та надпровідника з електричним струмом, який проходить крізь нього, згідно з

корисною моделлю, потік електронів із нормального немагнітного металу спрямовують на розгалуження двох вихідних провідників, один із яких містить спіновий фільтр, а другий є надпровідником, віддаленим просторово від спінового фільтра для придушення магнітного зв'язку між ними, але пов'язаним з ним завдяки квантовій заплутаності електронних станів у вихідних провідниках.

У запропонованому способі пучок електронів із некорельованими напрямками спінів від немагнітного металевого електрода NM потрапляє на вузол сплітера, після чого розподіляється на два потоки, один із яких потрапляє на спіновий фільтр SF, а другий - у провідник 3, з'єднаний із надпровідником S (фіг. 1). Спіновий фільтр пропускає крізь себе електрони вибірково. У разі, коли ймовірність проходження електронів зі спіном униз суттєво перевищує ймовірність проходження електронів зі спіном догори, ймовірність бути відбитим назад до вузла сплітера вища в електронів зі спіном догори. Останні повертаються до вузла сплітера та частково відбиваються в провідник 3, який веде до надпровідника S, у якому частка інжекттованих електронів зі спіном догори може суттєво перевищувати частку електронів зі спіном униз. Таким чином реалізується інжекція спін-поляризованих електронів у надпровідник S від немагнітного нормального металу NM за допомогою спінового фільтра SF, який просторово розділений з надпровідником S (фіг. 1).

Згідно з корисною моделлю, для реалізації ефективної інжекції спін-поляризованих електронів у надпровідник створюють нанорозмірний пристрій, виконаний у формі вилки, зображений на фіг. 1, вхід якого з'єднано з нормальним немагнітним металом, один вихід - зі спіновим фільтром, а другий - із надпровідником. Транспорт заряду в цьому пристрої має бути квантово-когерентним. В результаті його роботи потік електронів із некорельованими спінами буде розподілено на потік електронів переважно зі спінами униз, який виходить зі спінового фільтра, і потік електронів переважно зі спінами догори, які потрапляють у надпровідник. Ступінь поляризації останніх залежить від ефективності роботи спінового фільтра і розсіювання на вузлі сплітера.

Далі наведено приклад реалізації запропонованого способу інжекції спін-поляризованих електронів у надпровідник, просторово відокремлений від спінового фільтра.

Приклад.

На фіг. 2 наведено результати чисельних розрахунків ефективності запропонованого способу. Вони були виконані на основі теорії квантового транспорту в трипровідних структурах з одним або двома надпровідними провідниками, яку було запропоновано в роботі [6], де граничні умови було отримано як результат безперервності хвильових функцій у провідниках сплітера та збереження потоку ймовірності на вузлі. В результаті було виявлено, що навіть для ідеальної ситуації на вузлі та ідентичності хвильових чисел Фермі в трьох провідниках існує ненульова ймовірність розсіювання електронів від одного провідника до іншого, яка реалізує взаємозв'язок між електронами, відбитими від спінового фільтра, та тими, що потрапляють у надпровідник. Позначимо ймовірність пройти крізь спіновий фільтр для електронів зі спіном униз через $T_{SF\downarrow}$, а відповідну величину для електронів зі спіном догори через $T_{SF\uparrow}$. Для характеристики ефективності спінової інжекції в надпровідник S, зображений на фіг. 1, вводимо фактор $F = (T_{13\uparrow} - T_{13\downarrow}) / (T_{13\uparrow} + T_{13\downarrow})$, де $T_{13\uparrow}$ і $T_{13\downarrow}$ - ймовірності переходу від провідника 1 до провідника 3, з'єднаного з надпровідником S, для електронів зі спіном догори і електронів зі спіном униз відповідно. Слід зауважити, що остаточний результат для фактора ефективності спінової інжекції F залежить від співвідношення між хвильовими числами Фермі в провідниках, що складають сплітер, тобто від відповідних матеріалів, оптимальний підбір яких дозволить суттєво підвищити різницю між концентраціями надлишкових електронів із різними спінами в надпровіднику. Фіг. 2 ілюструє, яким чином дана характеристика залежить від співвідношення хвильових чисел Фермі в трьох провідниках сплітера за фіксованого значення $T_{SF\downarrow}$ та змінного параметра $T_{SF\uparrow}$.

Перелік фігур:

На фігурі 1 схематично зображено спосіб інжекції спін-поляризованих електронів у надпровідник, що пропонується. В даному випадку пристрій являє собою квантовий сплітер, який складається з вхідного провідника 1, з'єднаного з нормальним немагнітним інжектором, провідника 2, на кінці якого розміщено спіновий фільтр SF, і провідника 3, який веде до надпровідника S (ймовірності проходження через фільтр електронів зі спінами униз і догори становлять близько 100 і 50 відсотків, відповідно).

На фігурі 2 - залежність фактора ефективності спінової інжекції F від параметра спінового фільтра $T_{SF\uparrow}$ для різних співвідношень хвильових чисел Фермі в трьох провідниках, що складають запропонований квантовий сплітер: $k_1=k_2=k_3$ (суцільна крива), $k_2=5k_1=5k_3$ (штрихова

крива), $k_3=5k_1=5k_2$ (точкова крива) (ймовірність пройти крізь спіновий фільтр для електронів зі спіном униз фіксована, $T_{SF\downarrow}=0.9$).

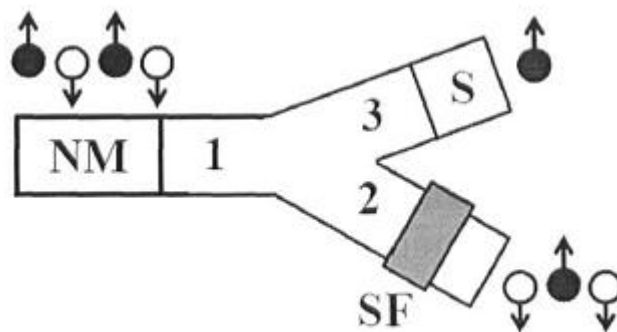
На фігурі 3 наведення схематичне зображення найближчого аналога - способу інжекції спін-поляризованих електронів у надпровідник за допомогою послідовно з'єднаних інжектора з нормального немагнітного металу NM, спінового фільтра SF і надпровідника S [4] (ймовірності проходження через фільтр електронів зі спінами униз і догори становлять близько 100 і 50 відсотків, відповідно).

Джерела інформації:

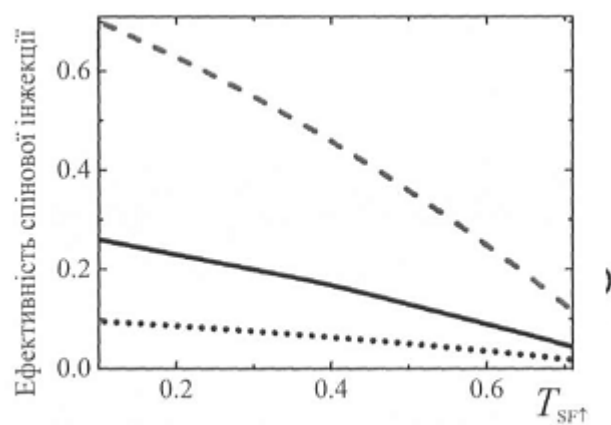
1. Pethick C.J., Smith H. Charge imbalance in non-equilibrium superconductors. J. Phys.: Condens. Matter., 2000. - Vol. 13, № 34. - P. 6313-6347.
2. Kumar D., Joshi P.C., Hossain Z., Budhani R.C. Spin polarized carrier injection from full Heusler alloy Co_2MnSi into superconducting NbN. Appl. Phys. Lett., 2013. - Vol. 102, № 11. - P. 112409-1-112309-4.
3. Rudenko E., Solomakha D., Korotash I., Febvre P., Zhitlukhina E., Belogolovskii M. Phase-slip events in a wide superconducting film induced by proximity to a half-metallic strip. IEEE Trans. Applied Supercond., 2017. - Vol. 27, № 4. - P. 1800105-1-1800105-5.
4. Moodera J.S., Santos T.S., Nagahama T. The phenomena of spin-filter tunneling. J. Phys.: Condens. Matter., 2000. - Vol. 19, № 16. - P. 165202-1-165202-24 ((прототип).
5. Senapati K., Blamire M.G., Barber Z.H. Spin-filter Josephson junctions. Nature Mater., 2011. - Vol. 10, № 11. - P. 849-852.
6. Zhitlukhina E., Belogolovskii M., De Leo N., Fretto M., Sosso A., Seidel P. Quantum coherent transport in a three-arm beam splitter and a Braess paradox. Int. J. Quant. Inform., 2017. - Vol. 15, № 8. - P. 1740011-1-1740011-10.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

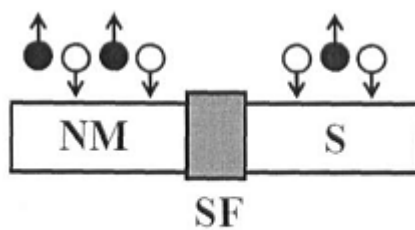
Спосіб інжекції спін-поляризованих електронів у надпровідники, що включає створення квантового контакту нормального немагнітного металу, спінового фільтра та надпровідника з електричним струмом, який проходить крізь нього, який **відрізняється** тим, що потік електронів із нормального немагнітного металу спрямовують на розгалуження двох вихідних провідників, один із яких містить спіновий фільтр, а другий є надпровідником, віддаленим просторово від спінового фільтра для придушення магнітного зв'язку між ними, але пов'язаним з ним завдяки квантовій запутаності електронних станів у вихідних провідниках.



Фиг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3