

## Спинова електроника<sup>1</sup>

Д. Ашълъм, М. Флати, Н. Самард

Шеметният прогрес в миниатюризацията на полупроводниковите електронни прибори, който води до размери на елементите върху чиповете под 100 nm, изправя инженерите и физиците пред особеностите на квантовата механика – онова противоречащо на интуицията и понякога мистериозно царство, в което доминират вълновите свойства на електроните. Практиците в света на полупроводниковите прибори правят какви ли не фокуси, за да могат да избегнат квантовия свят и да проектират чипове в рамките на “класическата” електроника. Въпреки това някои от нас вярват, че ни се предоставя безпрецедентната възможност за създаване на радикално нов клас прибори, които ще използват особеностите на квантовия свят за осигуряване на уникални предимства спрямо съществуващите информационни технологии.

Едно от тези особени квантови свойства на електрона е тясно свързано с магнетизма и неговия спин. Приборите, които за изпълнение на своите функции използват спина на електрона, представляват основата на спиновата електроника, или, кратко, на спинтрониката (съкратено от английското spin-based electronics). Същата е известна още като магнитоелектроника. До сега технологиите за обработка на информация се основаваха на прибори, използващи електричния заряд – като се започне от огромните вакуумни лампи и се свърши с днешните микрочипове, съдържащи милиони транзистори. В тези конвенционални електронни прибори се движат заряди, без спинът на електрона да играе някаква роля.

### Възможни решения

Въпреки това магнетизмът (следователно и спинът на електрона) е бил винаги важен за съхраняването на информация. Например още в най-ранните твърди дискове на компютрите се използва явлението магнитосъпротивление (т.е. промяната на електричното съпротивление под влияние на магнитно поле), за да се чете информацията, записана върху магнитните домени. Не е изненадващо, че именно индустрията за натрупване на данни осигури началните успехи на спинтронните технологии. Най-разпространените днес лаптопи се комплектуват с твърди дискове, които притежават безпрецедентно голяма памет на квадратен милиметър. Четенето на данни с подобна плътност в тези дискове се основава на един спиновоелектронен ефект – на гигантското магнитосъпротивление (GMR – giant magnetoresistance). В напреднал стадий на разработка са още по-сложни технологии за запис на данни, основани на спинтрониката: в следващите няколко години на пазара ще излезе нов тип компютърна памет – MRAM (magnetic random-access memory). MRAM-овете ще пазят записаната информация дори след изключване на захранването и за разлика от днешните форми на непостоянна памет, ще притежават скорост на превключване и способност за презапис, които съперничат на конвенционалните RAM.

В днешните глави за четене и MRAM-дискове ключовите детайли са направени от феромагнитни метални сплави. Подобни, основани на метал прибори, представляват първата (и най-развита) от три категории спинова електроника. Във втората категория се използват токове с поляризиращи спинове, като токовете текат в полупроводници, а не в метали. Практическото усвояване на спиновата електроника в полупроводници ще доведе до обединяване на съществуващото многообразие от микроелектронни техники и ще открие пътя за създаване на много повече прибори, използващи ценните оптични

---

<sup>1</sup> Превод от *Scientific American*, юни, 2002.

свойства на полупроводниците и тяхната способност да усилват както оптични, така и електрични сигнали.

Примерите в това отношение включват свръхбързи превключватели, и напълно програмируеми, изцяло основани на спиновата електроника микропроцесори. Тази посока на изследванията може да доведе до нов клас от многофункционална електроника, която комбинира логика, съхранение и комуникации върху един единствен чип.

Преди втората категория прибори да стане обект на една жизнеспособна индустрия, изследователите трябва да отговорят на няколко важни въпроса: може ли да осъществим по икономичен начин комбинирането на феромагнитни метали и полупроводници в интегрални схеми? Може ли да направим полупроводници, които са феромагнитни при стайна температура? Кой е ефективния начин да предизвикаме спиново поляризиране на токове (или спинове токове) в един полупроводник? Какво става със спиновите токове на границите между различни полупроводници? Колко дълго може да запази един спинов ток своята поляризация в полупроводника?

Нашите изследователски групи работят по тези въпроси, но държат под око и по-далечната и засега спекулативна цел – третата категория прибори. В тях се използват квантовите спинове състояния на отделните електрони. Тази категория включва спинтронни квантови логически схеми, които ще направят възможно конструирането на голямо мащабни квантови компютри, превъзхождащи многократно стандартните компютри при решаване на определени задачи. За достигане на подобна цел ще спомогне богат асортимент от екзотични технологии: йони в магнитни капани, “замразена” светлина, свръхстудени квантови газове, наречени Бозе–Айнщайн кондензати и ядрен магнитен резонанс на молекули в течности – съществуват различни възможности “да се одере квантовата котка”.

Вярваме, че съществува алтернатива на екстензивното развитие на конвенционалните електронни полупроводникови технологии. Наистина, изглежда, че една поредица от неочаквани открития подкрепя нашето подозрение, че полупроводниковата спинова електроника осигурява възможност за създаване на квантови компютри и други квантови информационни машини. Независимо от това дали се им предвид близката перспектива на електрониката за утрешния потребител, или по-далечната – на квантовата електроника, спинтрониката обещава революция.

### **Използване на спиновите токове**

Една интуитивна представа за това, какво представлява спинът на електроните дава самото му название. Представете си малка електрически заредена сфера, която се върти бързо. Обикалящите по сферата заряди представляват малки затворени токови контури, които пораждат магнитно поле, подобно на земното. Известно е, че въртенето може да се представи чрез вектор, насочен по посока на оста на въртене. Поставянето на въртящата се сфера във външно магнитно поле променя общата ѝ енергия в зависимост от това, как е ориентиран векторът на спина.

В известен смисъл един електрон прилича на подобна въртяща се заредена сфера – електронът притежава определен момент на импулса (неговият “спин”) и свързаният с него магнетизъм, и в едно външно магнитно поле неговата енергия зависи от ориентацията на спина. Тук обаче аналогията свършва и започват квантовите особености. Според съвременните представи електроните се разглеждат не като малки сфери, а като идеални безразмерни точки, така че простата представа за техния спин като резултат от реално въртене и невъзможна. Освен това всички електрони имат една и съща големина на спина, равна на половината от фундаменталната квантова единица

за момент на импулса. Това свойство е вградено в математичния апарат, който описва елементарните частици – резултат, чието значение и смисъл са съвсем друга история.

Полупроводниковата спинова електроника ще комбинира логика, съхраняване на информация и комуникации върху един чип.

В обикновените електрични токове спиновете на електроните сочат в различни посоки и нямат значение за съпротивлението на един проводник или за усилването на един транзистор. За разлика от това, действието на спинтронните прибори се основава на разликите при движението на електрони, чиито спин е в една посока, и на електрони със спин в противоположна посока. В еди феромагнетик, например желязо или кобалт, спиновете на някои електрони в съседни атоми се стремят да се ориентират еднопосочно. В силно намагнитен къс желязо това подреждане на спиновете се простира в голяма част от метала. Когато през един феромагнетик тече ток, движението на електрони с една определена ориентация на спина е затруднено. В резултат на това се получава спиново поляризиран ток, в който спиновете на всички движещи се електрони са поляризирани в противоположната посока.

Един феромагнетик може да повлияе и протичането на ток дори в разположен наблизо немагнитен метал. Например съвременните четящи глави в твърдите дискове на компютрите използват прибор, наречен спинова клапа. В него слой от немагнитен метал е разположен между два феромагнитни метални слоя. Намагнитването на първия слой е постоянно, а на втория феромагнитен слой – не. Когато четящата глава минава покрай пътечката с данни върху компютърния диск, малките магнитни полета на записаните единици и нули променят намагнитването на втория слой напред-назад, по или срещу посоката на намагнитване на намагнитения слой. В случая, когато намагнитванията са еднопосочни, през проводника минават лесно само електрони, чиито спин е ориентиран само в привилегированата посока. В случая на противоположно ориентирано намагнитване на феромагнитните слоеве движението на всички електрони в метала е затруднено. Предизвиканите промени на тока дават възможност на GMR-четящите глави да реагират на по-слаби полета, отколкото техните предшественици. По този начин данните могат да бъдат записвани върху диска чрез по-близо разположени намагнитени области, което увеличава плътността на записа три пъти.

Друг трислоен прибор, магнитният тунелен контакт, представлява тънък слой диелектрик между два метални феромагнита. Токът тече през прибора чрез квантово тунелиране: малък брой електрони успяват да прескочат през бариерата, въпреки забраната да пребивават в изолятора. Протичането на тунелиращ ток спира, когато двата феромагнитни слоя са намагнитени в противоположни посоки, и продължава, когато посоките на намагнитването им съвпадат.

Магнитните тунелни контакти са в основата на споменатите по-горе MRAM-чипове. Всеки контакт може да запише един бит информация чрез ориентацията на своя пренамагнитващ се феромагнитен слой. Този слой запазва намагнитването си, независимо от това, дали захранването е включено, или не е, поне докато не бъде преднамерено пренамагнитен.

Докато току що описаните метални спинтронни прибори осигуряват нови пътища за натрупване на информация, полупроводниковата спинова електроника може да предложи дори по-интересни възможности. Тъй като обикновените полупроводници не са феромагнетици, може да изглежда чудно как въобще могат да действат полупроводниковите спинтронни прибори. Едно от решенията използва феромагнитен метал, който инжектира спиново поляризиран ток в полупроводника.

През 1990 г. S. Datta и B. Das предложиха конструкция на спиново поляризиран полеви транзистор (field-effect transistor – FET). В традиционния FET един тесен

полупроводников канал свързва два електрода, наречени исток и сток. Когато върху третия електрод, затвора, който е разположен над канала, се приложи напрежение, възникналото електрично поле изтиква свободните електрони извън канала, превръщайки го в изолатор. Спиновият FET има феромагнитни исток и сток, така че протичащият през канала ток е спиново поляризиран. Когато на затвора се приложи напрежение, при преминаване през канала спиновете на електроните се обръщат и те вече не могат да минат през стока.

Спиновият FET би имал няколко предимства пред обикновените FET. Преобръщането на спина на електрона може да се осъществи много по-бързо, отколкото изтикването на електроните от канала. Бихме могли също така да си представим промяна на намагнитването на истока или на стока с помощта на магнитно поле, което дава възможност за допълнителен контрол, каквато липсва в обикновените FET: логични схеми, чиито функции могат да се променят “в движение”.

Засега обаче никой не е успял да направи работещ прототип на спинов FET поради трудностите, които следва да се преодолеят за ефективно инжектиране на спинови токове от феромагнитен метал в полупроводник. Въпреки че това остава предмет на спорове, съвременни оптични експерименти, проведени в различни лаборатории, показват, че чрез използване на нетрадиционни материали, наречени магнитни полупроводници, може наистина да се постигне ефективно инжектиране на спиново поляризиран ток в полупроводници. В тези материали се предизвиква магнетизъм чрез вкарване на примеси, например манган.

Създадени са магнитни полупроводници, демонстриращи феромагнитни свойства, от които се правят компоненти, наречени gateable феромагнити, и които един ден може да играят важна роля за спиновите транзистори. В такъв прибор едно малко напрежение би могло да превключва полупроводника между немагнитно и феромагнитно състояние. Един gateable феромагнит би могъл да служи и като спинов филтър – прибор, който, когато е включен, пропуска електрони, които се намират в едно спиново състояние, и задържа онези, които са в другото.

Ефектът на филтриране може да се усилва чрез поставяне на феромагнита в резонансен тунелен диод. Обикновените резонансни тунелни диоди пропускат ток при специално напрежение, онова, при което електроните имат енергия, резонансна на тунелираната бариера. Версията, включваща феромагнит, би имала бариера с различна резонансно напрежение за електрони с различна ориентация на спина. Най-вълнуващите постижения на полупроводниковата спинова електроника вероятно ще представляват прибори, които сега дори не можем да си представим. Ключовият изследователски проблем за тази втора категория спинтроника е колко добре могат електроните да запазват специфично спиново състояние при преминаване през един полупроводник или при преминаване от един материал в друг. Например един спинов FET няма да работи, ако електроните не остават поляризиран при влизане в канала и след преминаване до другия му край.

Въпросът за това, колко бързо се разпада поляризацията на спиновете, става най-важен, когато трябва да се направи квантов компютър, основан на спиновете на електроните. Това приложение изисква контролиране на едно свойство, известно като квантова кохерентност, произтичащо от по същество чисто квантовата природа на всички носители на информация в компютрите. В полупроводниците, използващи заряда на електроните, дори при криогенни температури се наблюдава стремеж към загуба на кохерентността, към дисипация в рамките на няколко пикосекунди. Запазването на информация, основано върху спина, би трябвало да бъде вътрешно по-стабилно. Известен парадокс представлява фактът, че нашите изследователски групи се натъкнаха на фундаментални резултати относно кохерентността на електроните

спинове докато се провеждаха експерименти, целящи разработване на магнитни полупроводници за практически приложения.

### **Една приятна изненада**

През 1997 г. в университета на Калифорния в Санта Барбара ние експериментирахме с цинков селенид (ZnSe), един отдавна изучен обикновен полупроводник. Цинковият селенид бе предназначен за проверка на един проект, изучаващ магнитните полупроводници. В нашия експеримент използвахме импулси от кръгово поляризирана светлина, за да възбудим в цинковия селенид групи от електрони в едно и също спиново състояние. В кръгово поляризираната светлинна вълна вместо да осцилират по големина, електричното и магнитното поле се въртят в кръг, перпендикулярно на посоката на разпространение на светлината.

Ние изпращахме свръхкратки (100 фемтосекундни) импулси хоризонтално през полупроводника, възбуждайки електроните в състояния с хоризонтални спинове, отначало подредени от светлинни снопове. Във вертикално магнитно поле спиновете на електроните извършват прецесия – посоката на вектора на спина на всеки електрон се върти в хоризонтална равнина, подобно на въртенето, което извършва оста на пумпал, когато бъде отклонена от вертикалата в земното гравитационно поле. Прецесията ни позволява да установим колко дълго остават кохерентни тези състояния. Хоризонталното спиново състояние обаче притежава друго, по-важно свойство.

За бейзболната топка, например, хоризонталната въртене не е нищо съществено и е съвсем различно от двете вертикални възможности за въртене. За електроните обаче хоризонталните квантови спинове състояния представляват всъщност кохерентни суперпозиции от състояния със спин, насочен нагоре, и спин, насочен надолу. В резултат такива електрони се намират едновременно в две състояния (със спин нагоре и със спин надолу). Точно това е видът кохерентна суперпозиция от състояния, използвани в квантовите компютри.

Всяко състояние на електронния спин може да представлява един бит: например 1, когато спинът е нагоре, и 0, когато спинът е надолу. При обикновените компютри инженерите са готови на всичко, само и само да осигурят стабилни, добре дефинирани състояния за битовете. Напротив, действието на квантовия компютър почива върху кодиране на информацията в квантови битове, в  $k$ -битове, всеки от които може да представлява суперпозиция от 0 и 1. Притежавайки голям брой  $k$ -битове, квантовият компютър по същество притежава възможност за паралелна обработка, така че квантовите алгоритми мога да оперират едновременно с множество различни числа.

За нещастие в повечето физични системи взаимодействието с околната среда бързо разрушава суперпозицията от тези състояния. Едно типично разрушаване би променило една суперпозиция от 0 и 1 по случаен начин в или 0, или 1 – процес, наречен декохерентност.  $k$ -битовете, основани на заряда на електрона в един полупроводник, в най-добрия случай остават кохерентни в рамките на няколко пикосекунди, и то само при температури, които са твърде ниски за практически приложения. Бързата декохерентност се дължи на факта, че електричните сили между зарядите са големи и далекодействащи. В традиционните полупроводникови прибори това силно взаимодействие е добре дошло, тъй като позволява фино управление на тока с помощта на слаби електрични полета. За квантовите кохерентни прибори обаче то е проклятие.

Електронноспиновите  $k$ -битове взаимодействат само слабо с тяхното обкръжение – главно чрез магнитните полета, които са нехомогенни и променящи се с времето. Такива полета могат да бъдат екранирани ефективно. Целта на нашия опит бе да създадем някои от тези кохерентни спинове състояния в полупроводник и да

проследим колко дълго те могат да просъществуват. Резултатите са полезни също така за разбиране как да се конструират прибори от рода на спиновите транзистори, които не зависят от поддържането и детектирането на квантовата кохерентност на спиновото състояние на отделния електрон.

При експеримента измервахме степента на декохерентност чрез наблюдаване прецесията на спиновете. Всеки електрон би продължил да прецесира дотогава, докато неговата суперпозиция остава кохерентна. Прецесията наблюдавахме с помощта на слаби светлинни импулси и в резултат получавахме стробоскопична картина на динамиката на спина. Докато електроните извършват прецесия, измерваният сигнал осцилира по големината, при загуба на кохерентността амплитудата на осцилациите спада до нула.

За наша голяма изненада оптически възбудените спинови състояния в цинковия селенид оставаха при ниски температури кохерентни за известен брой наносекунди, т.е. 1000 пъти по-дълго, отколкото к-битовете, основани на електричния заряд. Даже при стайна температура състоянията можеха да се задържат няколко наносекунди. Допълнителните изследвания с галиев арсенид (GaAs – висококачествен полупроводник, обикновено използван във всекидневни приложения като клетъчни телефони и CD устройства) показаха, че при оптимални условия, при ниски температури спиновата кохерентност може да продължи стотици наносекунди.

### **Рисковете на дупките**

Тези експерименти разкриха също условията, които са критични за постигане на дългоживущи кохерентни спинови състояния. От съществена важност е природата на носителите на спина и заряда. Един полупроводник притежава две ключови зони от състояния, които могат да бъдат заемани от електроните: валентна зона, която обикновено е запълнена, и зона на проводимост (с малко по-голяма енергия), която обикновено е празна. Носителите на заряд в полупроводниците са два вида: електрони на проводимост, които са в зоната на проводимост, и валентни дупки, които представляват липсващи електрони във валентната зона. Дупките притежават спин, защото в една запълнена валентна зона всички спинове взаимно се компенсират: отстраняването на един електрон оставя некомпенсиран резултантен спин по същия начин, по който оставя и резултантен положителен заряд.

Дупките притежават драстично по-малки времена на спинова кохерентност в сравнение с електроните и обмяната на спин между електрони и дупки е много интензивна, ускорявайки разрушаването на кохерентността и на едните, и на другите. Поради тези причини си струва да няма изобщо носители дупки, условие, което се постига чрез легиране на полупроводниковия кристал с донорни атоми. В този случай в зоната на проводимост има електрони, без във валентната зона да се създават съответните дупки.

След като дупките са елиминирани, доминиращ остатъчен източник на декохерентност представлява един релативистичен ефект: когато едно тяло се движи с голяма скорост в електрично поле, наблюдател, неподвижно свързан с тялото, регистрира наличие на магнитно поле. За електрон, който се движи в полупроводник, кристалната структура на материала осигурява наличие на електрично поле. Спинът на един бързо движещ се електрон прецесира около резултантното локално магнитно поле, възникнало вследствие споменатия ефект. Във всеки от нашите случаи бе наблюдаван ансамбъл от около 10 милиарда електрона, чиито скорости лежат в определен интервал и следователно прецесират по различни начини. Два електрона, които започват движението си с успоредни спинове, могат бързо да еволюират така, че спиновете им да станат противоположно насочени. С нарастване на безпорядъка в

подреждането на спиновете средната спинова поляризация на ансамбъла намалява, което ние опитно измерваме като загуба на кохерентност. Този, основан на наблюдения върху ансамбъла, източник на декохерентност утвърждава вярата, че времената на спинова кохерентност на отделните електрони биха могли да превишават многократно даже забележително продължителните времена, наблюдавани в ансамблите.

### **Въртене в бъдещето**

Във връзка с времето на живот на носителите за приложенията на полупроводниците са изключително важни две други свойства: колко далеч могат да бъдат пренесени възбужденията и колко бързо може да се променя състоянието на прибора. Макроскопично пренасяне на спин бе демонстрирано за пръв път в галиев арсенид с *n*-проводимост. Един лазерен импулс възбужда група от кохерентно прецисиращи електрони, точно както в опитите за установяване на времето на живот, но сега едно напречно електрично поле придвижва електроните през кристала. Спиновите пакети изминаваха през кристала повече от 100 микрометра (разстояние, което далеч превишава размерите на детайлите в съвременната микроелектроника) с умерена загуба на поляризацията на спиновете. В съвременни експерименти кохерентни спинове са пренесени успешно през граничната повърхност между полупроводникови кристали с различен състав (напр. от GaAs в ZnSe). Голям брой приложения на полупроводниците, от лазерите до транзисторите, се основават именно на хетероструктури, които комбинират съществено различни вещества. Същите технологии могат да се пренесат и в спиновата електроника.

Междувременно бе направен по-нататъшен напредък в квантовата преработка на информация. Така например бяха използвани 150-фемтосекундни лазерни импулси за преобръщане на кохерентни електронни спинове, като по този начин се демонстрира, че по принцип е възможно те да променят състоянието си хиляди пъти, преди да загубят кохерентността си. Освен това някои изследователи регистрираха прогрес в получаването на нови магнитни полупроводници, които могат в края на краищата да отворят вратата за практически използвани спинови транзистори. И така, революцията, предизвикана от спиновата електроника, е в ход и ще продължи да генерира технологии, които са немислими в неквантовия свят.