

Чисто спиновые токи в полупроводниках

С. А. Тарасенко

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Спин — внутренний угловой момент, как и электрический заряд, является фундаментальным свойством элементарных частиц. В последнее время в физике полупроводников все возрастающий интерес вызывают спиновые явления, широко обсуждаются перспективы создания твердотельных приборов спинтроники — устройств, использующих как электрический заряд, так и спин. В настоящем докладе рассмотрен ряд спиновых эффектов, связанных с возникновением чисто спиновых токов, т.е. потоков спина, не сопровождающихся переносом заряда. Представлен обзор экспериментальных и теоретических работ.

Известно, что возмущение системы электронов светом или электрическим полем может привести к возникновению направленного потока частиц. Обычно при протекании электрического тока переноса спина не происходит, поскольку спины отдельных электронов ориентированы случайным образом. Электрический ток сопровождается переносом спина, если носители поляризованы, как, например, при инжекции ориентированных по спину электронов из магнитного материала в полупроводник. Кроме того, оказывается, что возможен и чисто спиновый ток, т.е. перенос спина без переноса заряда в отсутствие среднего спина свободных носителей. Такая ситуация описывается неравновесным электронным распределением, когда электроны со спином «вверх» двигаются преимущественно в одну сторону, а эквивалентное количество частиц со спином «вниз» движется в противоположную сторону.

В полупроводниках спиновые токи могут быть индуцированы различными способами. Спиновый ток может быть вызван протеканием электрического тока в системах со спин-зависимым рассеянием [1]. Спин-орбитальное взаимодействие при рассеянии носителей заряда на примесях, дефектах кристаллической решетки, фонах и т.д., приводит к тому, что электроны с противоположными спинами отклоняются при рассеянии преимущественно в противоположные стороны (рис. 1). При протекании электрического тока в результате многократного рассеяния электронов в системе устанавливается спиновый поток в направлении, перпендикулярном электрическому току. Такой эффект получил название спинового эффекта Холла. Спиновые токи могут возникать не только в диффузионном режиме в структурах со спин-зависимым рассеянием, но и при баллистическом транспорте электронов, например в туннельных структурах. В последнем случае эффект связан с тем,

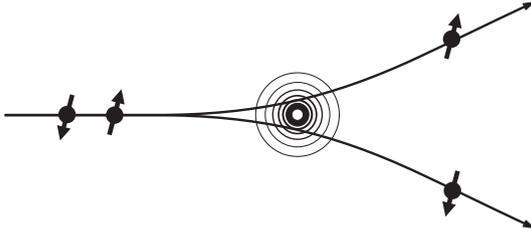


Рис. 1. Спин-зависимое рассеяние приводит к отклонению электронов с противоположными спинами в противоположные стороны.

что туннельная прозрачность барьеров зависит от ориентации спина и направления волнового вектора [2].

Чисто спиновые токи могут созданы и оптическими методами. Оказывается, что поглощение линейно поляризованного или неполяризованного света в низкоразмерных полупроводниковых структурах сопровождается генерацией чисто спиновых токов [3]. Такой эффект обусловлен двумя фундаментальными свойствами полупроводниковых систем — нечетным по волновому вектору спин-орбитальным расщеплением спектра и спин-зависимыми правилами отбора для оптических матричных элементов. Наглядно эффект генерации чисто спинового тока можно продемонстрировать для прямых оптических переходов из подзоны тяжелых дырок $hh1$ в подзону легких дырок $e1$ в квантовых ямах, выращенных вдоль низкосимметричных кристаллографических направлений, например $[110]$ или $[113]$. В таких структурах компонента спина вдоль нормали квантовой ямы z смешивается с волновым вектором электрона в плоскости структуры, что приводит к линейному по волновому вектору спин-орбитальному расщеплению энергетического спектра. Эта ситуация изображена на рис. 2, где показано расщепление подзоны тяжелых дырок $hh1$ на две спиновые ветви $\pm 3/2$. Спиновое расщепление зоны проводимости в низкосимметричных структурах меньше, чем расщепление валентной зоны и поэтому не показано для простоты. По правилам отбора прямые оптические переходы из валентной зоны в зону проводимости возможны только с изменением углового момента электрона на ± 1 [4]. Поэтому из подзоны тяжелых дырок $hh1$ идут переходы $(+3/2 \rightarrow +1/2)$ и $(-3/2 \rightarrow -1/2)$, изображенные на рис. 2 вертикальными линиями. При возбуждении линейно поляризованным или неполяризованным светом интенсивности обоих процессов одинаковы. В присутствии спинового расщепления оптические переходы, индуцированные светом фиксированной частоты, происходят в противоположных точках k -пространства в спиновых подзонах $\pm 1/2$. Такая спин-зависимая асимметрия фотовозбуждения приводит к появлению потока электронов внутри каждой

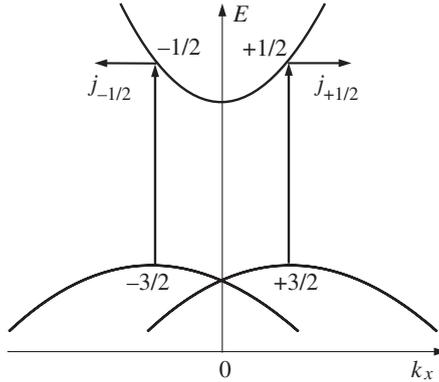


Рис. 2. Генерация чисто спинового тока при межзонных оптических переходах в квантовых ямах.

спиновой подзоны $j_{\pm 1/2}$. Эти потоки одинаковы по величине, но направлены противоположно, поэтому такое неравновесное распределение характеризуется ненулевым потоком спина $J_s = 1/2(j_{+1/2} - j_{-1/2})$ при отсутствии электрического тока и среднего спина.

Экспериментальное обнаружение и исследование спиновых токов представляет собой отдельную задачу. Поскольку чисто спиновый ток не сопровождается переносом заряда и появлением среднего спина, такое состояние не может быть зафиксировано простыми электрическими или оптическими методами. Одним из способов обнаружения спинового тока является изучение пространственного распределения спиновой плотности, поскольку возникновение чисто спинового тока приводит к накоплению носителей с противоположными спинами на противоположных сторонах образца [5]. Другим проявлением спиновых потоков является возникновение среднего электрического тока, если носители поляризованы по спину [6, 7]. При этом спиновая поляризация носителей может быть создана различными методами: оптической ориентацией циркулярно поляризованным светом, инжекцией ориентированных по спину носителей из магнитных материалов, внешним магнитным полем. В последнем случае из-за зеемановского расщепления происходит селективное заселение спиновых подзон — частиц с фиксированным спином, например со спином «вверх», становится больше. В результате, противоположно направленные потоки электронов в спиновых подзонах перестают компенсировать друг друга. В структуре возникает электрический ток, который может быть измерен обычными методами.

Литература

- [1] М. И. Дьяконов, В. И. Перель, Письма в ЖЭТФ **13**, 657 (1971).
- [2] A. Zakharova, F. T. Vasko, and V. Ryzhii, J. Phys.: Condens. Matter **6**, 7537 (1994); V. I. Perel', S. A. Tarasenko, I. N. Yassievich *et al.*, Phys. Rev. B **67**, 201304 (2003).
- [3] С. А. Тарасенко, Е. Л. Ивченко, Письма в ЖЭТФ **81**, 292 (2005).
- [4] *Оптическая ориентация*, под ред. Б. П. Захарчени и Ф. Майера, (Наука, Ленинград, 1989).
- [5] M. J. Stevens, A. L. Smirl, R. D. R. Bhat *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 136603 (2003); Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom, Science **306**, 1910 (2004); J. Wunderlich, B. Kaestner, J. Sinova, and T. Jungwirth, Phys. Rev. Lett. **94**, 047204 (2005).
- [6] А. А. Бакун, Б. П. Захарченя, А. А. Рогачев и др., Письма в ЖЭТФ **40**, 464 (1984); Н. С. Аверкиев, М. И. Дьяконов, ФТП **17**, 629 (1983).
- [7] V. V. Bel'kov, S. D. Ganichev, E. L. Ivchenko *et al.*, J. Phys.: Condens. Matter **17**, 3405 (2005).