

## Статья "О возможности ориентации электронных спинов током" ( Дьяконов М.И., Перель В.И. 1971 г. ) .

Работа [1] возникла в ходе теоретических исследований в совершенно новой в то время области создания и регистрации неравновесной спиновой поляризации носителей в полупроводниках. Эта область возникла в 1968 году после пионерской работы Лампеля [2], распространившей на физику твердого тела идеи и методов Кастлера [3] и его школы по оптической ориентации и выстраиванию угловых моментов атомов газа. Как для атомов, так и для электронов в полупроводнике, поглощение циркулярно поляризованного света приводит к ориентации электронных спинов. Из-за этого люминесценция (рекомбинационное излучение) тоже оказывается циркулярно поляризованной, что легко регистрируется. В промежутке между созданием поляризованных по спину электронов в зоне проводимости полупроводника и их рекомбинацией, на спины можно воздействовать магнитным полем, кроме того, происходит спиновая релаксация, а также интересные процессы взаимодействия между электронными спинами и спинами ядер решетки. Все эти тонкие явления могут быть (и были) детально изучены с помощью простых экспериментов, выполненных в основном небольшими группами в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в Ленинграде, и в Политехнической школе в Париже. В этой статье предсказано новое явление: ориентация электронных спинов током, называемое теперь Спиновым Эффектом Холла и впервые введено понятие спинового тока. Явление родственно Аномальному Эффекту Холла в ферромагнетиках, открытого самим Холлом в 1881 году, оставшимся совершенно непонятым в течении 70 лет, и не до конца понятым даже сегодня. Говоря просто, механизм состоит в том, что благодаря спин-орбитальному взаимодействию поток электронов со спинами вверх отклоняется, условно говоря, направо, а поток со спинами вниз - налево, совершенно аналогично закрученному теннисному мячу (эффект Магнуса). В ферромагнетике электроны поляризованы по спину, поэтому при пропускании тока они будут несколько отклоняться вбок, перпендикулярно направлениям тока и намагниченности, приводя к появлению квази-холловского напряжения. В немагнитном проводнике спиновая поляризация отсутствует, однако по-прежнему этот "эф-

фект Магнуса" существует, хотя он и не приводит к возникновению электрического тока. Однако возникает спиновый ток: спины-вверх идут направо, а спины-вниз - налево. Это не приводит к наблюдаемым эффектам в толще проводника, однако у боковых границ происходит накопление спинов, в результате должна появиться спиновая поляризация (противоположных знаков) на боковых гранях проводника. Это предсказание не вызвало большого интереса в то время (хотя так называемый "обратный спиновый эффект Холла" был обнаружен [4]), прежде всего из-за отсутствия экспериментальных возможностей измерить относительно слабую спиновую поляризацию в тонких ( $\sim 1$ ) приповерхностных слоях. Ситуация изменилась через 30 лет, когда были разработаны чувствительные методы регистрации спиновой поляризации, основанные на фарадеевском (или керровском) вращении. В 2004 году предсказанная поляризация спинов током была впервые обнаружена экспериментально [5]. К настоящему времени спиновому эффекту Холла посвящены сотни публикаций, экспериментальных и теоретических. Эффект наблюдался не только в полупроводниках, но и в металлах, как при криогенных, так и при комнатной температурах, подробнее см. обзор [6]. Надежды практического применения этого явления основаны главным образом на возможности переключения магнитных доменов путем инжекции спиновых токов в ферромагнитные пленки.

- 
- [1] Дьяконов М.И., Перель В.И., Письма в ЖЭТФ 13, 657 (1971)
  - [2] G. Lampel, Phys. Rev. Lett. 20, 491 (1968)
  - [3] A. Kastler, Science, 158, 214 (1967)
  - [4] N.S. Averkiev and M.I. Dyakonov, Sov. Phys. Semicond. 17, 393 (1983); A.A. Bakun et al, JETP Lett. 40, 1293 (1984)
  - [5] Y.K. Kato et al, Science 306, 1910 (2004); J. Wunderlich et al., Phys. Rev. Lett. 94, 047204 (2005)
  - [6] M.I. Dyakonov and A.V. Khaetskii, "Spin Hall Effect in: Spin Physics in Semiconductors, M.I. Dyakonov (ed), Springer, Berlin (2008), p. 211