

УДК 537.633.2

Эффект Холла и полупроводники

Алексеев Николай Васильевич, канд. техн. наук,
Нац. исслед. университет МИЭТ, Москва

Аннотация. Современные представления о явлениях, происходящих в полупроводниках, не верны. Приводится иное их объяснение.

Ключевые слова: полупроводники, эффект Холла, проводимость, электроны, дырки, спин, $p-n$ – переход, магнитное поле, эфир.

Когда проводник с током помещается в магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны к направлению тока, на поверхности проводника в направлении, перпендикулярном току и полю, возникает дополнительная разность потенциалов. Это явление, впервые наблюдаемое Эдвином Холлом в 1879 году, известно как эффект Холла. Оно происходит в результате отклонения движущихся заряженных частиц магнитным полем. Их отклонение вызвано действием силы Лоренца. Отклоненные заряженные частицы накапливаются на одной из сторон проводника, что и создает разность потенциалов.

Эффект Холла дает информацию о знаке движущихся носителей заряда и их плотности, он также может быть использован для измерения величины магнитных полей. Устройство для наблюдения эффекта Холла состоит из плоского проводника с током, помещенного в однородное магнитное поле (рис.1). Если носителями заряда являются электроны, то они отклоняются вверх и накапливаются на верхнем краю плоского проводника, в результате чего появляется избыток положительного заряда на нижнем краю.

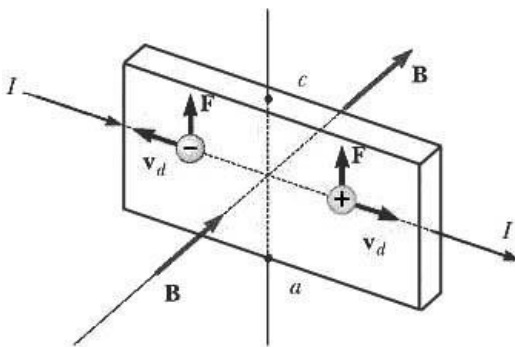


Рис.1 – Схема действия эффекта Холла

Это накопление заряда на краях проводника увеличивается до тех пор, пока электрическая сила, появившаяся в результате разделения зарядов, не уравновешивает магнитную силу, действующую на носители. Когда это равновесие будет достигнуто, электроны больше не отклоняются вверх. Чувствительный вольтметр или потенциометр, подключенный к верхней и нижней граням проводника, может измерить разность потенциалов, известную как ЭДС Холла. Если носителями тока являются положительные заряды, то на верхней грани накопятся они, поскольку внутри проводника они движутся в противоположном направлении. Экспериментально установлено, что ЭДС Холла равна $U = R \cdot I \cdot B / d$, где R – коэффициент Холла для данного материала, I – сила

тока, B – индукция магнитного поля, d – линейный размер образца в направлении вектора B [3, с. 220].

При изучении эффекта Холла у полупроводников оказалось, что у некоторых из них носителями тока оказались положительные заряды. Это свойственно только полупроводникам p -типа, т.е. полупроводникам с примесью элементов третьей группы таблицы Менделеева, в отличие от тех же полупроводников с примесью элементов пятой группы, у которых носителями тока оказались отрицательные заряды.

Но что же это за носители положительных зарядов, которые могут двигаться в твердом теле? Теоретики не придумали ничего лучшего, как концепцию "дырок". Элемент третьей группы как бы испытывает недостаток электронов на внешней оболочке, поэтому забирает у атома полупроводника один электрон, делая его положительно заряженной частицей. Среди нейтральных атомов полупроводника появляется положительно заряженная "дырка". Если в эту "дырку" заскочит электрон от соседнего атома, она переместится в место расположения этого атома. Так она может двигаться по всему полупроводнику, создавая дырочную проводимость. Вот эти положительно заряженные "дырки" якобы и отклоняются магнитным полем к верхней грани образца в эффекте Холла. Но ведь на самом деле положительно заряженные ионы не движутся в магнитном поле, они всегда остаются на своих местах, поэтому не могут никуда отклоняться магнитным полем. Двигутся в магнитном поле только электроны, которые и должны отклоняться к верхней грани образца, создавая там отрицательный потенциал.

Если же допустить, что положительно заряженные "дырки" все же отклоняются магнитным полем к верхней грани образца, то их количество должно точно равняться количеству движущихся электронов, ведь чтобы сдвинулась одна "дырка", должен сдвинуться один электрон. Но тогда никакого потенциала на верхней грани образца не было бы.

Чтобы скрыть этот прокол в теории "дырок", ее модернизировали в зонную теорию. Теперь считают, что "дырка" – это незанятое электроном состояние в энергетической зоне (вакансия). Что это за зона такая, где она физически располагается, а так же куда деваются из нее электроны, создавая там избыток вакансий и не приводя к появлению не скомпенсированного заряда, почему эти вакансии движутся, никто объяснить не собирается. Считается, что в твердом теле существуют разрешенные и запрещенные уровни энергии электронов. Разрешенные уровни располагаются в двух зонах: валентной зоне и зоне

проводимости, которые разделены запрещенной зоной. Под воздействием внешних условий (тепла, света, электрического напряжения) в полупроводниках происходит заброс электронов из валентной зоны в зону проводимости через запрещенную зону. Если там образуется избыток электронов, полупроводник получает электронную проводимость, а если избыток вакансий – "дырочную".

В действительности нет никаких "дырочных" носителей зарядов. Причиной появления положительного потенциала на верхней грани образца является то, что в этом образце электроны отклоняются не к верхней, а к нижней грани образца. А происходит это потому, что в этом образце электроны, создающие проводимость, имеют другое направление вращения.

Магнитное поле образуется в результате вращения эфира, вызванного вращающимися частицами. Но поскольку оси вращения у них направлены в разные стороны, суммарного вращения эфира нет. При движении частиц они устанавливают свои оси вращения вдоль направления скорости. Если направления вращения у них одинаковые, в окружающем их

эфире формируется общий вращающийся поток, который и образует магнитное поле [1, с. 11]. Вращающиеся потоки эфира могут взаимодействовать. Там, где скорости потоков направлены одинаково, поток убыстряется, эфир разрежается. Там, где скорости направлены противоположно, течение эфира замедляется, эфир уплотняется. Образуется новый поток эфира из области с повышенной плотностью в область с пониженной плотностью. Он и вызывает смещение частиц, создавших вращающийся поток эфира. Если вращающаяся частица движется перпендикулярно направлению другого потока эфира, то с одной ее стороны образуется уплотнение эфира, а с другой – разрежение. Возникающий новый поток вызывает смещение частицы в направлении, перпендикулярном ее скорости и направлению внешнего потока (рис.2). Сила, которая вызывает смещение частицы, называется силой Лоренца. На рисунке стрелками показаны направления потока внешнего магнитного поля, вращающегося потока частицы, ее скорости и силы Лоренца.

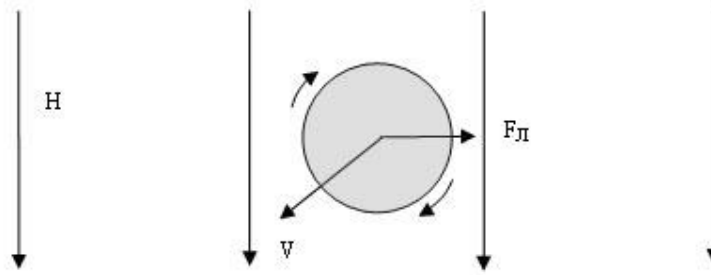


Рис.2 – Электрон, движущийся в магнитном поле

Согласно принципу Паули в атоме нет даже двух электронов с одинаковыми квантовыми числами. Следовательно, при построении атома электроны, находящиеся на одной орбите, не могут иметь одинаковые направления вращения (спин). При формировании атома электроны последовательно занимают свои оболочки, чередуя направления вращения. Каждая оболочка может иметь несколько разных орбит электронов, находящихся на одинаковом расстоянии от ядра. Но на одной орбите могут находиться не более двух электронов, у которых разные направления вращения. Поэтому у элементов третьей группы направление вращения у внешних не спаренных электронов одно, а у элементов пятой группы – другое.

Собственная проводимость полупроводников очень мала. Основной вклад в проводимость легированных полупроводников вносят электроны атомов примеси, у которых на внешней орбите имеются не спаренные электроны. Они легче отрываются от своих атомов под действием электрического поля. Во внешнем магнитном поле у атома примеси орбита внешнего электрона устанавливается в соответствии с направлением вектора напряженности поля, а направление вращения электрона остается прежним. При переходе от атома к атому под действием электрического поля, создающего ток через полупроводник, электроны атомов примеси не успевают изменить направление оси вращения и направление вращения, но испытывают отклонение магнитным полем в соответствующую сторону.

Но если "дырочных" носителей не существует, как же объясняется работа *p-n* перехода? У атомов кремния и германия внешние электроны, находящиеся на одной орбите, спарены. Они имеют противоположные направления вращения, поэтому удерживаются в атоме не только электростатическим полем ядра, но и магнитным полем. Подобно двум стержневым магнитам внешние электроны притягиваются друг к другу противоположными полюсами. Поэтому их труднее оторвать от атомов. Под действием внешнего электрического поля могут двигаться преимущественно электроны атомов примеси, которые ненадолго размещаются на дополнительной орбите атомов полупроводника и переходят от атома к атому, создавая ток. Если же на их пути встречается атом примеси с одним внешним электроном, направление вращения которого противоположно пришедшему электрону, то для этого атома энергетически выгоднее захватить этот электрон и стать отрицательно заряженным ионом, чем под действием приложенного потенциала передать его соседнему атому. Накопление таких задержанных атомами примеси электронов приводит к появлению объемного заряда в полупроводнике, который создает электрическое поле, препятствующее движению электронов. Кроме того, захват электронов уменьшает количество носителей тока.

При тепловых колебаниях атомов наиболее слабо связанные с атомами электроны могут получать достаточную энергию для перехода от одного атома к

другому. Наиболее легко это делают электроны атомов примеси в полупроводниках n -типа. При контакте полупроводников n -типа и p -типа электроны из полупроводников n -типа (будем называть их n -электронами) переходят в полупроводник p -типа. Поскольку они имеют направление вращения противоположное p -электронам, они захватываются атомами примеси, образуя на границе полупроводников область двойного объемного электрического заряда (p - n – переход).

При подаче отрицательного потенциала на полупроводник p -типа его p -электроны движутся к p - n – переходу, достигнув которого тормозятся отрицательным потенциалом на его границе. В то же время положительный потенциал на p - n – переходе со стороны полупроводника n – типа препятствует оттоку электронов из него в сторону внешнего положительного потенциала, приложенного к полупроводнику. Ток через p - n – переход не идет.

При подаче отрицательного потенциала на полупроводник n – типа его электроны движутся от атома к атому и нейтрализуют положительный потенциал

на p - n – переходе, восстанавливая нейтральность атомов примеси, которые под действием того же отрицательного потенциала снова отдают полученные электроны в полупроводник p -типа. Положительный потенциал, приложенный к нему, притягивает его собственные p -электроны, заставляя атомы примеси отдавать их. Место ушедших p -электронов занимают n -электроны, атомы примеси их не захватывают, поскольку на внешней орбите уже нет p -электронов. Поэтому ток через всю структуру продолжает течь. Таким образом, проводимость p - n перехода в одном направлении оказывается выше, чем в другом, что и используют в выпрямителях переменного тока.

Следует отметить, что положительный коэффициент Холла наблюдается не только у полупроводников p -типа, но и у половины чистых металлов, таких как V, W, Hf, Ir, Mn, Mo, Nb, Sn, Os, Pr, Re, Ro, Ru, Yb, Pb, Ti, Cr, Ce, Zn, Zr, U [2, с. 756]. Остальные металлы имеют отрицательный коэффициент Холла. Но объяснить это не может ни "дырочная" ни зонная теории, зато легко объясняет предложенная здесь модель явления.

Литература:

1. Алексеев Н.В. Кинетическая энергия и концепция присоединенной массы // Академическая публикастика. Аэтерна. №3. - 2019.
2. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, - 1991.
3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, - 1981.