

ФЭМ-эффект

И.КИКОИН, С.ЛАЗАРЕВ

ФОТОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ (ФЭМ) эффект был открыт одним из нас в 1934 году. Заключается этот эффект в следующем. Если освещать полупроводник, помещенный в магнитное поле, то в нем возникает электродвижущая сила. На рисунке 1 приведена схема экспери-

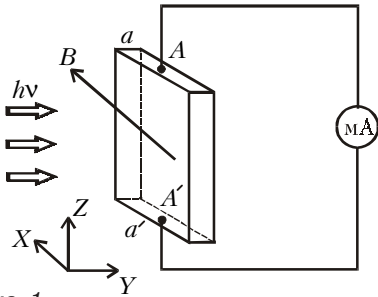


Рис. 1

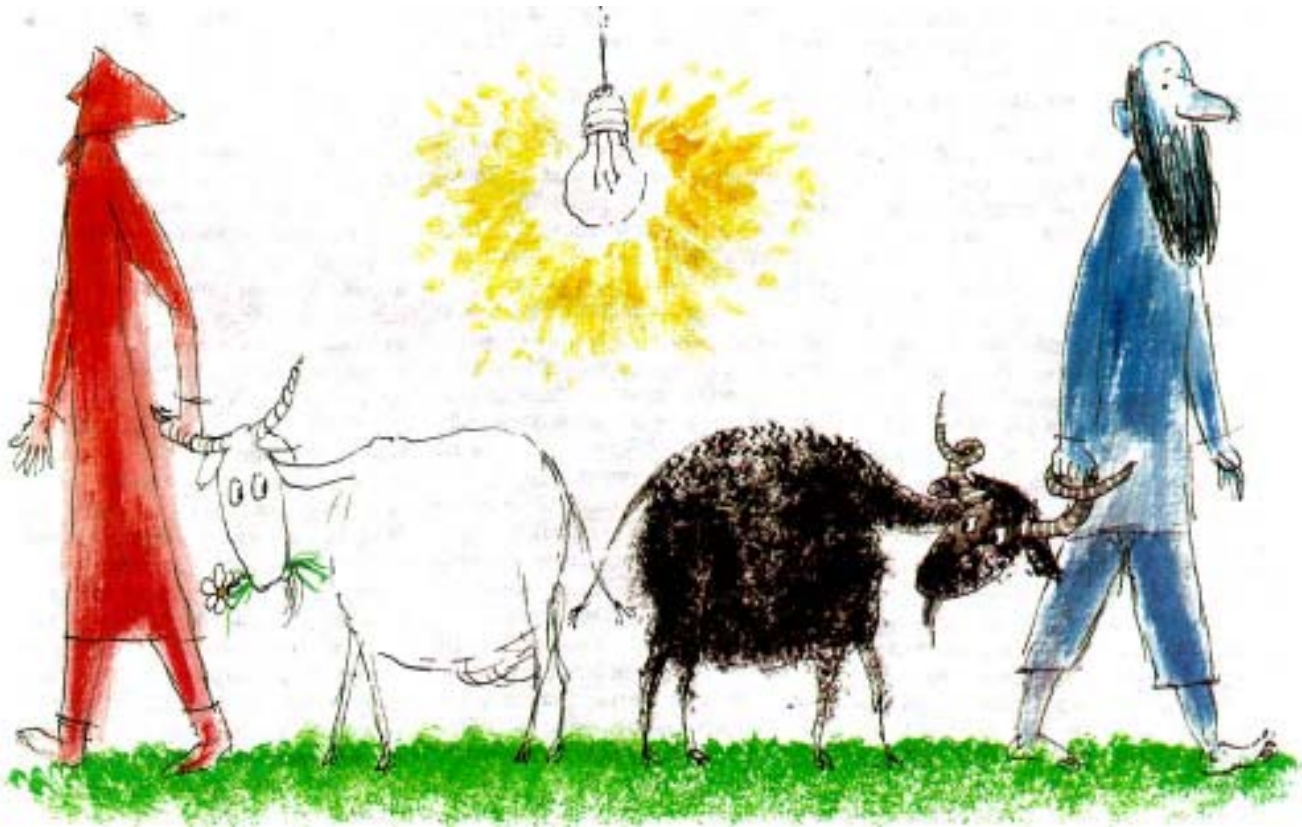
мента, в котором обнаруживается фотоэлектромгнитный эффект. Полупроводник в виде прямоугольной

пластинки помещен в магнитное поле, направленное вдоль оси X . Вдоль оси Y на поверхность пластинки падает пучок света. Тогда между гранями a и a' вдоль оси Z возникает разность потенциалов, которую мы в дальнейшем будем называть фотоэлектромгнитной ЭДС. Если на эти грани нанести электроды и замкнуть их проводником, то включенный в цепь измерительный прибор зарегистрирует наличие тока в цепи.

В первых экспериментах, в которых был обнаружен ФЭМ-эффект, использовались пластинки из закиси меди (Cu_2O). В то время закись меди была самым «модным» веществом, на котором подробно изучались основные закономерности, касающиеся полупроводников. Можно сказать, что в 30-х годах началась эра полупроводников, которым суждено было совершить революцию в радиоэлект-

ронной технике. Описанные выше опыты проводились на образцах закиси меди при температуре жидкого азота (77 К). В небольшом магнитном поле (с индукцией около 1 Тл) при освещении образца довольно слабым светом от лампочки карманного фонарика разность потенциалов между точками A и A' (расстояние между ними было около 2 см) достигала 15–20 В!

Опыты показали, что знак фотоэлектромгнитной ЭДС, а следовательно, и направление электрического поля в образце меняются при изменении направления внешнего магнитного поля. А при заданном направлении поля знак ЭДС меняется, если изменить направление падающего на образец света (т.е. осветить противоположную поверхность образца). При освещении образца в отсутствие магнитного поля ЭДС не возникает.



Попытаемся объяснить происхождение ФЭМ-эффекта.

Фотоэлектромагнитная ЭДС возникает при действии на освещаемый образец магнитного поля. Между тем известно, что магнитное поле действует только на движущиеся электрические заряды. Поэтому надо понять, каким образом создается движение зарядов в полупроводнике в отсутствие источника ЭДС.

Свет, падающий на поверхность полупроводника, поглощается в нем (если полупроводник не прозрачен для этого света). Во многих случаях свет поглощается электронами атомов полупроводника. При достаточной энергии ($h\nu$) квантов света (фотонов) поглотивший их электрон отрывается от атома, становится свободным и может перемещаться внутри освещаемого тела. В металлах и без всякого действия света имеется огромное количество свободных электронов. В полупроводниках число свободных электронов обычно мало, а под действием поглощаемого света оно увеличивается. Раз полупроводник непрозрачен, падающий на его поверхность свет поглощается в тонком слое у поверхности, т.е. проникает в образец лишь на небольшую глубину (порядка длины волны света). Следовательно, в тонком приповерхностном слое полупроводника увеличивается число свободных электронов. В остальной части полупроводника, куда свет не проникает, число электронов остается неизменным. Значит, в тонком слое вблизи освещаемой поверхности концентрация электронов оказывается больше, чем в толще образца. Из молекулярной физики известно, что, когда в одной части тела концентрация частиц больше, чем в других его частях, наблюдается явление диффузии – перемещение частиц из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией. То же происходит и с электронами, рожденными в полупроводнике светом: электроны диффундируют от освещаемой поверхности в глубь образца. Но перемещение электронов – это электрический ток. При освещении полупроводника поглощаемым светом возникает движение электронов от освещенной к неосвещенной поверхности образца. Иными словами, возникает ток, который мы назовем диффузионным электронным током. (Этот ток направлен

от неосвещенной грани к освещенной.) Он возникает под действием света без внешнего источника тока. Точнее, свет и служит источником тока. На электроны, создающие диффузионный ток, действует магнитное поле. Как известно, сила Лоренца \vec{F}_L , действующая в магнитном поле на движущийся заряд, направлена перпендикулярно скорости \vec{v} заряда и магнитной индукции \vec{B} поля. Следовательно, если направление индукции магнитного поля и направление падающего света такие, как на рисунке 1, то под действием силы Лоренца электроны отклоняются к грани a' и скапливаются на ней. Следовательно, эта грань будет иметь отрицательный заряд. Таким образом, между гранями a и a' возникает разность потенциалов, и если наложить на эти грани электроды, соединенные проводником, то по проводнику потечет электрический ток.

Казалось бы, на этом можно считать объяснение возникновения ФЭМ-эффекта законченным. Однако существенным является тот факт, что электрический ток в замкнутой цепи существует в течение длительного времени, пока на образец падает свет. А приведенные выше рассуждения недостаточны для объяснения этого факта. Действительно, для поддержания разности потенциалов между гранями a и a' пластинки необходим постоянный приток электронов на грань a' , а следовательно, постоянный диффузионный ток электронов. Но диффузия электронов не может долго продолжаться, она должна прекратиться. В самом деле, часть электронов, диффундируя в глубь образца, достигает неосвещенной поверхности пластинки и оседает на ней. Со временем на этой поверхности должен накопиться отрицательный заряд, который будет тормозить диффундирующие электроны. Когда на неосвещенной поверхности образца накопится достаточное количество электронов, диффузионный ток прекратится, и, следовательно, прекратится ток во внешней цепи. Как показывают расчеты, время существования диффузионного тока, зависящее от внешних условий (от интенсивности падающего света, значения индукции магнитного поля) и от свойств образца (его размеров, материала и пр.), обычно весьма мало – порядка $10^{-5} - 10^{-6}$ с.

Для объяснения постоянного тока в цепи (постоянной разности потенциалов между гранями a и a') необходимо предположить, что скапливающийся на неосвещенной поверхности пластинки отрицательный заряд «нейтрализуется» точно таким же положительным зарядом. Представим себе, что при освещении поверхности образца рождаются не только электроны, но и положительно заряженные частицы, заряд каждой из которых по абсолютному значению равен заряду электрона. Они тоже будут диффундировать в глубь образца. Тогда совместная диффузия электронов и этих положительных зарядов может продолжаться сколь угодно долго, поскольку, доходя до противоположной поверхности образца, они не заряжают ее. Правда при этом суммарный диффузионный ток равен нулю.

Именно такая картина и реализуется в действительности при освещении полупроводника. А положительные заряды, которые рождаются светом, это – так называемые дырки. Представление о дырках порождено квантовой механикой. ФЭМ-эффект – одно из первых физических явлений, для объяснения которых понятие дырки оказалось совершенно необходимым. В современной теории электропроводности электронно-дырочное представление стало общепринятым.

Итак, при освещении поверхности полупроводниковой пластинки происходит одновременное рождение свободных электронов и дырок (или, как говорят, рождение электронно-дырочной пары), которые диффундируют в одном направлении. В магнитном поле сила Лоренца отклоняет движущиеся электроны и дырки в противоположные стороны, так что на грани a' оседают электроны, а на грани a – дырки. Очевидно, что при изменении направления падающего света или направления магнитной индукции знак возникающей ЭДС меняется на противоположный. Знак ЭДС можно определить по праву левой руки: если левую руку расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены вдоль падающего на образец светового пучка, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление электрического поля в образце.

Такова в общих чертах качественная теория ФЭМ-эффекта. Конечно, эта теория была разработана после детального экспериментального исследования эффекта. Сам эффект был обнаружен неожиданно значительно раньше создания теории, и сначала он казался удивительным. Расчеты, выполненные на основе развитой теоретической модели, дают следующую

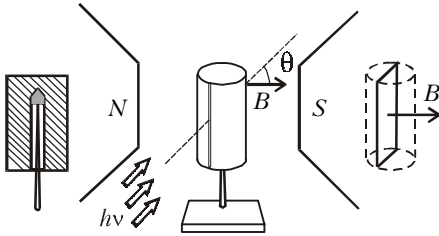


Рис. 2

щую приближенную формулу для силы фотоэлектромагнитного тока I в замкнутой цепи, когда электроды образца замкнуты накоротко (т.е. когда сопротивление внешней цепи пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением самого полупроводника):

$$I = KeNB,$$

где e – заряд электрона, N – количество квантов света, поглощаемых 1 м^2 поверхности образца в 1 секунду (очевидно, что N пропорционально освещенности образца), B – значение индукции магнитного поля, а K – коэффициент пропорциональности, значение которого зависит только от материала образца. Прямая пропорциональность тока интенсивности падающего света и индукции магнитного поля была выявлена уже в первых экспериментах.

При обычных условиях опыта в небольшом магнитном поле порядка 1 Тл при освещенности, создаваемой естественным дневным светом, что соответствует $N \sim 10^{21} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$, через образец монокристаллического германия шириной 0,01 м в направлении магнитного поля течет фотомагнитный ток $\sim 10^{-3}$ А.

Зная внешние параметры (N , B), можно, измеряя фотомагнитный ток, находить характеристики полупроводниковых материалов, которые определяют величину коэффициента K . ФЭМ-эффект в современных лабораториях стал простым и надежным инструментом для определения параметров, характеризующих

качество полупроводниковых материалов, таких, как время жизни носителей (электрона и дырки) τ , скорость поверхностной рекомбинации S , диффузионная длина L , подвижность носителей тока μ и некоторых других. Поясним кратко смысл этих величин.

Как мы уже знаем, под действием кванта света валентный электрон может «оторваться» от атома и стать электроном проводимости. Однако этот избыточный носитель тока не может существовать в образце бесконечно долго. Довольно скоро после своего рождения он по тем или иным причинам снова становится связанным, например присоединившись к ионизированному атому (этот процесс называется рекомбинацией). Среднее время τ существования носителя тока в свободном состоянии называют временем жизни. В разных полупроводниках это время различно – от 10^{-10} с до сотых долей секунды. Электроны (или дырки) рекомбинируют не только в объеме полупроводника, но и на его поверхности. Величина S , характеризующая скорость исчезновения носителей тока на поверхности, называется скоростью поверхностной рекомбинации. Длина диффузии носителей L равна приблизительно расстоянию, на которое успевают продиффундировать электроны и дырки за время своей жизни τ . Подвижность носителей μ – это скорость их перемещения под действием электрического поля с напряженностью, равной единице. Эти параметры во многом определяют качество полупроводников, используемых в электронной технике.

В заключение опишем один красивый опыт, который иллюстрирует механизм возникновения ФЭМ-эффекта. Опыт состоит в следующем. Из полупроводника (германия) вырезается образец в виде маленького цилиндра. Внутри цилиндра высверливается тонкий канал, в который запрессовывается подпятник из твердого материала. Образец насаживается на иглу (как магнитная стрелка компаса). Цилиндр помещается между полюсами магнита (рис.2) и освещается светом (угол между направлением луча света и индукцией магнитного поля $\theta \approx 45^\circ$). В результате образец начинает вращаться! Опыт наглядно демонстрирует непосредственное превращение энергии света в механическую энергию. Это

явление можно назвать фотомагнетомеханическим эффектом. Попробуем объяснить происхождение этого эффекта.

Луч света, падающий на боковую поверхность цилиндрического образца, освещает узкую вертикальную полоску небольшой ширины по всей длине цилиндра. Рождаемые светом электроны и дырки диффундируют из освещенной области в глубь цилиндрического образца. В результате действия силы Лоренца на диффундирующие в магнитном поле электроны и дырки возникает ЭДС ФЭМ-эффекта. При этом все процессы диффузии и рекомбинации рожденных светом носителей разгравываются в слое образца протяженностью порядка диффузионной длины. Остальная же толща образца пассивна и служит как бы проводником, замыкающим на себя ЭДС. Весь образец можно представить в виде бесконечного числа замкнутых контуров-рамок (одна из сторон этих рамок – узкая освещенная полоска поверхности образца). На каждую такую рамку со стороны магнитного поля действует момент сил, максимальное значение которого пропорционально площади рамки и силе тока в ней. Однако в силу симметрии цилиндрического образца все эти рамки можно заменить одной «эквивалентной» рамкой, плоскость которой определяется направлением пучка падающего света. И если угол θ , который составляет плоскость рамки с направлением индукции магнитного поля, не равен 90° , то рамка поворачивается в магнитном поле (как рамка с током в обычном электродвигателе). В описанном нами опыте $\theta \approx 45^\circ$, и вращающий момент, действующий на эквивалентную рамку, заставляет вращаться весь образец. При вращении цилиндра под пучок света попадают все новые участки его поверхности. Поэтому цилиндр будет вращаться непрерывно.

Если вы разобрались в механизме возникновения ФЭМ-эффекта, вы сможете ответить на такой вопрос: изменится ли направление вращения цилиндра, если направление поля поменять на противоположное?