

06

Механизм фотоэлектромагнитного эффекта в двумерных системах в квантующих магнитных полях

© Ю.Б. Васильев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: yu.vasilyev@mail.ioffe.ru*Поступило в Редакцию 14 декабря 2008 г.*

Рассматривается новый механизм терагерцового фотоэлектронного эффекта, позволяющий объяснить особенности обнаруженных ранее терагерцовых фототоков в асимметричных квантовых ямах InAs и в двойных ямах GaAs в наклонном магнитном поле. Показано, что в асимметричных полупроводниковых гетероструктурах в наклонном магнитном поле при поглощении излучения на переходах между уровнями Ландау индуцированный фототок является краевым. Предлагается новая концепция создания чувствительных терагерцовых фотоприемников на основе асимметричных гетероструктур.

PACS: 72.40.+w, 78.67.De

Недавние эксперименты по фотогальваническим эффектам, индуцированным терагерцовым излучением в квантовых ямах, привлекли большое внимание. Возникновение фототоков, как правило, обусловлено гиротропными свойствами среды и особенностями спин-орбитального взаимодействия [1]. Наиболее удивительным является наблюдение фототоков в квантовых ямах в наклонных магнитных полях без приложения внешнего смещения [2–4]. По своему проявлению этот эффект напоминает фотоэлектромагнитный эффект Кикоина–Носкова [5]. Известно, что если облучить объемный полупроводник светом, который сильно поглощается носителями заряда, и приложить к образцу магнитное поле, то в поперечном к магнитному полю направлении возникает электрическое поле. В экспериментах на квантовых ямах в сильных наклонных магнитных полях имеется принципиальное отличие, поскольку энергия заряженных частиц оказывается квантованной во всех направлениях и по этой причине никакое их поступательное движение невозможно. Тем не менее эксперименты показали, что в

асимметричных квантовых ямах, т. е. при наличии сильного встроенного электрического поля, и при приложении наклонных магнитных полей под действием терагерцового излучения возбуждаются фототоки. В настоящей работе приводится качественное описание механизма, который позволяет объяснить особенности экспериментально наблюдаемых фототоков.

На рис. 1 представлена схема механизма, объясняющего появление фототока в асимметричной квантовой яме в наклонном магнитном поле. При совпадении частоты падающего света с частотой циклотронного резонанса (рис. 1, *a*) происходит переход электрона на более высокий незаполненный уровень Ландау с одновременным появлением дырки на том уровне, откуда ушел электрон (рис. 1, *b*). В присутствии продольной компоненты магнитного поля уровни Ландау взаимодействуют с уровнями размерного квантования в яме [6] и свойства циклотронных переходов становятся подобными свойствам межподзонных переходов. Поэтому центры волновых функций электронов и дырок смещены относительно друг друга в направлении электрического поля вдоль оси роста квантовой ямы. На рис. 1, *c* условно показаны две плоскости, соответствующие двум слоям разноименных носителей заряда. В зависимости от того, в каком месте образца происходит поглощение света (либо в объеме, либо на краях образца), возможны два типа переходов между уровнями Ландау. На рис. 1, *a* изображены два перехода: один в объеме образца и второй вблизи края образца, где имеется сильное электрическое поле [7].

В объеме образца система из электрона и связанной с ним кулоновским взаимодействием дыркой образует непрямоугольный двумерный магнитоэкситон (2ДМЭ) [8] и является электрическим диполем, вектор которого направлен вдоль оси роста квантовой ямы. Взаимодействие дипольного момента 2ДМЭ D с компонентой магнитного поля B_y в плоскости ямы приводит к появлению составляющей импульса 2ДМЭ, равной $1/c[D \times B_y]$ [9,10]. Образование 2ДМЭ за счет поглощения оптического фотона (кстати, как и оптическая рекомбинация 2ДМЭ) может произойти только тогда, когда скорость 2ДМЭ V удовлетворяет условию $MV = 1/c[B_y \times D]$ [11,12]. Здесь M — масса 2ДМЭ. Хотя для каждой из частиц, образующих 2ДМЭ, энергетический спектр дискретен, однако в меру кулоновского взаимодействия между электроном и дыркой возможно поступательное движение 2ДМЭ. Таким образом, при возбуждении неравновесных неспрямых 2ДМЭ они двигаются в плос-

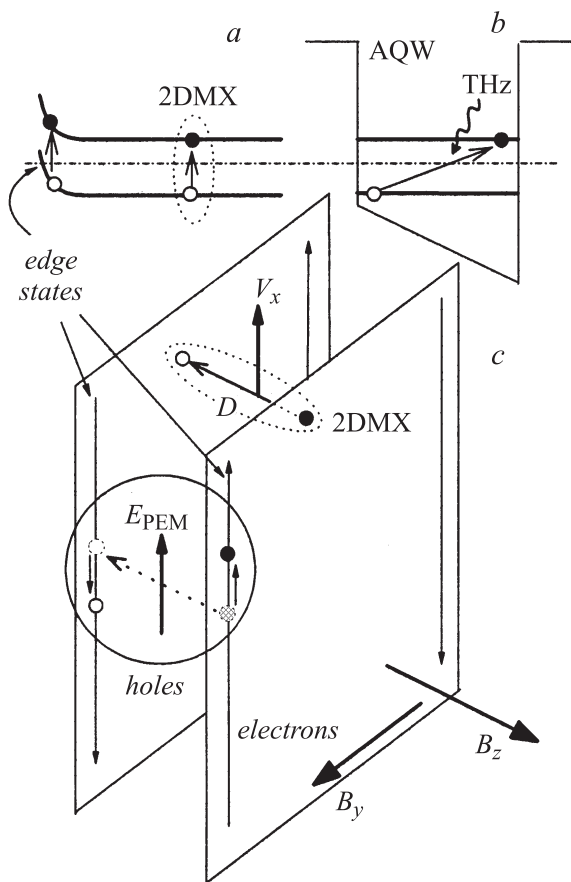


Рис. 1. *a* — схема зонной структуры асимметричной квантовой ямы с условным изображением уровней Ландау в зоне проводимости и сдвиг разноименных неравновесных носителей заряда в направлении встроенного электрического поля. *b* — зависимость энергии уровней Ландау от расстояния до края образца. Вертикальными стрелками показаны переходы между уровнями Ландау в объеме образца и вблизи его края. *c* — схематичное изображение двух слоев вместе с краевыми состояниями для каждого типа носителей, показаны магнитоэкситон (который обозначен как 2DMX) с ненулевой скоростью поступательного движения V_x , а также сдвиг разноименных зарядов на краевых состояниях, приводящий к возникновению электрического поля E_{PEM} .

кости ямы перпендикулярно магнитному полю (рис. 1, *c*). Очевидно, что движение экситонов как нейтральных частиц не может приводить к возникновению фототока. Однако если экситоны в процессе дрейфа попадут в сильное электрическое поле вблизи краев образца, то они могут ионизоваться, образуя электроны и дырки, причем импульсы рожденных в краевых состояниях носителей будут направлены в противоположные стороны. С ростом величины продольного магнитного поля растёт скорость дрейфа 2ДМЭ и увеличивается вероятность их ионизации на краевых состояниях.

Другим возможным процессом является появление электронов и дырок при поглощении света непосредственно на краевых состояниях. Основным эффектом воздействия продольного магнитного поля V_y на систему из двух типов носителей является относительный сдвиг относительно друг друга их дисперсионных кривых в импульсном пространстве на величину $k_x = edV_y/c$, где d — расстояние между слоями двумерных носителей заряда. В силу закона сохранения количества движения импульсы рожденных в краевых состояниях разноименных носителей могут быть направлены только в противоположные стороны. Движение разноименно заряженных частиц по краевым состояниям в противоположных направлениях приводит к их разделению в пространстве и возникновению электрического поля (обозначено как E_{PME} на рис. 1, *c*), перпендикулярного к магнитному полю. В плоскости квантовой ямы при этом возникает фотоэдс (в режиме разомкнутых контактов) и появляется фототок (в режиме короткого замыкания) аналогично классическому фотоэлектромагнитному эффекту Кикоина–Носкова [5].

Из представленного рассмотрения можно сделать вывод о том, что фототоки являются краевыми и определяются величиной и направлением перпендикулярной компоненты магнитного поля. Реальные образцы содержат краевые состояния и внутри плоскости двумерной системы, например вокруг разного рода неоднородностей. Если таких неоднородностей относительно немного, то краевые состояния замкнуты внутри плоскости и не оказывают большого влияния на протекание тока между контактами. В сильно неоднородных образцах возможно перекрытие краевых состояний от различных неоднородностей внутри образца и образование протяженных краевых состояний. Такой случай схематично показан на рис. 2, *a*. При этом возникают такие конфигурации краевых состояний, когда два и более проводящих канала соединены параллельно, так что ток одновременно протекает между двумя контактами по

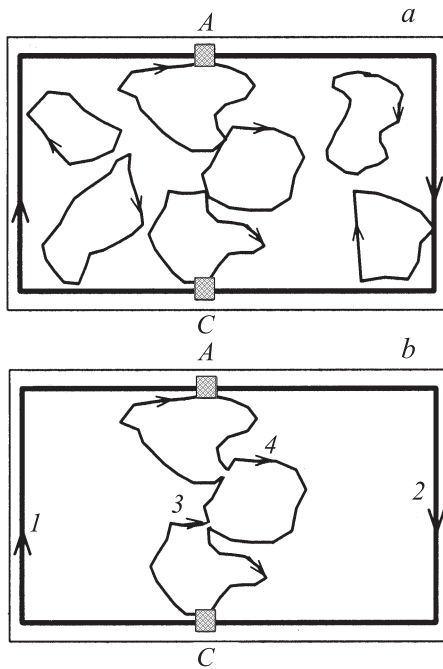


Рис. 2. Схематическое изображение разветвленной системы краевых состояний в неоднородной двумерной системе (*a*) и пути, по которым может протекать ток между контактами *A* и *C*: *1* и *2* — вдоль краев образца; *3* и *4* — вдоль неоднородностей внутри плоскости ямы (*b*).

различным путям. На рис. 2, *b* показана схема, в которой полный ток между контактами *A* и *C* определяется суммой токов, протекающих по четырем различным путям. В реальных образцах количество таких краевых состояний, по которым протекает фототок, может быть большим и суммарный ток может сильно меняться для различных пар контактов внутри образца [13].

С помощью предложенного механизма возникновения фототоков можно качественно объяснить результаты экспериментов, в которых наблюдались фототоки в квантовых ямах на основе InAs [2–4] и двойных квантовых ямах GaAs [14]. Необходимость наличия электрического

поля объясняет, почему эффект наблюдается только в асимметричных структурах. Фототоки направлены перпендикулярно магнитному полю, и их величина растет как с ростом продольного магнитного поля, так и с увеличением асимметрии квантовых ям. Важным свидетельством в пользу правильности предложенного механизма является то, что фототоки действительно являются краевыми: согласно экспериментальным данным на противоположных краях образца фототоки направлены в противоположные стороны [3].

Механизм, ответственный за появление фототоков, не предъявляет специальных требований к материалу гетероструктур. По-видимому, любые асимметричные гетероструктуры (с сильным встроенным электрическим полем или с приложенным внешним электрическим полем) могут работать в качестве приемников терагерцового излучения при приложении наклонных магнитных полей. Кроме переходов между уровнями Ландау рассмотренный механизм возбуждения неравновесных носителей может быть реализован и для других типов оптических переходов в квантовых ямах (например, межподзонных и межзонных). Таким образом, рассмотренный эффект можно использовать для разработки чувствительных фотоприемников широкого диапазона электромагнитного спектра.

Работа выполнена при поддержке программы Российской академии наук.

Список литературы

- [1] *Bel'kov V.V., Ganichev S.D.* // *Semicond. Sci. Technol.* 2008. V. 23. P. 114003–114013.
- [2] *Emelyanov S.A.* // *Solid State Comm.* 2005. V. 131. P. 675–678.
- [3] *Vasilyev Yu.B., Stellmach C., Nachtwei G.* et al. // *Physica E.* 2006. V. 34. P. 308–311.
- [4] *Vasilyev Yu.B., Stellmach C., Nachtwei G.* et al. // *Inst. Phys. Conf. Ser.* 2006. N 187. P. 553–557.
- [5] *Kikoin I.K., Noskov M.M.* // *Phys. Zs. Sowjetunion.* 1934. V. 5. P. 586–588.
- [6] *Merlin R.* // *Solid State Comm.* 1987. V. 64. P. 99–101.
- [7] *Девятков Э.В.* // *УФН.* 2007. Т. 177. С. 207–229.
- [8] *Бычков Ю.А., Иорданский С.В., Элиашберг Г.М.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1981. Т. 33. С. 152–155.
- [9] *Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е.* // *ЖЭТФ.* 1967. Т. 53. С. 717–722.

- [10] *Gorbatsevich A.A., Tokatly I.V.* // *Semicond. Sci. Technol.* 1998. V. 13. P. 288–295.
- [11] *Kulik L.V., Kukushkin I.V., Kirpichev V.E.* et al. // *Phys. Rev. B.* 2000. V. 61. P. 1712–1715.
- [12] *Parlangeli A., Christianen P.C.M., Maan J.C.* et al. // *Phys. Rev. B.* 2000. V. 62. P. 15323–15326.
- [13] *Emelyanov S.A.* // arXiv: 0901.0088.
- [14] *Vasilyev Yu.B., Suris R., Stellmach C.* et al. // *AIP Conf. Proc.* 2007. V. 893. P. 493–494.