

УДК 538.9

DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-2-51-59

ОГРОМНОЕ МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЕ В НЕСОПРЯЖЕННЫХ ПОЛИМЕРАХ

© А.А. Лачинов, Н.В. Воробьева

Известно несколько разновидностей эффекта магнетосопротивления в сопряженных органических материалах, но для практического применения они не обладают достаточной величиной коэффициента магнетосопротивления. Представлен обзор результатов исследования явления огромного магнетосопротивления в структуре ферромагнетик/несопряженный полимер/немагнитный металл. Зафиксировано максимальное значение коэффициента магнетосопротивления – 10^7 %. Рассматривается влияние магнетострикции, толщины полимерной пленки, материала электродов на эффект магнетосопротивления. Механизм переноса заряда в экспериментальной структуре обсуждается с точки зрения инжекционной модели. Выявлены два механизма изменения электрического сопротивления структуры ферромагнетик / несопряженный полимер / немагнитный металл под действием магнитного поля: изменение параметров потенциального барьера на границе ферромагнетик / полимер и изменение подвижности носителей заряда в узкой зоне проводимости в полимере.

Ключевые слова: спинтроника, огромное магнетосопротивление, полимеры.

Введение. Впервые эффект магнетосопротивления (МС) на органических материалах был получен в 2002 г. В этой работе [1] авторы представили результаты прямой спинполяризованной инжекции в тонкую пленку секстифенила из $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}$ ($0.2 < x < 0.5$) (LSMO) электродов при комнатной температуре. При включении магнитного поля наблюдается отрицательное МС от 10 до 25% при различной температуре. В другой работе был исследован эффект, названный авторами гигантским магнетосопротивлением [2]. Была использована π -сопряженная молекула три(8-гидроксихинолин) алюминия (Alq_3), наиболее широко используемая в органических светодиодах [3]. Немалое значение коэффициента МС в 40%, которое сравнимо со значениями для металлических спиновых клапанов [4, 5], получено при 11К. В работе [6] авторы сообщают об открытии большого магнетосопротивления при комнатной температуре в многослойном устройстве на основе полифлуорена в малых магнитных полях. Авторы интерпретируют его как органическое магнетосопротивление. Этот эффект достигал 10% при комнатной температуре в магнитных полях до 10 мТл. Эти тонкопленочные многослойные

устройства состояли из полимера поли(9,9-диоктилфлуоренил-2,7-диол) (PFO), помещенного между электродами. Нижний электрод состоял либо из смеси оксидов олова и индия (ITO), либо из поли(3,4-этилен-диокситиофен) (PEDOT), нанесенного на ITO, либо из золота, нанесенного на стекло. Верхние электроды были изготовлены из алюминия, из кальция или из золота. О наблюдении туннельного анизотропного магнетосопротивления (ТАМС) в органическом спиновом клапане с одним ферромагнитным электродом было сообщено в работе [7]. Авторы объясняют ТАМС туннельно-инжекционными процессами из эпитаксиального слоя манганита LaSr , который управляет транспортными свойствами. В данной работе авторы изготовили структуры подобных спиновому клапану, используя органический полупроводник перилен C_6F_2 -диметил-диимида перилентетракарбоновой кислоты (PTCDI-C4F7) и один слой LSMO и немагнитный электрод из алюминия.

В вышеприведенных работах использование сопряженных органических материалов сталкивается с проблемами небольшого коэффициента МС, а также необходимостью низких

ЛАЧИНОВ Алексей Алексеевич – к.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, e-mail: ctt.bspu@gmail.com

ВОРОБЬЕВА Наталья Викторовна – к.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН

температур. В последние десятилетия развивается научное направление – электроника тонких пленок несопряженных полимеров [8]. При уменьшении толщины пленок, изготовленных из этих материалов, может возникнуть ситуация, когда заряды, сосредоточенные вблизи противоположных границ этого контакта, начнут взаимодействовать между собой. При этом в середине барьера начинает формироваться локальный минимум, который может привести к пересечению кривой, описывающей огибающую потенциального барьера с уровнем Ферми. Это приводит к возникновению эффекта электронного переключения на поверхности раздела металл–полимер, индуцированного изменением граничных условий, например, изменением магнитного состояния подложки. Исследование этого эффекта является важным с точки зрения практического применения, так как в отличие от аналогичных явлений, полученных на других органических материалах, он может быть реализован при комнатной температуре и в обычной атмосфере.

Методика. Объектом исследования являлась многослойная структура ферромагнетик/полимер/металл. В качестве ферромагнетика применялись пластины поли- и монокристаллического никеля толщами 0.5 мм, пленки никеля толщиной до 100 нм, пленки пермаллоя толщиной до 100 нм. В качестве немагнитного металла применялись пленки меди и алюминия толщиной не более 100 нм. Полимерная пленка была изготовлена из раствора несопряженного полидифениленфталаида (ПДФ) из класса полигетероариленов. Данный полимер является диэлектриком с шириной запрещенной зоны ~4.2 эВ. Эти полимеры обладают высокой термо-, тепло- и хемостойкостью в сочетании с прекрасной растворимостью в органических растворителях.

Образец закреплялся на специальной приставке, которая обеспечивала надежную фиксацию образца между полюсами магнита и подвод электродов. Приставка также содержала специальное устройство, позволяющее регулировать одноосное давление, оказываемое на образец.

Экспериментальные результаты. На рис. 1 представлена зависимость сопротивления структуры Ni/ПДФ/Cu от величины внешнего магнитного поля. Явление MC проявляется в том, что при достижении магнитным полем оп-

ределенной величины $H_{пор}$ происходит значительное уменьшение сопротивления от 100 до 10 Ом (рис. 1). Явление обратимо и при уменьшении магнитного поля до нуля сопротивление образца возвращалось в начальное состояние. Был обнаружен гистерезис $H_{гист}$, приводящий к тому, что восстановление исходного сопротивления происходило при значениях магнитного поля, меньших $H_{пор}$ на 20 мТл. Для разных образцов, отличавшихся условиями приготовления и толщиной полимерного слоя, характерные величины магнитного поля, индуцирующего значительные изменения сопротивления экспериментальной структуры $H_{пор}$, относительно невелики и регистрировались в интервале от 50 до 180 мТл.

Предварительно давлением задавалось начальное состояние проводимости структуры: проводник или изолятор. Таким образом, в одной и той же экспериментальной структуре можно было наблюдать два вида MC – с положительным и отрицательным коэффициентом магнетосопротивления. Это зависело от того, в каком начальном (при $H = 0$) по проводимости состоянии находилась полимерная пленка. Если пленка имела большое сопротивление ($R \sim 10^8$ Ом), то регистрировался положительный коэффициент MC. Если пленка находилась в состоянии с малым сопротивлением ($R \sim 10$ Ом), – отрицательный коэффициент MC. Магнитное поле было направлено перпендикулярно поверхности образца.

Оценка коэффициента магнетосопротивления, проведенная по формуле:

$$K_{ОМС} = (R_{max} - R_{min}) / R_{max} * 100\%, \quad (1)$$

даёт значение ~100%.

В работах [1, 2, 6, 7, 10] использовалось другое соотношение для коэффициента магнетосопротивления:

$$K_{ОМС} = (R_{min} - R_{max}) * 100\%, \quad (2)$$

что даёт значение ~10%. В аналогичных работах максимальное значение коэффициента магнетосопротивления было до 30%.

Исследование роли магнитострикционных деформаций в ферромагнитном электроде было проведено путем прямого измерения магнитострикции экспериментальной структуры Ni/ПДФ/Cu. Для регистрации деформаций был использован полупроводниковый линейный тензорезистор из сульфида самария серии SmS-O-VЛ. Измерения проводились мостовым методом. Тензорезистор наклеивался на свободную от полимерного слоя часть ферромагнитной подложки. Результаты измерений представлены на рис. 2.

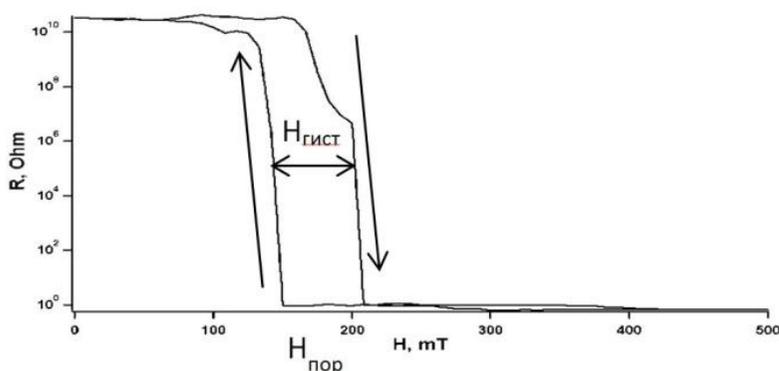


Рис. 1. Зависимость тока, протекающего через образец Ni/ПДФ/Си от внешнего магнитного поля. Стрелками указано направление изменения магнитного поля. $T = 300$ К. На рис. указан гистерезис $H_{\text{гист}}$ и $H_{\text{пор}}$

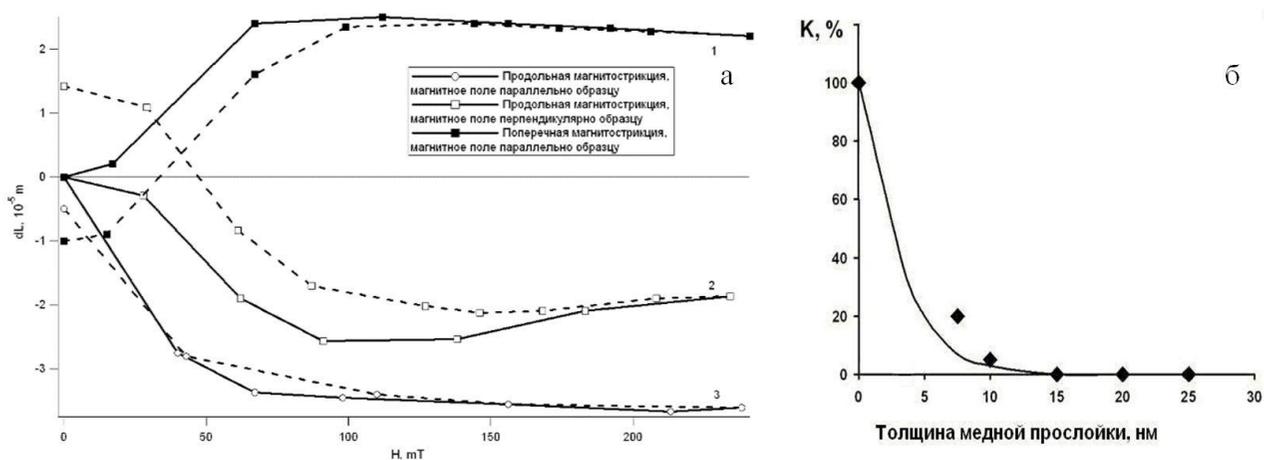


Рис. 2: *a* – график магнитострикции образца Ni/ПДФ/Си. Зависимость линейной деформации от магнитного поля. Сплошные и прерывистые линии обозначают прямой и обратный ход магнитного поля соответственно; *б* – зависимость коэффициента магнетосопротивления от толщины медной прослойки в структуре Ni/Cu(прослойка)/ПДФ/Си

Значение сигнала с измерительного моста фиксировалось при непрерывном возрастании внешнего магнитного поля и последующем его убывании. Продольная магнитострикция (магнитное поле направлено вдоль линейного тензорезистора) в плоскости образца (рис. 2, *a*) является отрицательной и сравнимой по величине с известными данными [11]. Выход кривых на насыщение происходит при достижении внешним магнитным полем значения около 50 мТ. При ориентации внешнего магнитного поля в плоскости пластины–подложки перпендикулярно линейному тензорезистору магнитострикция положительна, что также типично для таких измерений. Выход кривых на насыщение при значении внешнего магнитного поля составляет около 70 мТ. При направлении внешнего магнитного поля перпендикулярно плоскости пластины–

подложки магнитострикция отрицательна. Выход на насыщение также при $B = 70$ мТ. Анализ кривых показывает, что область изменения деформаций ферромагнетика, вызванная магнитострикцией, ограничена магнитными полями, величина которых значительно меньше тех, при которых регистрируется МС.

Если предположить, что спиновое упорядочение электронов является важным фактором в явлении ОМС, то, уменьшая степень поляризации, можно влиять на величину эффекта вплоть до полного его исчезновения. Для целенаправленного разрушения спинового упорядочения в структуре Ni/ПДФ/Си между ферромагнетиком и полимерным слоем дополнительно вводился тонкий слой меди – металла с малой длиной спиновой когерентности электронов.

На рис. 2, б представлена зависимость коэффициента МС от толщины медной пленки Cu в системе Ni/Cu/ПДФ/Cu. Наличие медной прослойки Cu приводит к значительному уменьшению коэффициента МС, и при толщине более 12 нм эффект исчезает. При толщине слоя меди 8–10 нм регистрируется влияние магнитного поля. При дальнейшем уменьшении толщины промежуточного слоя меди наблюдается тенденция к увеличению коэффициента МС. Из результатов проведенных экспериментов можно сделать вывод о важной роли спиновой поляризации электронов в реализации эффекта инжекционного огромного магнетосопротивления.

Для исследования влияния материала электродов на эффект магнетосопротивления были изготовлены образцы следующей структуры: Ni/ПДФ/Al и Ru/ПДФ/Al (Ru – пермаллой). Были измерены зависимости сопротивления этих структур от магнитного поля (рис. 3).

На структуре Ni/ПДФ/Al был получен эффект магнетосопротивления. Первоначальное со-

стояние образца являлось низкопроводящим. Сопротивление было порядка 10^8 Ом и не менялось при изменении магнитного поля вплоть до 400 мТл. При достижении этого значения магнитного поля происходил резкий переход проводимости экспериментальной структуры в высокопроводящее состояние с сопротивлением порядка 10 Ом. От ранее наблюдавшихся эффектов МС (рис. 1) данный отличался реализацией бистабильного переключения, то есть необратимостью. При начальном высокопроводящем состоянии образца происходило переключение в низкопроводящее состояние при 250 мТл. То есть знак коэффициента магнетосопротивления определялся сопротивлением начального состояния. При низкопроводящем начальном состоянии образца наблюдался эффект с положительным коэффициентом МС, а при высокопроводящем – с отрицательным. При замене обоих электродов на пермаллой и алюминий эффект МС не отличался своими характеристиками от первоначального результата на структуре Ni/ПДФ/Cu.

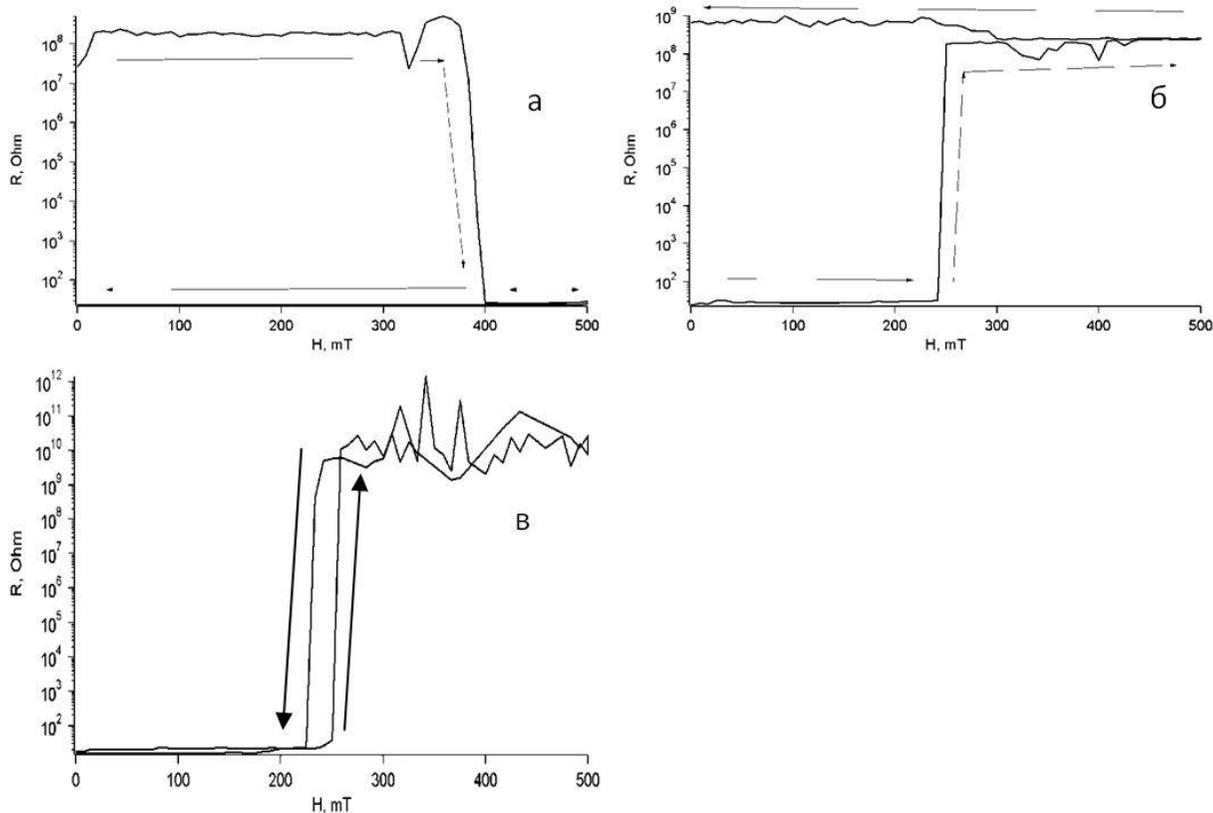


Рис. 3: а – зависимость сопротивления пленочного образца Ni/ПДФ/Al от внешнего магнитного поля. Стрелками указано направление изменения магнитного поля. Положительный коэффициент магнетосопротивления; б – зависимость сопротивления пленочного образца Ni/ПДФ/Al от внешнего магнитного поля. Стрелками указано направление изменения магнитного поля. Отрицательный коэффициент магнетосопротивления; в – зависимость сопротивления пленочного образца Ru/ПДФ/Al от внешнего магнитного поля. Стрелками указано направление изменения магнитного поля

Таким образом, установлено, что смена материалов электродов в экспериментальной структуре ферромагнетик/полидифениленфталид/немагнитный металл приводит к изменению типа наблюдаемого эффекта магнетосопротивления. Если разница работ выхода материалов электродов небольшая (~ 0.1 эВ), то наблюдается моностабильное переключение проводимости. Если такая разница порядка 1 эВ, то наблюдается бистабильное переключение проводимости.

Для исследования влияния толщины транспортного слоя на параметры магнетосопротивления были изготовлены образцы с пленками полимера, полученными из растворов с различной концентрацией полимера (1, 2.5, 5, 7.5 и 10%). Было установлено, что образцы, изготовленные из 10%-го раствора полимера, не проявляют магниторезистивных свойств. Скорей всего, это обусловлено тем, что полимерная пленка обладает толщиной больше некой критической, при превышении которой эффекты электронного переключения не наблюдаются [9].

Обсуждение модели. Для выяснения механизма переноса зарядов в работе были исследованы вольтамперные характеристики при различных значениях внешнего магнитного поля. На рис. 4 представлены результаты измерения ВАХ для образцов с массивным ферромагнитным электродом. До некоего порогового значения напряжения $U_{\text{пор}}$ ток, протекающий через экспериментальную структуру, слабо зависит от прикладываемого напряжения. При достижении $U_{\text{пор}}$ происходит смена характера этой зависимости: влияние прикладываемого напряжения резко возрастает. Кривые, соответствующие различным значениям внешнего магнитного поля имеют разные значения $U_{\text{пор}}$. При этом при увеличении магнитного поля значение $U_{\text{пор}}$ уменьшается. Была установлена асимметричность сигнала относительно направления тока, протекающего через экспериментальную структуру. При отрицательном направлении тока зависимость $U_{\text{пор}}$ от магнитного поля меняется в меньших пределах, чем при положительном.

На рис. 5 представлены результаты измерения ВАХ для образцов с пленочным ферромагнитным электродом. Графики построены с учетом компенсации контактной разности потенциалов. На графиках приведены ВАХи только низкопроводящего состояния образца. Даль-

нейшее увеличение магнитного поля приводило к переходу образца в высокопроводящее состояние. Вольтамперные характеристики принимали линейный вид. При положительном направлении магнитного поля влияние его величины не было установлено. Зависимость тока от приложенного напряжения более ярко выражена при отрицательной полярности напряжения. При положительной полярности электрического поля ток возрастает медленнее, чем при отрицательной. При отрицательном направлении магнитного поля влияние его величины более сильно выражено и заключается в увеличении проводимости структуры при увеличении магнитного поля.

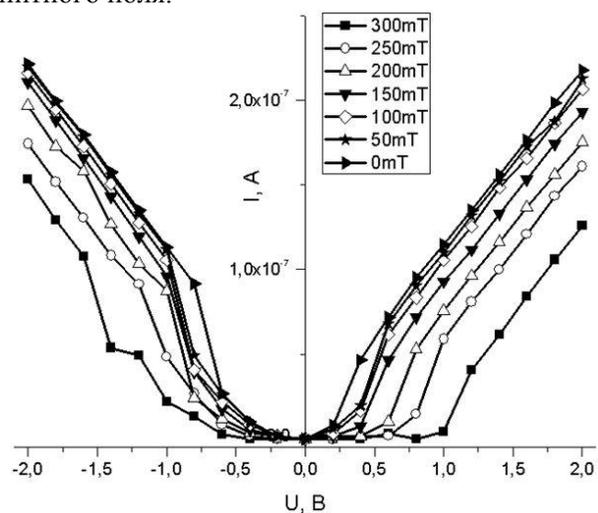


Рис. 4. Вольтамперные характеристики образца Ni(массив)/ПДФ/Си в различном магнитном поле

ВАХ являются нелинейными вида $I \sim kU^n$. При малых напряжениях $n = 1$, при больших $n > 1$. При наличии магнитного поля регистрируется эффект с отрицательным коэффициентом магнетосопротивления.

Максимальная величина коэффициента МС достигает 48%. Анализ представленных на рисунке ВАХ позволяет прийти к заключению, что в структуре МПН перенос носителей заряда ограничен объемным зарядом. Потому для анализа механизма переноса носителей заряда в зависимости от внешних условий была использована модель инжекционных токов [12].

При отсутствии магнитного поля сверхлинейный участок ВАХ возникает при минимальных напряжениях. Это свидетельствует о близости на контакте квазиуровня Ферми металла и области ловушек в полимерной пленке, по которой происходит транспорт носителей заряда в полимере.

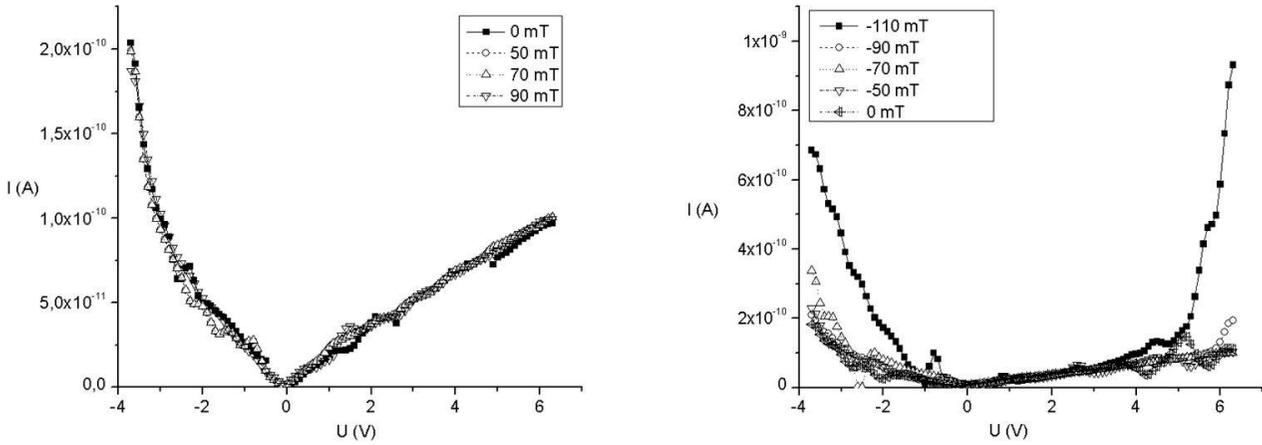


Рис. 5. Вольтамперные характеристики пленочного образца Ni/ПДФ/Си в различном магнитном поле. Положительное (слева) и отрицательное (справа) направление магнитного поля

Согласно теории токов, ограниченных объемным зарядом, вольтамперные характеристики на начальном участке описывается известным соотношением:

$$J_1 = en_0\mu U / L. \quad (3)$$

где J – плотность тока, L – расстояние между электродами, U – приложенное напряжение ($U < U_t$, где U_t – напряжение перехода от линейного к сверхлинейному участку), n_0 – равновесная концентрация носителей заряда, μ – подвижность носителей заряда.

После достижения U_t на сверхлинейном участке ВАХ описывается другим соотношением:

$$J_2 = e\mu U_t^2 / L^3. \quad (4)$$

Анализ ВАХ позволяет оценить изменение высоты потенциального барьера на контакте металл-интерфейс в отсутствии внешнего электрического поля ϕ_{B0} , используя известное соотношение [13]:

$$\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_s} \right), \quad (5)$$

где T – температура, k – постоянная Больцмана, q – заряд электрона, A – площадь контакта, A^* – постоянная Ричардсона, I_s – ток насыщения. Ток насыщения получают из пересечения линейной аппроксимации ВАХ в полулогарифмических координатах ($\ln(I)-V$) с осью $V=0$.

Таким образом, изменение высоты потенциального барьера для образцов с массивными ферромагнитными электродами при напряжении 1 В $\phi_{\max} - \phi_0 = 0.086$ эВ. А при напряжении 2 В составляет $\phi_{\max} - \phi_0 = 0,014$ эВ. При -1 В – 0.042 эВ, при -2 В – 0.010 эВ.

В образцах с пленочным ферромагнитными электродами при напряжении $U = 5$ В изменение высоты барьера составило $\Delta\phi = 0.055$ эВ

при возрастании магнитного поля от 0 до 110 мТл (при отрицательном направлении магнитного поля).

Полимер в низкопроводящем состоянии представляет собой диэлектрик, где есть заполненная валентная зона, широкая запрещенная зона и пустая зона проводимости (рис. 6). Предыдущие исследования показали, что в запрещенной зоне возле уровня Ферми находится группа ловушек, которая образует узкую проводящую зону. Магнитное поле способно изменить положение этой зоны относительно уровня вакуума. В многослойной структуре типа металл/полимер/металл сдвиг этой зоны приводит к изменению проводимости всей структуры. Это происходит из-за изменения условий инжекции на потенциальном барьере металл/полимер.

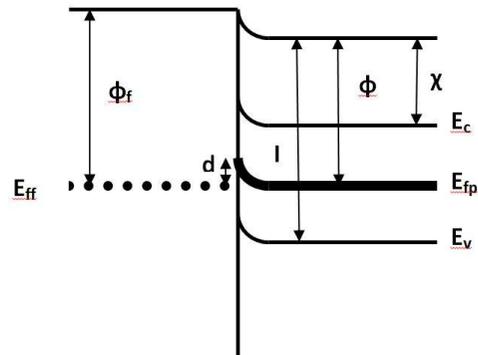


Рис. 6. Зонная диаграмма контакта ферромагнетик/полимер: E_{ff} – уровень Ферми ферромагнетика; E_{fp} – уровень Ферми полимера; ϕ_f – работа выхода ферромагнетика; ϕ_p – работа выхода полимера; χ – энергия электронного средства полимера; I – энергия ионизации полимера; E_c – дно зоны проводимости полимера; E_v – потолок валентной зоны полимера; d – высота потенциального барьера на границе ферромагнетик/полимер

Когда внешнее магнитное поле возрастает, разрешенные электронные состояния ферромагнетика подтягиваются к узкой зоне в полимере, и происходит скачкообразный переход в высокопроводящее состояние. Бистабильное переключение, обнаруженное в экспериментах, представленных на рис. 3, позволяет сделать предположение о возможном влиянии на него поверхностных электронных состояний на контактах полимера с различными металлами. Если плотность ловушек вблизи уровня Ферми достаточно велика, рассмотренный механизм приводит к практически полному восстановлению начального изгиба зон, и высота барьера Шоттки остается неизменной. Такая ситуация характерна для многих поверхностей и границ раздела и обычно обозначается термином «пиннинг» (закрепление) уровня Ферми [14].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в случае структуры Ni/ПДФ/Al на контакте ПДФ/Al происходит закрепление уровня Ферми (пиннинг) при магнеторезистивном переключении. Это закрепление препятствует обратному переключению проводимости структуры в начальное состояние. Фактором, подтверждающим этот вывод, является то, что работа выхода полимера выше, чем работа выхода алюминиевого контакта. В случае структуры Ru/ПДФ/Al разница между работами выхода пермаллоя и алюминия меньше чем у пары электродов никель–алюминий. Из-за этого обратный процесс переключения происходит легче, так как величина изменения, на которую необходимо изменить высоту барьера для возврата в начальное состояние, меньше.

Изменение угла наклона ВАХ происходит, когда концентрация инжектированных носителей начинает превышать концентрацию собственных. По положению данной точки на ВАХ можно провести оценку равновесной концентрации собственных основных носителей заряда, а также значения максимально возможной подвижности носителей заряда. Равновесная концентрация находилась из условия равенства токов в точке перегиба при U_r .

Таким образом, получаем выражение для концентрации:

$$n_0 = \varepsilon\varepsilon_0 U^n / eL^2. \quad (6)$$

Подвижность носителей рассчитывалась по следующей формуле:

$$\mu = JL^3 / \varepsilon\varepsilon_0 U_t^2, \quad (7)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость полимера, ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Оценки подвижностей по формуле 7 показали, что с увеличением магнитного поля подвижность носителей заряда уменьшается. Эта зависимость представлена на рис. 7. Максимальное значение подвижности зафиксировано при положительной полярности тока и составило $8.2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

В работе [15] утверждается, что в несопряженных полимерах можно наблюдать огромное магнетосопротивление, характеризующееся изменением подвижности носителей заряда в магнитном поле. Причем изменение может составить один порядок при изменении напряженности магнитного поля в тех же пределах, что и в настоящей статье. Согласно данным, приведенным на рис. 7, относительное изменение подвижности носителей заряда составило – 46%.

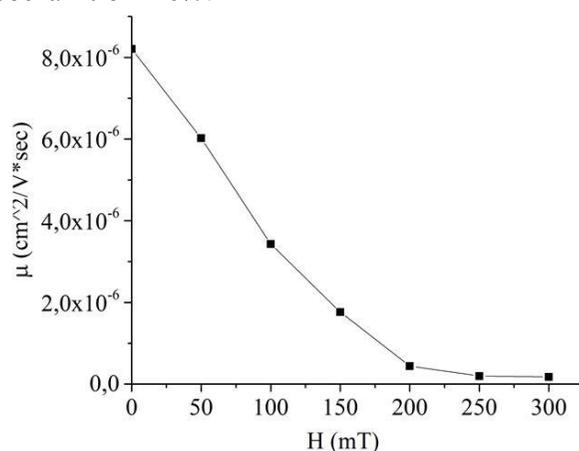


Рис. 7. Зависимость значения подвижности носителей заряда от внешнего магнитного поля

Оценка изменения концентрации собственных носителей заряда при воздействии магнитного поля показала, что влияние магнитного поля незначительно. Это может говорить о том, что, согласно этой модели, период допирования является минимально возможным, то есть все примесные (в терминах этой модели) состояния являются ионизированными.

Таким образом, установлено, что полимер полидифениленфталид по основным признакам хорошо соответствует структуре гипотетического полимерного материала, описанного в работе [15], как наиболее подходящего с точки зрения реализации эффекта огромного магнетосопротивления по предложенному механизму. Квантово-механические расчеты показывают [13], что при инжектировании носителей заряда и их последующего взаимодействия с фталидной группировкой молекулы полимера

возникают электронные ловушечные состояния с уровнем значительно ниже уровня LUMO, что можно рассматривать в терминах этой модели как электронные состояния гостя. Это подобно процессу самодопирования, когда допированное состояние формируется за счет взаимодействия отдельных фрагментов макромолекулы с зарядом, инжектированным в объем полимера. Полидифениленфталид обладает протяженной структурой и содержит большое количество боковых фрагментов, что позволяет говорить об одномерном характере протекания тока вдоль полимерной цепи. Он также содержит фталидные группировки, что способствует уменьшению частоты прыжка между соседними мономерами.

Выводы. Основываясь на вышеприведенных экспериментальных данных и расчетах, можно утверждать, что наблюдаемый эффект магнетосопротивления может быть обусловлен двумя механизмами.

Первый – это изменение параметров потенциального барьера на контакте ферромагнетик/полимер. При увеличении магнитного поля происходит расщепление состояний на уровне Ферми. Тем самым происходит уменьшение потенциального барьера для инжекции электронов с одним из направлений спиновой поляризации.

Второй – это изменение концентрации носителей заряда. Результат исследования влияния магнитного поля на подвижность носителей заряда (а также то, что величина относительно изменения составила 46%) совпадает с предсказанной в [15] зависимостью и позволяет с большой долей вероятности утверждать, что предсказанный эффект огромного магнетосопротивления может реализоваться в структурах на основе полимерного материала полидифениленфталида. Незначительное влияние магнитного поля на концентрацию носителей заряда говорит о том, что перенос заряда осуществляется с минимально возможным периодом допирования.

Работа выполнена при поддержке проекта «Зеркальные лаборатории» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы.

Литература

1. Dediu V.A. Room temperature spin polarized injection in organic semiconductor / V.A. Dediu, M. Murgia, F.C. Matocotta, C. Taliani, S. Barbanera // *Solid State Commun.* 2002. V. 122. P. 181–184.
2. Xiong Z.H. Giant magnetoresistance in organic spin-valves / Z.H. Xiong, D. Wu, Z.V. Vardeny, J. Shi // *Nature.* 2004. V. 427. P. 821–824.
3. Arisi E. Organic light emitting diodes with spin polarized electrodes / E. Arisi, I. Bergenti, V. Dediu, M.A. Loi, M. Muccini, M. Murgia, G. Ruani, C. Taliani, R. Zamboni // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 93. P. 7682–7683.
4. Baibich M.N. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices / M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F.N. Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V. 61. P. 2472–2475.
5. De Teresa J.M. Inverse tunnel magnetoresistance in Co/SrTiO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃: New ideas on spin-polarised tunnelling / J.M. De Teresa, A. Barthélémy, A. Fert, J. P. Contour, R. Lyonnet, F. Montaigne, P. Seneor, A. Vaurès // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 82. P. 4288–4291.
6. Francis T.L. Large magnetoresistance at room temperature in semiconducting polymer sandwich devices / T.L. Francis, O. Mermer, G. Veeraraghavan, M. Wohlgenannt // *New J. Phys.* 2004 V. 6. P. 185. DOI: 10.1088/1367-2630/6/1/185/
7. Grunewald M. Tunneling anisotropic magnetoresistance in organic spin valves / M. Grunewald, M. Wahler, M. Michelfeit, C. Gould, R. Schmidt, P. Graziosi, A. Dediu, F. Wurthner, G. Schmidt, L.W. Molenkamp // *arXiv:0905.4573v1 [cond-mat.mtrl-sci]*.
8. Лачинов А.Н. Электроника тонких слоев широкозонных полимеров / А.Н. Лачинов, Н.В. Воробьева // *УФН.* 2006. Т. 176. №. 12. С. 1249–1266.
9. Лачинов А.Н. Аномальная электронная неустойчивость полимеров при одноосном давлении / А.Н. Лачинов, А.Ю. Жеребов, В.М. Корнилов // *Письма в ЖЭТФ.* 1990. Т. 52 (2). С. 742.
10. Gould C. Tunneling anisotropic magnetoresistance: A spin-valve-like tunnel magnetoresistance using a single magnetic layer / C. Gould, C. Ruster, T. Jungwirth, E. Girgis, G.M. Schott, R. Giraud, K. Brunner, G. Schmidt, L.W. Molenkamp // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 93. P. 117–203.
11. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 920 с.
12. Поуп М., Свенберг Ч. Электронные процессы в органических кристаллах. М.: Мир, 1985. 544 с.
13. Johansson N. A theoretical study of the chemical structure of the non-conjugated polymer poly(3,3'-phtalidylidene-4,4'-biphenylene) / N. Johansson, A.N. Lachinov, S. Stafstrom, T. Kugler, W.R. Salaneck // *Synthetic Metals.* 1994. № 67. P. 319–322.
14. Sze S.M. Physics of semiconductor devices. Wiley-Interscience. 1981. 868 p.

15. Kersten S.P., Meskers S.C.J., Bobbert P.A. Route towards huge magnetoresistance in doped polymers. *Phys. Rev.* 2012. V. 86. P. 1–6.

References

1. Dediu V.A., Murgia M., Maticotta F.C., Taliani C., Barbanera S. Room temperature spin polarized injection in organic semiconductor. *Solid State Commun.*, 2002, V. 122. P. 181–184.

2. Xiong Z.H., Wu D., Vardeny Z.V., Shi J. Giant magnetoresistance in organic spin-valves. *Nature*, 2004, vol. 427, pp. 821–824.

3. Arisi E., Bergenti I., Dediu V., Loi M.A., Muccini M., Murgia M., Ruani G., Taliani C., Zamboni R. Organic light emitting diodes with spin polarized electrodes. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, pp. 7682–7683.

4. Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Van Dau F.N., Petroff F., Eitenne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, vol. 61, pp. 2472–2475.

5. De Teresa J.M., Barthélémy A., Fert A., Contour J.P., Lyonnet R., Montaigne F., Seneor P., Vaurès A. Inverse tunnel magnetoresistance in Co/SrTiO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃: New ideas on spin-polarised tunnelling. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, vol. 82, pp. 4288–4291.

6. Francis T.L., Mermer O., Veeraghavan G., Wohlgenannt M. Large magnetoresistance at room temperature in semiconducting polymer sandwich devices. *New J. Phys.*, 2004, vol. 6, p. 185. DOI: 10.1088/1367-2630/6/1/185/

7. Grunewald M., Wahler M., Michelfeit M., Gould C., Schmidt R., Graziosi P., Dediu A., Wurthner F., Schmidt G., Molenkamp L.W. Tunneling anisotropic magnetoresistance in organic spin valves. arXiv:0905.4573v1 [cond-mat.mtrl-sci].

8. Lachinov A.N., Vorobyeva N.V. Electronics of thin layers of wide-band polymers. *Physics-Uspekhi*, 2006, vol. 176, no. 12, pp. 1249–1266.

9. Lachinov A.N., Zhrebov A.Yu., Kornilov V.M. Anomalous electron instability of polymers due to uniaxial pressure. *JETP Lett.*, 1990, vol. 52 (2), p. 103.

10. Gould C., Ruster C., Jungwirth T., Girgis E., Schott G.M., Giraud R., Brunner K., Schmidt G., Molenkamp L.W. Tunneling anisotropic magnetoresistance: A spin-valve-like tunnel magnetoresistance using a single magnetic layer. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, vol. 93, pp. 117–203.

11. Vonsovsky S.V. *Magnetism*. Moscow, Nauka, 1971. 920 p.

12. Pope M., Swenberg C. *Electronic processes in organic crystals*. Russian edition. Moscow, Mir, 1985. 544 p.

13. Johansson N., Lachinov A.N., Stafstrom S., Kugler T., Salaneck W.R. A theoretical study of the chemical structure of the non-conjugated polymer poly(3,3'-phtalidyldiene-4,4'-biphenylene). *Synthetic Metals*, 1994, no. 67, pp. 319–322.

14. Sze S.M. *Physics of semiconductor devices*. Wiley-Interscience, 1981. 868 p.

15. Kersten S.P., Meskers S.C.J., Bobbert P.A. Route towards huge magnetoresistance in doped polymers. *Phys. Rev.*, 2012, vol. 86, pp. 1–6.



HUGE MAGNETORESISTANCE IN NONCONJUGATED POLYMERS

© A.A. Lachinov, N.V. Vorobyeva

Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre,
Russian Academy of Sciences,
151, prospect Oktyabrya, 450075, Ufa, Russian Federation

There are several publications about magnetoresistance in conjugated organic materials. But its results do not meet the requirements of practical approach due to small magnitude of the magnetoresistance coefficient. This article is an overview of the investigation of huge magnetoresistance in the structure of ferromagnetic / non-conjugated polymer / nonmagnetic metal. The maximum value of the magnetoresistance coefficient was 10^7 %. Consideration is given to the influences of magnetostriction, thickness of the polymer film and electrode material on the huge magnetoresistance. Charge transfer is considered from the standpoint of the injection model. It is revealed that there are two mechanisms of conductivity changing in the ferromagnetic / non-conjugated polymer / nonmagnetic metal structure due to the magnetic field: changing potential barrier at the ferromagnetic / polymer interface and changing charge mobility in the narrow conductivity sub-band of the polymer.

Key words: spintronics, huge magnetoresistance, polymers.