

Ферромагнитный резонанс в микроконтактах медь–пермаллой

О.П. Балкашин, В.В. Фисун, И.А. Коровкин

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: Balkashin@ilt.kharkov.ua*

V. Korenivski

Nanostructure Physics, Royal Institute of Technology, Stockholm 10691, Sweden

Статья поступила в редакцию 16 июня 2014 г., опубликована онлайн 21 августа 2014 г.

Выполнены систематические исследования сигнала отклика точечных микроконтактов медь–пермаллой ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) на микроволновое облучение (8–12 ГГц). Изучено влияние на измеряемый сигнал напряженности внешнего магнитного поля, транспортного тока, текущего через контакт, интенсивности и частоты ВЧ облучения. Проанализированы вклады в электросопротивление контактов от эффектов гигантского и анизотропного магнитосопротивления. Экспериментально установлено, что положение резонансных особенностей хорошо совпадает с расчетом по формуле Киттеля для ФМР в пленке в параллельном магнитном поле. Резонансный сигнал наблюдался на фоне дополнительного вклада, обусловленного выпрямлением ВЧ тока на нелинейной вольт-амперной характеристике контакта. Обнаружены два механизма появления резонансного отклика: синхронное самодетектирование от смещения ВЧ тока с временными вариациями сопротивления и болометрический отклик, связанный со стационарным изменением сопротивления контакта при возбуждении прецессии намагниченности. Установлено, что амплитуда резонансного сигнала линейно пропорциональна величине транспортного тока через контакт и интенсивности микроволнового облучения.

Виконано систематичні дослідження сигналу відгуку точкових мікроконтактів мідь–пермаллой ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) на мікрохвильове опромінення (8–12 ГГц). Вивчено вплив на вимірюваний сигнал напруженості зовнішнього магнітного поля, транспортного струму через контакт, інтенсивності та частоти ВЧ опромінення. Проаналізовано вклади в електроопір контактів від ефектів гігантського та анізотропного магнітоопору. Експериментально встановлено, що положення резонансних особливостей добре збігається з розрахунком за формулою Киттеля для ФМР в плівці в паралельному магнітному полі. Резонансний сигнал спостерігався на фоні додаткового вкладу, обумовленого випрямленням ВЧ струму на нелінійній вольт-амперній характеристиці контакту. Виявлено два механізми появи резонансного відгуку: синхронне самодетектування від змішування ВЧ струму з варіаціями опору від часу і болометричний відгук, пов'язаний зі стаціонарною зміною опору контакту при збудженні прецесії намагніченості. Встановлено, що амплітуда резонансного сигналу лінійно пропорційна величині транспортного струму через контакт та інтенсивності мікрохвильового опромінення.

PACS: **72.25.–b** Спин-поляризованный транспорт;
75.75.–c Магнитные свойства наноструктур;
85.75.–d Магнитоэлектроника, спинтроника;
76.50.+g Ферромагнитный резонанс.

Ключевые слова: микроконтакт, передача спинового момента, спиновый вентиль, анизотропное магнитосопротивление, микроволновое облучение.

Введение

Ферромагнитный резонанс (ФМР) в настоящее время — хорошо известный стандартный спектроскопический метод исследования в физике твердого тела. Он позволяет определять поля магнитной анизотропии и спектроскопический фактор Ланде g ферромагнетиков. По ширине резонансной линии можно получать информацию о характерных процессах релаксации и устанавливать характеристические частоты таких процессов [1].

В последнее время весьма интенсивно и успешно используется процесс передачи вращательного момента спинами электронов проводимости [2,3] для манипуляции ориентацией намагниченности устройств с микроскопическими размерами, таких как спиновые вентили, электропроводность которых варьируется за счет эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС). Этот эффект интересен также тем, что он может быть использован для генерации различных динамических процессов намагниченности [4,5], которые интенсивно исследуются с целью создания наноразмерных микроволновых генераторов, детекторов, смесителей и других высокочастотных устройств для коммуникаций и компьютерной техники. Исследования спин-электрических эффектов привели к появлению нового направления в современной экспериментальной физике твердого тела — спинтронике. В частности, удалось реализовать новый эффективный метод ФМ резонанса [6–8] для исследования ферромагнетиков очень малых объемов. В традиционном методе ФМР возбуждение магнитодинамики осуществляется с помощью микроволнового поля, которое создает вращающий момент, действующий на магнитные моменты магнетика. В спиновых вентилях вращающий момент образуется под влиянием потока поляризованных по спину электронов при протекании электрического тока гигантской плотности поперек трехслойной наносистемы F_1-N-F_2 . Когда высокочастотная компонента тока имеет компоненту, совпадающую с частотой однородной прецессии намагниченности, происходит резонансное возбуждение амплитуды этой прецессии, т.е. реализуются условия ФМР.

В отличие от стандартного ФМ резонанса, при исследованиях которого измеряют амплитуду микроволнового сигнала, отраженного или прошедшего через образец, при исследованиях резонанса в спиновом вентиле сам вентиль является детектором, так как прецессия намагниченности вызывает изменение его электросопротивления и появление на нем постоянного напряжения. Поэтому образец для исследований в этом случае может иметь существенно меньшие — наноскопические геометрические размеры.

В данной работе выполнены исследования ФМР в микроконтактах ферромагнетик–немагнитный металл

(F–N). Были использованы два способа резонансного возбуждения прецессии намагниченности: с помощью высокочастотного магнитного поля и высокочастотного тока. Регистрация резонанса осуществлялась по изменению сопротивления микроконтакта как за счет эффекта гигантского магнитосопротивления в спиновом вентиле, так и анизотропного магнитосопротивления (АМС) ферромагнитной пленки.

Механизмы отклика F–N микроконтактов в условиях ФМР

В наших исследованиях F–N микроконтактов было доказано, что в таких контактах за счет специфических свойств поверхности ферромагнетика может реализовываться структура F_1-N-F_2 , в которой роль второй магнитной пленки играет магнитный кластер, образующийся в месте касания немагнитной иглы поверхности ферромагнитной пленки [9,10]. Подобные поверхностные спиновые вентили обладают всеми статическими и динамическими магнитными свойствами, присущими традиционным F_1-N-F_2 структурам [9–11].

Как хорошо известно [4], электрическое сопротивление спинового вентиля за счет эффекта гигантского магнитосопротивления [12] зависит от угла взаимной ориентации магнитных моментов ферромагнитных пленок, образующих такую структуру (рис. 1(а), (в)). При возбуждении внешним микроволновым полем прецессии намагниченности в одной из пленок сопротивление структуры будет зависеть от времени следующим образом (см., например, [13]):

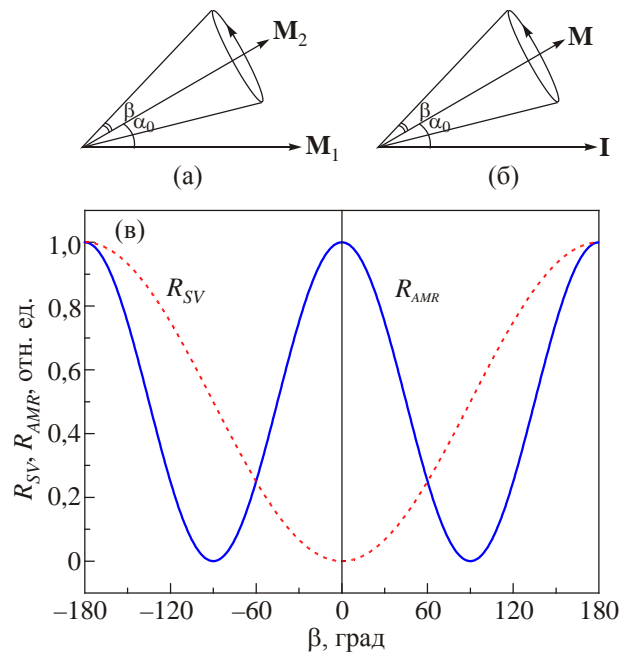


Рис. 1. (Онлайн в цвете) Схемы прецессии намагниченности в спиновом вентиле (а) и одиночной пленке ферромагнетика (б) и зависимости магнитосопротивления вентиля R_{SV} и пленки R_{AMR} от угла прецессии β при $\alpha_0 = 0$ (в).

$$R_{SV}(t) = R_0 + R_{SV} [1 - \cos \beta(t)] / 2, \quad (1)$$

где декремент сопротивления вентилля определяется разностью сопротивлений структуры при антипараллельной и параллельной ориентациях намагниченностей $R_{SV} = R_{\downarrow} - R_{\uparrow}$. В условиях ФМ резонанса зависимость сопротивления от времени будет определяться частотой однородной прецессии намагниченности. Тогда при микроволновом облучении $I_{rf} = I_1 \sin \omega t$ на вентилле в соответствии с законом Ома возникнет напряжение $V(t) = I(t)R(t)$, при этом зависящее от времени сопротивление $R(t) = R^0 + R_1 \sin(\omega t + \delta)$ осциллирует с частотой ВЧ облучения $\omega = 2\pi f$ и сдвинуто по фазе на величину δ относительно возбуждающего тока I_{rf} .

Учитывая синфазность ВЧ тока накачки и осциллирующий электросопротивления, вызванных этой накачкой, следует ожидать появления на вентилле постоянного напряжения $V_{d1} = \langle I_{rf}(t)R_{SV}(t) \rangle \neq 0$, амплитуда которого определяется разностью фаз δ (рис. 2 (а)). Возникновение этого сигнала связано с нелинейностью зависимости $R(\beta)$, и для симметричных колебаний \mathbf{M}_2 относительно \mathbf{M}_1 (угол $\alpha_0 = 0$) значения напряжения в различные полупериоды тока накачки будут иметь разные знаки и в точности компенсировать друг друга, давая в среднем нулевое значение постоянного напряжения на вентилле (рис. 3(а)). В случае, когда $\alpha_0 \neq 0$, за счет синхронного самодетектирования ФМР на магнитной структуре появится постоянное напряжение

$$V_{d1} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_1 R_{SV} \cos \delta. \quad (2)$$

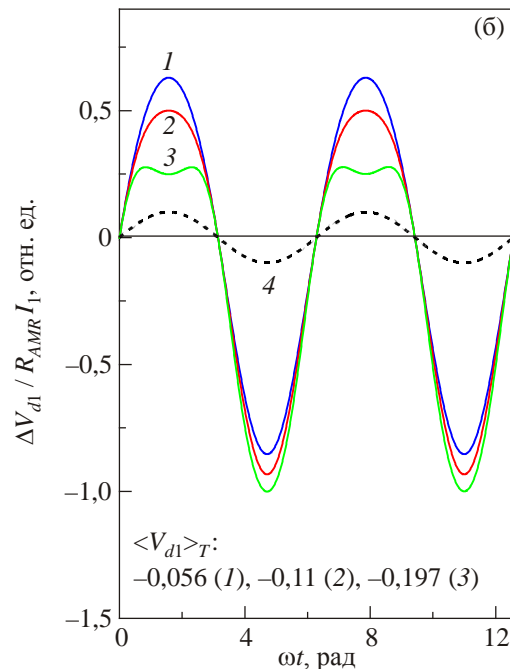
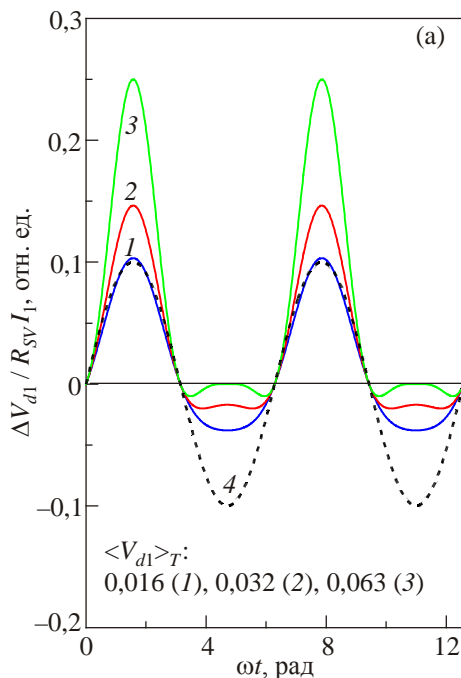


Рис. 2. (Онлайн в цвете) Зависимости от времени напряжения на микроконтакте при возбуждении прецессии намагниченности при наличии поверхностного спинового вентилля (а) и вклада от анизотропного магнитосопротивления (б) для различных углов прецессии β , град: 7,5 (1), 15 (2), 30 (3) при начальном рассогласовании $\alpha_0 = 30^\circ$. Для сравнения пунктирной кривой 4 показаны зависимости тока СВЧ.

Таким образом, постоянный сигнал отклика магнитной структуры на ВЧ облучение возникает при возбуждении стационарной прецессии намагниченности одной из пленок поверхностного спинового вентилля. Это возможно при условии, когда частота СВЧ удовлетворяет условию ферромагнитного резонанса для этой пленки.

Синхронное самодетектирование ФМР возможно и для F–N микроконтактов без поверхностного спинового вентилля за счет анизотропного магнитосопротивления [14], обусловленного анизотропией спин-орбитального взаимодействия в ферромагнитной пленке (см. рис. 1(б),(в)). В этом случае зависимость сопротивления от угла разориентации между направлением тока и вектором намагниченности пленки имеет вид [14]:

$$R_{AMR}(t) = R_0 + R_{AMR} \cos^2 \beta(t), \quad (3)$$

где R_0 — сопротивление при $\beta = \pi/2$, а декремент сопротивления равен $R_{AMR} = R_{\parallel} - R_{\perp}$. При ФМ резонансе на микроконтакте, как и в случае поверхностного спинового вентилля, также возникает постоянный сигнал

$$V_{d1} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_1 R_{AMR} \cos \delta, \quad (4)$$

однако его полярность противоположна полярности резонансного отклика для вентилля (рис. 1(в), 2(б)).

Представленные на рис. 2 зависимости от времени напряжения на микроконтакте рассчитаны с учетом выражений (1), (3) для отклика спинового вентилля (а) и вклада от анизотропного магнитосопротивления (б)

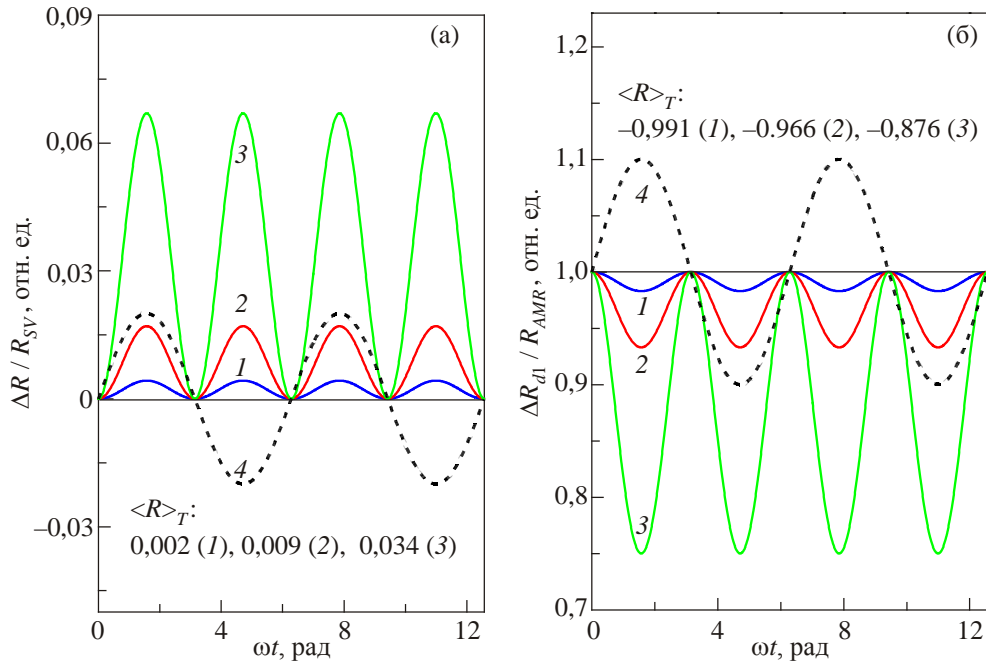


Рис. 3. (Онлайн в цвете) Временные вариации сопротивления микроконтакта при возбуждении прецессии намагниченности при наличии поверхностного спинового вентиля (а) и вклада от анизотропного магнитосопротивления (б) для различных углов прецессии β , град: 7,5 (1), 15 (2), 30 (3) при начальном рассогласовании $\alpha_0 = 0^\circ$. Для сравнения пунктирной кривой 4 показаны зависимости тока СВЧ.

для различных углов прецессии β при постоянном значении угла изначального рассогласования $\alpha_0 = 30^\circ$ (рис. 1 (а),(б)). Расчеты выполнены при отсутствии сдвига фаз между ВЧ током и временными вариациями сопротивления ($\delta = 0$), при этом сигнал резонанса имеет максимальную амплитуду, которая будет постепенно уменьшаться до нуля с ростом разности фаз $\delta \rightarrow \pm \pi/2$. Для наглядности рисунков в расчетах использованы относительно большие углы прецессии, тогда как обычно в экспериментах наблюдается малоугловая прецессия с углами, не превышающими нескольких градусов [7,15].

Обращает на себя внимание асимметричность относительно нулевого значения амплитуд приведенных на рис. 2 зависимостей, которая и приводит к появлению на контакте постоянного во времени напряжения. Усредненные по периоду колебаний относительные значения сигнала отклика V_{d1} , как указано на рис. 2, возрастают с увеличением угла прецессии, причем сигнал для АМС существенно больше. Кроме того, сигналы отклика (усредненные значения напряжения на контакте) имеют разные знаки для спинового вентиля и вклада от АМС.

Указанная выше асимметрия амплитуд сигналов отклика от времени проистекает из асимметрии зависимостей $R_{SV}(\beta)$ и $R_{AMR}(\beta)$ при наличии начального рассогласования по углам $\alpha_0 \neq 0$, т.е. векторы \mathbf{M}_1 , \mathbf{M}_2 и \mathbf{I} не коллинеарны, что приводит к отклонению среднего

по времени направления вектора намагниченности при возбуждении прецессии.

В случае, когда угол рассогласования $\alpha_0 = 0$ (векторы \mathbf{M}_1 , \mathbf{M}_2 и \mathbf{I} коллинеарны) и прецессия вектора намагниченности осуществляется симметрично относительно начального направления, в соответствии с рис. 1 сопротивление контакта будет периодически изменяться со временем. Причем среднее значение сопротивления в условиях прецессии (т.е. при ФМ резонансе) будет возрастать при увеличении угла прецессии для спинового вентиля и уменьшаться для анизотропного магнитосопротивления. Такие вариации сопротивления обуславливают дополнительный вклад в сигнал ФМР

$$V_{d2} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{dc} \langle R_{SV(AMR)} \rangle_T, \quad (5)$$

если через микроконтакт кроме СВЧ тока I_{ac} течет также и постоянный транспортный ток I_{dc} . Рассчитанные зависимости вкладов в сопротивление микроконтакта от времени для поверхностного спинового вентиля и вклада от анизотропного магнитосопротивления приведены на рис. 3. Там же указаны и усредненные по периоду прецессии средние значения сопротивлений $\langle R \rangle_T$. Видно, что напряжения в различные полупериоды тока накачки имеют разные знаки, как уже отмечалось выше.

Таким образом, динамическое поведение электросопротивления микроконтакта в условиях ФМ резонанса приводит к возникновению на контакте двух

кардинально различных вкладов в сигнал ФМР. Первый обусловлен током СВЧ и процессом синхронного самодетектирования резонанса и исчезает в случае симметричной прецессии вектора намагниченности. Второй связан с болометрическим откликом контакта (за счет изменения среднего стационарного значения сопротивления в условиях прецессии намагниченности) на постоянный транспортный ток и реализуется даже при симметричной прецессии намагниченности [15].

Образцы и методика измерений

Все измерения выполнены на микроконтактах в геометрии игла–плоскость. Иглу из медного провода диаметром около 0,2 мм с диаметром острия порядка 1 мкм пропускали через отверстия в противоположных широких стенках зауженной части трехсантиметрового волновода. Пленку или пластинку пермаллой закрепляли на диэлектрическом подвижном держателе вблизи наружной стенки волновода [16]. С помощью специального механизма с дифференциальными винтами можно было плавно регулировать как степень прижима иглы к поверхности пленки, так и перемещать пленку, меняя тем самым место касания иглы (рис. 4). Были исследованы микроконтакты к пластине пермаллой ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) толщиной 1 мм или к пленке пермаллой толщиной 100 и 5–10 нм с металлическим покрытием (Cu, Au) с обеих сторон, напыленных в сверхвысоком вакууме на подложки Si–SiO. Нижний слой (толщиной 100–50 нм) способствовал протеканию тока перпендикулярно поверхности, а верхний (3–5 нм) обеспечивал защиту пленки от окисления в атмосфере. Контакты создавались непосредственно в среде жидкого гелия, и

все измерения выполнены при температуре 4,2 К. Электрическое сопротивление нескольких сотен изученных контактов варьировалось в интервале 5–30 Ом, при этом диаметры контактов составляли, по стандартной оценке, в пределах от двадцати до нескольких нанометров.

Регистрацию зависимостей дифференциального сопротивления наноконтактов от напряжения смещения $dV/dI(V)$ осуществляли по традиционной методике измерения амплитуды первой гармоники низкочастотного (443 Гц) тока модуляции (10–50 мкА) с помощью синхронного детектора. Интервал напряжений смещения $V < 0$ соответствует инжекции электронов из иглы в ферромагнитную пленку. Подложку с пленкой размещали на оси сверхпроводящего соленоида, что давало возможность проводить измерения в плавно изменяющемся магнитном поле до 5 Тл параллельно или антипараллельно направлению намагниченности пленки.

Микроволновое излучение частотой 8–12 ГГц от клистронного генератора ($P \sim 30$ мВт) подводилось к контакту по прямоугольному волноводу 10×23 мм, зауженному до размеров 2×23 мм. Контакт размещали в максимуме электрической E_{ac} компоненты СВЧ поля, задаваемом положением короткозамыкающего поршня в волноводе. Для повышения чувствительности схемы регистрации сигнала ФМ резонанса применяли стандартную схему синхронного детектирования (рис. 4) со 100% амплитудной модуляцией микроволновой мощности на низкой частоте 4434 Гц. Такая методика позволила значительно увеличить соотношение сигнал–шум и дала возможность измерять полезный сигнал на уровне 10–20 нВ. Все сигналы конвертировались с помощью карты DAQ Nat. Instr. и регистрировались на персональном компьютере.

Основные результаты и интерпретация

Полученные в данной работе экспериментальные результаты для F–N микроконтактов разделяются в зависимости от механизма формирования сигнала ФМ резонанса. Для одних контактов, содержащих поверхностный спиновый вентиль, возбуждение стационарной прецессии вектора намагниченности приводит к вариациям сопротивления за счет эффекта ГМС. Для других, не содержащих вентильной структуры, сопротивление контакта при прецессии намагниченности изменяется за счет эффекта АМС. Резонансный сигнал может быть обусловлен взаимодействием как СВЧ тока, так и постоянного транспортного тока, текущих через контакт, с колебаниями его электросопротивления.

Резистивные измерения на низкой частоте

Для исследованных микроконтактов нами наблюдались два типа зависимостей дифференциального магнитосопротивления $R_d(H) = dV/dI(H)$ от напряженности магнитного поля (рис. 5). В некоторых контактах

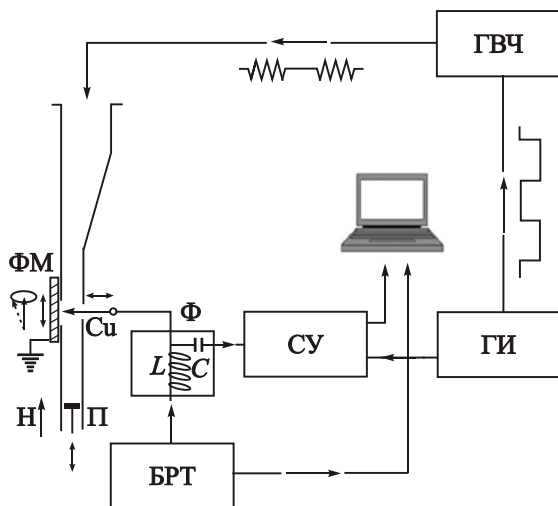


Рис. 4. Блок-схема установки для измерения сигнала ФМ резонанса в F–N микроконтактах: БРТ — блок развертки постоянного тока, Ф — развязывающий фильтр, СУ — синхронный усилитель, ГИ — импульсный генератор, ГВЧ — генератор СВЧ, П — короткозамыкающий поршень, ФМ — ферромагнитная пленка, Cu — медная игла.

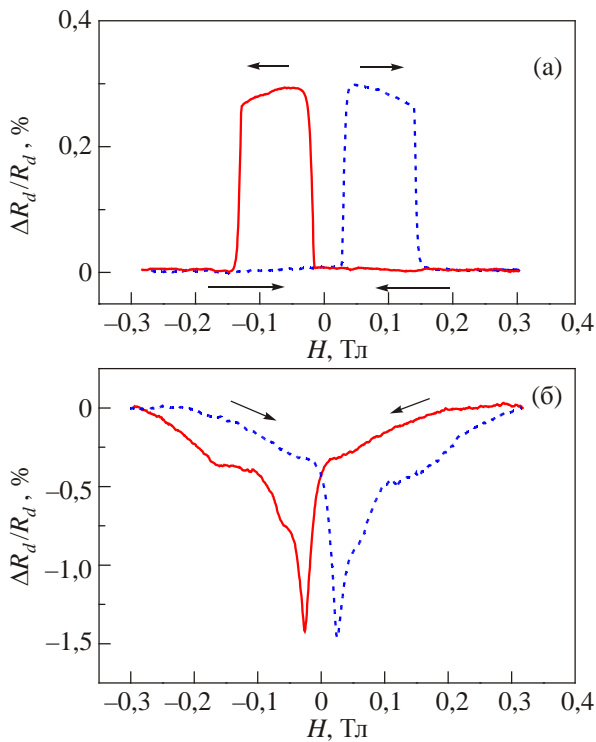


Рис. 5. (Онлайн в цвете) Зависимости магнитосопротивления микроконтактов от напряженности магнитного поля при свипировании поля в противоположных направлениях для поверхностного спинового вентиля (а) и анизотропного магнитосопротивления стандартного F–N контакта (б).

сопротивление менялось скачкообразно (рис. 5(а)) при значениях напряженностей H поля, характерных для перемагничивания массива пленки (при малых полях) и монодоменного поверхностного магнитного кластера в больших полях [10]. Подобное поведение характерно для микроконтактов с поверхностным спиновым вентиляем [9–11]. Причем такие контакты могли обладать и гистерезисом на зависимости сопротивления от постоянного смещения $dV/dI(V)$, если размер кластера достаточно мал, чтобы спиновый вращательный момент потока электронов транспортного тока мог ощутимо воздействовать на магнитный момент кластера, меняя направление его вектора намагниченности.

Большинство контактов (около 90%) демонстрировали довольно плавные зависимости, типичные для поведения в H поле анизотропного магнитосопротивления (рис. 5(б)). Однако, в отличие от однородной пленки пермаллоя [17,18], для микроконтактов Cu–Ru как положение минимума сопротивления, так и магнитное насыщение наблюдаются при существенно больших напряженностях магнитного поля, а не в полях около ± 20 Э. Причиной такого поведения могут быть: во-первых, большая коэрцитивность (т.е. значительные

искажения структуры ферромагнетика в области контакта), а во-вторых, наличие компоненты тока текущей в плоскости пленки* и, наконец, возможное существование составляющей намагниченности, выходящей из плоскости пленки. Подтверждением наличия компоненты тока в плоскости пленки служит тот факт, что в специальных измерениях, когда подводящие электроды к пленке располагались перпендикулярно направлению H поля, зависимость $R_d(H)$ вместо минимума (рис. 5(б)) имела максимум.

Высокочастотные исследования

При возбуждении микроволновым полем стационарной однородной прецессии вектора намагниченности в условиях ФМР все спины прецессируют с одинаковой частотой и фазой. Это происходит как в массиве ферромагнитной пленки, так и в объеме наноконтакта, заполненном ферромагнетиком, что вызывает периодическую зависимость от времени электросопротивления контакта за счет эффектов ГМС или АМС. Как известно [19,20], именно в объеме контакта сконцентрирована максимальная плотность тока, который далее растекается в массиве пленки. Произведение этого тока на сопротивление контакта вызывает появление на контакте соответствующего напряжения, которое и является индикатором ФМ резонанса.

Типичные магнитопольные зависимости сигнала отклика на СВЧ облучение ($f = 9,26$ ГГц), полученные для многих микроконтактов Ru–Cu, показаны на рис. 6 для различных значений транспортного тока (напряжения на контакте). На рис. 6(а) представлены результаты, характерные для проявления эффекта ГМС (т.е. в микроконтакте реализован поверхностный спиновый вентиль), а на рис. 6(б) — эффекта АМС. Особенности на экспериментальных зависимостях при напряженностях H поля $H_{res} = \pm (0,11–0,12)$ Тл в виде максимумов и минимумов обусловлены возбуждением стационарной прецессии намагниченности (ФМР) в пленке пермаллоя. Резонансные особенности для спинового вентиля в виде максимумов наблюдаются в полях, превышающих максимальное поле перемагничивания ($\pm 0,65$ Тл) вентиля, т.е. оба магнитных элемента вентиля имеют параллельную ориентацию вектора намагниченности. Вследствие этого на кривой для $V = 0$ при отсутствии транспортного тока резонансный сигнал синхронного самодетектирования V_{d1} (2) не проявляется, а присутствует только вклад V_{d2} (5) от болометрического отклика, который обусловлен стационарным увеличением среднего значения сопротивления при возбуждении прецессии намагниченности. В случае анизотропного магнитосопротивления напряженности поля H_{res} еще

* При направлении тока через контакт строго по нормали к пленке, в плоскости которой расположен вектор намагниченности, АМС эффект не должен зависеть от напряженности внешнего H поля (см. формулу (2)).

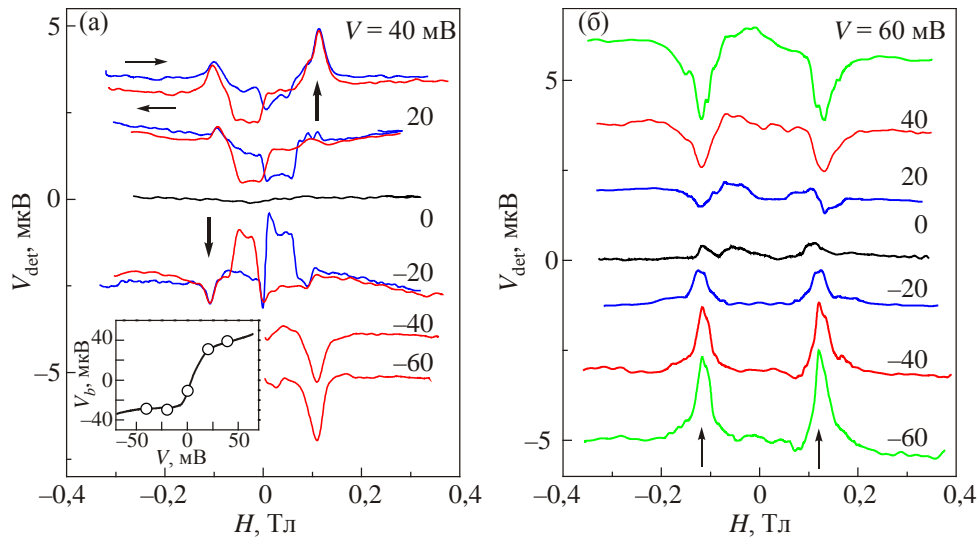


Рис. 6. (Онлайн в цвете) Зависимости отклика микроконтактов на микроволновое облучение (9,26 ГГц) для поверхностного спинового вентиля в контакте Cu–пленка Pu (а) и анизотропного магнитосопротивления для контакта Cu–пластина Pu (б) при различных значениях постоянного смещения. Жирными стрелками указаны особенности, обусловленные ФМР. Кривые сдвинуты по вертикальной оси. На вставке к (а) представлена зависимость амплитуды нерезонансного фонового сигнала от напряжения на данном контакте.

недостаточно для точной ориентации вектора намагниченности параллельно направлению постоянного тока (рис. 5(б)), поэтому регистрируемый сигнал имеет оба вклада: V_{d1} (четко видимый на кривой для $V = 0$) и V_{d2} в виде минимумов, связанный со стационарным уменьшением сопротивления при резонансе.

Следует отметить, что кроме двух отмеченных выше резонансных вкладов в измеряемый сигнал имеется еще нерезонансная составляющая, связанная с выпрямлением СВЧ тока на нелинейной ВАХ контакта. Амплитуда этой фоновой составляющей V_b пропорциональна второй производной ВАХ и квадрату амплитуды ВЧ тока

$$V_b(V) = \frac{1}{4} \frac{d^2V}{dI^2}(V) I_1^2. \quad (6)$$

Присутствие фоновой компоненты в измеряемом сигнале отклика вызывает монотонный нелинейный сдвиг регистрируемых зависимостей (см. вставку на рис. 6(а), на которой представлена зависимость $V_b(V)$ и отдельными точками указаны значения фонового сигнала для соответствующих кривых). Специально отметим, что, сравнивая зависимость сигнала отклика $V_b(V)$ с зависимостью второй производной ВАХ $d^2V/dI^2(V)$, измеренной на низкой (звуковой) частоте, можно оценить амплитуду СВЧ тока I_1 , наведенного в контакте внешним облучением. В частности, зависимости на рис. 6(б) записаны для контакта сопротивлением 1,15 Ом при $I_1 = 16,8$ мА.

Обратим внимание на то, что некоторые кривые на рис. 6(а) зарегистрированы при двух направлениях развертки магнитного поля и на них четко видны петли переключения магнитного состояний спинового вен-

тиля. Однако в отличие от гистерезиса $R_d(H)$ на рис. 5, форма которого слабо меняется в присутствии облучения, петли $V_{det}(H)$ могут быть направлены как вниз, так и вверх от уровня фонового сигнала. Такое видоизменение петель гистерезиса обусловлено уменьшением сопротивления поверхностного спинового вентиля под облучением в антипараллельном состоянии и его увеличением в параллельном. Вдали от ФМ резонанса под облучением происходят стохастические колебания вектора намагниченности, что неизбежно вызывает изменения величины среднего стационарного значения электросопротивления. При использованной нами методике синхронного детектирования с прерыванием ВЧ облучения фактически регистрируется уменьшение высоты петли гистерезиса сопротивления.

Экспериментальные значения частоты СВЧ облучения f и характерного поля H_{res} для наблюдаемых резонансных особенностей (рис. 7) хорошо согласуются с результатами расчета по стандартной формуле Киттеля [21] для ферромагнитной пленки в параллельном H поле

$$f_{res} = \frac{g\mu_B}{2\pi\hbar} \sqrt{H_{res}(H_{res} + 4\pi M_s)} \approx \approx 28(\text{ГГц/Тл}) \sqrt{H_{res}(H_{res} + 4\pi M_s)}, \quad (7)$$

где g — фактор Ланде, μ_B — магнетон Бора, \hbar — постоянная Планка, а намагниченность насыщения для пермаллоя $4\pi M_s = 0,8$ Тл.

Некоторый разброс экспериментальных точек на рис. 7 может быть обусловлен полем поверхностной анизотропии на интерфейсе Pu–Cu (см., например, [22]).

Влияние интенсивности ВЧ облучения на амплитуду резонансных особенностей продемонстрировано на

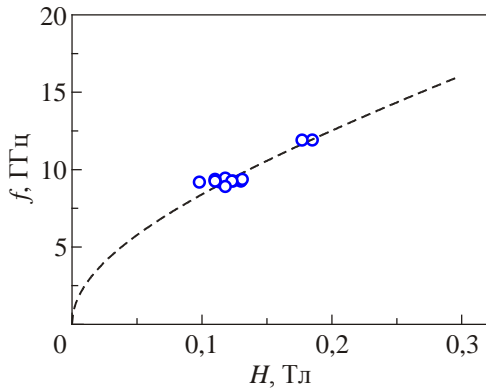


Рис. 7. Соотношение между частотой ВЧ облучения и напряженностью H поля для наблюдаемых резонансных особенностей. Точки — эксперимент, штриховая кривая — расчет по формуле (7) для ФМР в пермаллое.

рис. 8. При малых и средних уровнях облучения, как видно на рисунке, наблюдается линейная зависимость, отклонение от которой проявляется только при большом уровне мощности. Ширина резонансной линии практически не меняется с увеличением мощности, и лишь при большой интенсивности облучения заметно некоторое размытие резонансной линии.

В соответствии с формулой (5) для болометрической составляющей отклика амплитуда линии ФМР должна линейно возрастать с увеличением величины постоянного транспортного тока, текущего через микроконтакт, что хорошо подтверждается данными на рис. 9, где представлены зависимости амплитуды экспериментально измеренного сигнала отклика (рис. 6) за вычетом фона. Как для контакта с поверхностным спиновым вентиляем, так и без него (вклад в отклик от анизотропного магнитосопротивления), наблюдается

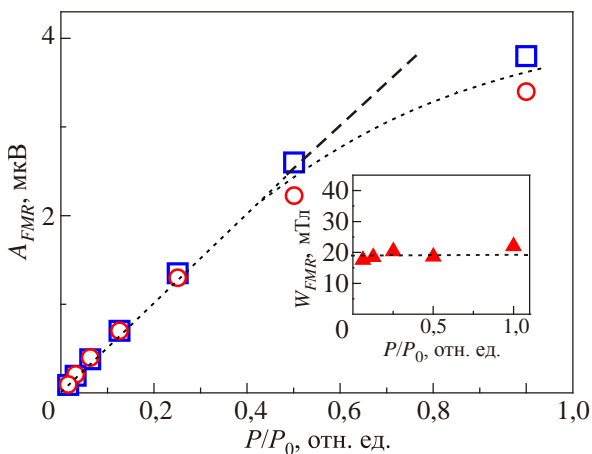


Рис. 8. Зависимость амплитуды ФМР особенности от мощности СВЧ облучения (\square — особенности при отрицательных H полях, \circ — для положительных значений поля). На вставке — зависимость ширины резонансной линии. Мощность генератора $P_0 \approx 4$ мВт.

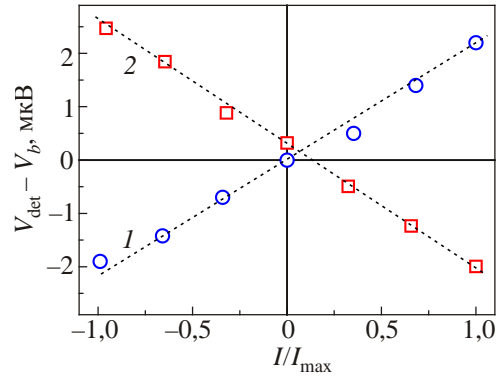


Рис. 9. Вариации амплитуды резонансного отклика для ГМС (1) и АМС (2) эффектов от относительных значений постоянного тока через микроконтакты.

линейное поведение сигнала. Некоторый параллельный сдвиг вверх линии 2 относительно начала отсчета связан с небольшой добавкой от синхронного самодетектирования (см. формулу (4)) в измеряемый сигнал, как отмечалось выше для вклада от АМС.

Во всех рассмотренных выше экспериментах применяли волноводную схему облучения микроконтактов (рис. 4). В такой методике облучения возбуждение прецессии вектора намагниченности возможно не только за счет спинового вращательного момента электронов, создающих поляризованный ВЧ ток, текущий через спиновый вентиль, но и за счет непосредственного воздействия высокочастотной магнитной H_{ac} компоненты микроволнового поля. Физика процессов, как очевидно, в этих случаях существенно различна. В экспериментах [6–8] для передачи микроволновой энергии использовалась коаксиальная линия передачи, с помощью которой и задавался ВЧ ток через спиновый вентиль. В наших экспериментах, как уже упоминалось выше, с помощью подвижного поршня изначально в волноводе устанавливался максимум E_{ac} стоячей СВЧ волны в области микроконтакта, однако из-за большой нерегулярности волноводного тракта в районе иглы нельзя исключить наличие магнитной ВЧ компоненты значительной величины. В процессе измерений перестройка положения поршня исключалась из-за механической нестабильности контакта. Кроме того, положение места касания иглы к пленке могло изменяться за счет некоторой деформации демпфера, что также приводило к ВЧ расстройке.

Для исключения непосредственного влияния H_{ac} на ферромагнитную пленку большое отверстие в волноводе диаметром 6 мм было закрыто медной фольгой с отверстием 0,4 мм, в котором перпендикулярно плоскости волновода перемещалась медная заостренная проволока диаметром 0,2 мм в изолирующей оболочке для образования микроконтакта с пленкой Pu . В

такой структуре медная игла служит центральным проводником коаксиальной линии, задавая ВЧ ток через контакт, подобно методике работ [6–8].

Экспериментальные результаты для одного из Ru–Cu контактов с поверхностным спиновым вентилем приведены на рис. 10. Данные получены при отсутствии постоянного транспортного тока через контакт. Как видно на рисунке, в области H полей $\pm 0,13$ Тл наблюдаются ФМР особенности (отмеченные вертикальными штриховыми линиями), амплитуда которых увеличивается с ростом интенсивности облучения. При максимальном уровне мощности наблюдается некоторое уширение резонансной линии и ее смещение в область больших магнитных полей (частот), что отмечалось ранее и для стандартных спиновых вентилях [7]. Можно утверждать, что в данном эксперименте возбуждение прецессии вектора намагниченности (ФМ резонанс) в пленке пермаллоя осуществляется именно спиновым вращательным моментом, переносимым потоком поляризованных электронов, образующих ВЧ ток. Если кроме ВЧ тока через контакт пропускался и постоянный ток, то амплитуда резонансов возрастала с ростом тока, подобно данным на рис. 6 и 8.

Наблюдающаяся линейная зависимость амплитуды резонансной особенности от мощности P облучения (вставка (а) на рис. 10) объясняется тем, что амплитуда осцилляций сопротивления $R_{SV}(t)$ растет линейно с увеличением интенсивности воздействия спинового вращательного момента [6], пропорционального величине ВЧ тока I_{ac} , т.е. $V_{d1} \sim I_{ac}R_{SV}(t) \sim (I_{ac})^2 \sim P$.

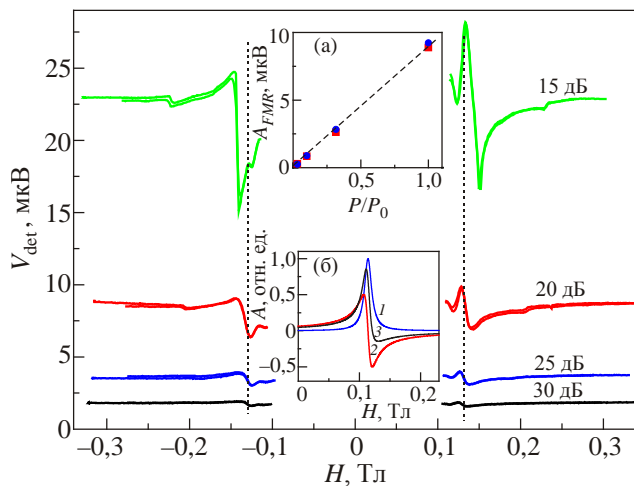


Рис. 10. (Онлайн в цвете) Участки полевых зависимостей отклика микроконтакта Ru–Cu при облучении с помощью коаксиальной линии для различных интенсивностей ВЧ поля ($I_{dc} = 0$). Штриховыми линиями отмечены ФМР особенности. На вставке (а) — зависимость амплитуды резонансных особенностей от мощности облучения: $H < 0$ (●), $H > 0$ (■), $P_0 \approx 1,6$ мВт. На вставке (б) — резонансные кривые для гармонического осциллятора для различных сдвигов фазы δ вынуждающей силы: 0 (1), $-\pi/2$ (2), $-\pi/4$ (3).

Следует обратить внимание на N-образный вид резонансных особенностей на рис. 10 в отличие от рис. 6, что свидетельствует о присутствии в сигнале отклика как симметричной, так и антисимметричной компоненты [6,15,23–25]. Такое изменение формы может быть связано с изменением фазового сдвига δ между ВЧ током и динамическим электросопротивлением контакта. Подобное влияние сдвига фазы на внешний вид резонансной кривой для гармонического осциллятора продемонстрировано на вставке (б) к рис. 10.

Необходимо отметить, что резонансные особенности на рис. 10 наблюдались при напряженностях магнитного поля, достаточных для установления параллельной ориентации векторов намагниченности поверхностного магнитного микрокластера и массива пленки пермаллоя. Такие особенности отсутствуют на рис. 6(а) при $V = 0$ (для нулевого значения транспортного тока) и практически никогда нами не наблюдались в подобных условиях при волноводной накачке, однако они регулярно регистрировались при использовании коаксиальной линии подвода ВЧ излучения к контакту. В этой связи следует иметь в виду несколько моментов. При использовании волновода под влиянием микроволнового магнитного H_{ac} поля находится пленка ферромагнетика, тогда как ВЧ ток за счет передачи спинового вращательного момента влияет на поверхностный магнитный микрокластер. Как известно [2–4], вращательный момент, переносимый потоком электронов, поляризованных по спину, определяется произведением $\mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{M})$ и пропорционален относительному углу между векторами намагниченности \mathbf{m} поверхностного микрокластера и массива пленки \mathbf{M} , т.е. при малых углах взаимной разориентации векторов \mathbf{m} и \mathbf{M} вращательный момент также мал. Поле H_{ac} ориентировано ортогонально векторам намагниченности, поэтому вращательный момент от его воздействия максимален. В коаксиальной линии ВЧ воздействие оказывается преимущественно на микрокластер. В этом случае возможен некоторый сдвиг оси прецессии под влиянием ВЧ тока с учетом его пространственного растекания вблизи микроконтакта, что, по-видимому, и приводит к возбуждению прецессии намагниченности и, соответственно, к асимметрии колебаний сопротивления. Наличие или отсутствие резонансного сигнала V_{d1} при различных способах накачки до конца не совсем понятно и требует дальнейших исследований.

Заключение

Систематические исследования сигнала отклика точечных микроконтактов пермаллой–медь на микроволновое облучение (изучено влияние на измеряемый сигнал напряженности внешнего магнитного поля, транспортного тока, текущего через контакт, и интенсивности облучения) позволили выявить характерные

особенности ферромагнитного резонанса в F–N контактах. Используются два способа передачи ВЧ излучения к контакту: волноводный тракт и коаксиальная линия. Экспериментально показано, что положение резонансных особенностей хорошо укладывается на зависимость $f(H)$, рассчитанную по стандартной формуле Киттеля для ФМР в пленке. Обнаружено, что резонансный сигнал наблюдается на фоне дополнительного вклада, обусловленного выпрямлением ВЧ тока на нелинейной вольт-амперной характеристике контакта. Установлены два механизма образования резонансного отклика: синхронное самодетектирование и болометрический отклик. В первом механизме амплитуда сигнала определяется амплитудой ВЧ тока в контакте, эволюциями его сопротивления от времени и разностью фаз между ними. Во-втором сигнал резонанса определяется произведением величины постоянного тока через контакт и изменениями среднего стационарного значения его сопротивления при возбуждении стационарной прецессии вектора намагниченности. Причем сигнал резонанса добавляется к фоновому нерезонансному сигналу или вычитается из него в зависимости от структуры микроконтакта. Если в контакте реализуется структура с поверхностным спиновым вентилем, то при ФМ резонансе прецессия намагниченности вызывает увеличение среднего стационарного значения сопротивления за счет эффекта гигантского магнитосопротивления и резонансный сигнал добавляется к фону. При отсутствии спинового вентиля в структуре контакта ФМ резонансные особенности возникают за счет анизотропного магнитосопротивления, которое приводит к уменьшению сопротивления при возбуждении прецессии, и сигнал резонанса в этом случае вычитается из фонового уровня. В обоих случаях амплитуда резонансного сигнала линейно пропорциональна величине пропускаемого через контакт постоянного тока. Увеличение интенсивности ВЧ облучения приводит к линейному росту амплитуды при малых и средних уровнях мощности и слабо влияет на ширину резонансной особенности. Проанализированы вклады в электросопротивление контактов от эффектов гигантского и анизотропного магнитосопротивления.

Работа выполнена при финансовой поддержке НАН Украины по проектам ФЦ 3–19 и Н 26/14 – Н (НАНО).

Авторы признательны Ю.Г. Найдюку за полезные обсуждения и ценные замечания.

1. *Ферромагнитный резонанс*, С.В. Вонсовский (ред.), Физматгиз, Москва (1961).
2. L. Berger, *Phys. Rev. B* **54**, 9353 (1996).
3. J.C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1 (1996).
4. D.C. Ralph and M.D. Stiles, *J. Magn. Magn. Mater.* **320**, 1190 (2008).
5. N. Locatelli, V. Cros, and J. Grollier, *Nature Mater.* **13**, 11 (2014).

6. A.A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D.D. Djayaprawira, N. Watanabe, and S. Yuasa, *Nature* **438**, 339 (2005).
7. J.C. Sankey, P.M. Braganca, A.G.F. Garcia, I.N. Krivorotov, R.A. Buhrman, and D.C. Ralph, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 227601 (2006).
8. C. Wang, H. Seinige, and M. Tsoi, *Fiz. Nizk. Temp.* **39**, 320 (2013) [*Low Temp. Phys.* **39**, 247 (2013)].
9. I.K. Yanson, Yu.G. Naidyuk, V.V. Fisun, A. Konovalenko, O.P. Balkashin, L.Yu. Triputen, and V. Korenivski, *Nano Lett.* **7**, 927 (2007).
10. I.K. Yanson, O.P. Balkashin, V.V. Fisun, Yu.I. Yanson, and Yu.G. Naidyuk, *Fiz. Nizk. Temp.* **39**, 360 (2013) [*Low Temp. Phys.* **39**, 279 (2013)].
11. O.P. Balkashin, V.V. Fisun, I.K. Yanson, L.Yu. Triputen, A. Konovalenko, and V. Korenivski, *Phys. Rev. B* **79**, 092419 (2009).
12. M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Day, and F. Petroff, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
13. S.I. Kiselev, J.C. Sankey, I.N. Krivorotov, N.C. Emley, R.J. Schoelkopf, R.A. Buhrman, and D.C. Ralph, *Nature* **425**, 380 (2003).
14. T.R. McGuire and R.I. Potter, *IEEE Trans. Magn.* **11**, 1018 (1975).
15. N. Mecking, Y.S. Gui, and C.-M. Hu, *Phys. Rev. B* **76**, 224430 (2007).
16. O.P. Balkashin, R.J.P. Keijsers, H. van Kempen, Yu.A. Kolesnichenko, and O.I. Shklyarevskii, *Phys. Rev. B* **58**, 1294 (1998).
17. Z. Wang, G. Yu, X. Liu, B. Zhang, X. Chen, and W. Lu, *Solid State Commun.* **182**, 10 (2014).
18. А.В. Медведь, П.Г. Крышталь, А.И. Крикунов, *ЖТФ* **76**, 72 (2006).
19. Yu.G. Naidyuk and I.K. Yanson, *Point Contact Spectroscopy*, Springer Series in Solid–State Sciences, Vol. 145; Springer Science+Business Media, Inc.; New York (2005).
20. A.H. MacDonald and C.R. Leavens, *J. Phys. F: Met. Phys.* **13**, 665 (1983).
21. C. Kittel, *Phys. Rev.* **73**, 155 (1948).
22. J.-M.L. Beaujour, W. Chen, A.D. Kent, and J.Z. Sun, *J. Appl. Phys.* **99**, 08N503 (2006).
23. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Теоретическая физика, Механика*, Наука, Москва (1963).
24. C. Wang, Y.-T. Cui, J.Z. Sun, J.A. Katine, R.A. Buhrman, and D.C. Ralph, *Phys. Rev. B* **79**, 224416 (2009).
25. Z. Wang, X. Zhu, X. Chen, and W. Lu, *arXiv: 1310.6108 [cond-mat]*.

Ferromagnetic resonance in copper-permalloy point contacts

O.P. Balkashin, V.V. Fisun, I.A. Korovkin,
and V. Korenivski

The systematic investigations of the response signal of Copper–Permalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) point contacts to

microwave irradiation (8–12 GHz) are performed. The influence of external magnetic field strength, transport current flowing through the contact, the intensity and frequency of the RF exposure on the measured signal is studied. The contributions to the contacts resistance from the effects of giant and anisotropic magnetoresistance are analyzed. It is established experimentally that the position of resonance features is in good agreement with the Kittel formula calculation for FMR in the film at a parallel H field. The resonance signal was observed on the background of an additional contribution due to the rectification of RF current on the nonlinear contact IV -curve. It is found that there are two mechanisms for the resonant response are revealed: a synchronous self-detection by means of mixing of RF current with temporal varia-

tions of resistance and a bolometric mechanism associated with a steady-state change of contact resistance under excitation of magnetization precession (a bolometric response). It is found that the resonance signal amplitude is linearly proportional to transport current through the contact and microwave irradiation intensity.

PACS: **72.25.-b** Spin polarized transport;
75.75.-c Magnetic properties of nanostructures;
85.75.-d Magnetoelectronics; spintronics;
76.50.+g Ferromagnetic resonance.

Keywords: point contact, spin-transfer torque, spin valve, anisotropic magnetoresistance, microwave irradiation.