

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

**Труды XXIV Международного
симпозиума**

10–13 марта 2020 г., Нижний Новгород

Том 1

Секции 1, 2, 4

Нижний Новгород
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
2020

УДК 538.9
ББК 22.37; 22.33
Н-25

Нанозифика и нанозлектроника. Труды XXIV Международного симпозиума (Нижний Новгород, 10–13 марта 2020 г.) В 2 т. Том 1. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2020. — 469 с.

ISBN 978-5-91326-587-6

Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации;
Отделение физических наук РАН;
Научный совет РАН по физике полупроводников;
Научный совет РАН по физике конденсированных сред;
Институт физики микроструктур РАН;
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
ОАО «Санаторий «Автомобилист»;
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу».

Сопредседатели Симпозиума

С.В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН
З.Ф. Красильник, член-корр. РАН, ИФМ РАН

Учёный секретарь Симпозиума

В.В. Румянцев, к.ф.-м.н., ИФМ РАН

Программный комитет

В.В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
И.С. Бурмистров, д.ф.-м.н.	ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черногловка;
В.А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ, Москва
В.А. Быков, д.т.н.	ООО «НТ-МДТ», Москва
В.А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
В.И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
К.Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А.М.Проخورова РАН, Москва
С.В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург
Е.Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, академик	ИФТТ РАН, Черногловка
А.В. Латышев, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
С.А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Д.В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногловка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногловка
Н.Н. Салашенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Н.Новгород
А.А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
В.Б. Тимофеев, академик	ИФТТ РАН, Черногловка
Ю.А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А.А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород
Д.Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва
А.В. Чаплик, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
Е.В. Чупрунов, д.ф.-м.н.	ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород
Н.И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н.Новгород

Организационный комитет

В.Г. Беллюстина	ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Зорина	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.В. Иконников, к.ф.-м.н.	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
Д.А. Камелин	ИФМ РАН, Н. Новгород
Р.С. Малофеев	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.В. Морозов, к.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Н. Садова	ИФМ РАН, Н. Новгород
П.М. Марычев	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.А. Копасов	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.А. Архипова	ИФМ РАН, Н. Новгород

ISBN 978-5-91326-587-6

ББК 22.37; 22.33

© Нижегородский госуниверситет
им. Н.И. Лобачевского, 2020
© Институт физики микроструктур
РАН, 2020

Инжекционная неравновесная спиновая поляризация в магнитном переходе с учетом спиновой подвижности электронов

Е.А. Вилков¹, С.А. Никитов¹, О.А. Бышевский-Конопко¹, А.Р. Сафин²,
Л.А. Фомин³, С.Г. Чигарев¹

1 Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141191.

2 Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, 111250.

3 Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, ул. Институтская, 6, Черноголовка Московской обл., 142432.

*e-vilkov@yandex.ru

С учетом спиновой подвижности электронов рассмотрено численное решение уравнения для неравновесной спиновой поляризации на границе магнитного контакта с током, образованного двумя ферромагнетиками. Рассчитаны частоты спин-инжекционного излучения. Показано, что при определенной плотности тока, превышающей пороговое значение, эти частоты лежат в терагерцовом диапазоне частот. При этом установлено, что для одного и того же терагерцового диапазона частот даже при небольших значениях разности подвижности электронов со спином вверх и вниз плотность тока может быть на два порядка меньше, чем плотность тока при одинаковой подвижности.

Введение

В настоящее время магнитные нанопереходы между двумя магнетиками с протекающим по ним спин-поляризованным током являются одними из интересных объектов исследований [1,2], что связано с перспективами многочисленных применений в терагерцовой спинтронике, в трехмерных наноманитных устройствах, в запоминающих устройствах и сенсорах. Спиновая инжекция током через наноконтакт двух магнетиков может приводить к значительному неравновесному накоплению спина в области непосредственно вблизи контакта. В частности, может возникать инверсная заселенность спиновых подзон ферромагнетика, в который инжектируются неравновесные по спину горячие электроны. При этом могут иметь место излучательные спин-флип переходы электронов проводимости, которые могут быть стимулированы опосредованно через s-d-обменное взаимодействие с электромагнитной волной [3]. Частота излучения при таких переходах, определяется энергией эффективного обменного расщепления спиновых подзон и лежит в терагерцовом диапазоне [3], который весьма привлекателен для практического применения.

Сравнительно недавно в работе [4] было получено уравнение для неравновесной спиновой поляризации на границе магнитного контакта с током, образованного двумя ферромагнетиками и оценена частота спин-флип перехода между неравновесными квазиуровнями Ферми с учетом не прямых элек-

тронных переходов. Показано, что при определенной плотности тока, превышающей пороговое значение, эта частота лежит в терагерцовом диапазоне частот. Однако в этой и других работах подвижности электронов с противоположным направлением спина всегда полагались равными, хотя известно, что в ферромагнетиках, как правило, подвижности отличаются друг от друга [1,2]. Это приближение, возможно, является причиной несоответствия теоретических и экспериментальных значений порогового тока при регистрации терагерцового излучения [4]. Целью этой работы является проверка этого предположения. Для этого в этой статье получено и решено численно уравнение для неравновесной спиновой поляризации в магнитном переходе с учетом разной подвижности электронов проводимости. Кроме того, решение данной задачи важно, как с теоретической, так и с практической точек зрения, поскольку оно позволяет более корректно описывать спиновую инжекцию в магнитных металлических переходах и определять частоту спин-инжекционного излучения с учетом не прямых межподзонных излучательных переходов электронов.

Уравнение для неравновесной спиновой поляризации

С учетом спиновой подвижности электронов рассмотрено численное решение уравнения для неравновесной спиновой поляризации на границе маг-

нитного контакта с током, образованного двумя ферромагнетиками:

$$\frac{d^2 P}{dx^2} \{b(1+b) + (-b+1)P\} - \frac{dP}{dx} \frac{j}{j_D} b - \left(\frac{dP}{dx}\right)^2 b(1-b^2) - \frac{(P-P_2)}{2l^2} (1+b)^2 - (1-b^2) \frac{(P^2 - P_2 P)}{l^2} - (1-b)^2 \frac{(P^3 - P_2 P^2)}{l^2} = 0 \quad (\Phi 1)$$

где мы ввели обозначения: $l = \sqrt{D_+ \tau}$ - длина спиновой релаксации для электронов со спином по направлению намагниченности, $j_D = enD_+ / l$ - плотность тока по порядку величины совпадающая с плотностью тока диффузии $j_D^* = enD / l = enl / \tau$ при $D_- = D_+ = D$, b - величина отношений подвижностей электронов с противоположным направлением спина, τ - время релаксации спинов, усредненное по всем спинам, e - заряд электрона, n - концентрация электронов проводимости. Уравнение (1) получено на основе уравнения динамики движения магнитного момента, усредненного по ансамблю неравновесных спин-инжектированных электронов в магнитной гетероструктуре [5]. На рис.1 показан расчет частот спин-инжекционного излучения вычисленную через неравновесную спиновую поляризацию P (см. формулу (1)).

Из рис. 1 видно, что для одного и того же терагерцового диапазона частот даже при небольших значениях разности подвижности электронов со спином вверх и вниз плотность тока может быть на два порядка меньше, чем плотность тока при одинаковой подвижности. Это позволяет объяснить существенную разность порядка (примерно на два порядка) плотностей тока, соответствующих терагерцовому диапазону частот, между теоретической оценкой, основанной на предположении равенстве подвижностей, и измерениями в эксперименте. Рассмотренные явления имеют большой потенциал для обнаружения новых эффектов и разработки на их основе новых устройств, в том числе компактных перестраиваемых источников излучения в заведомо трудном для генерации терагерцовом диапазоне частот.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФ 19-19-00607.

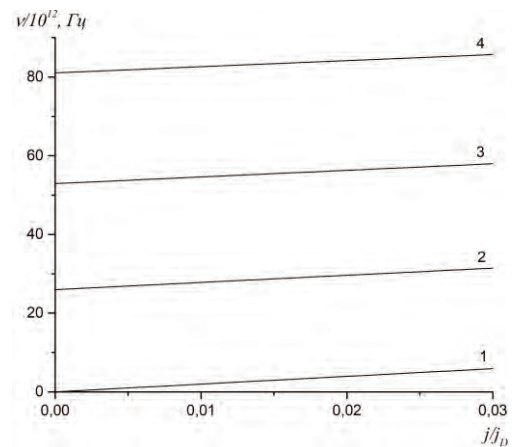


Рис. 1. Зависимость частоты спин-инжекционного излучения от (безразмерной) плотности тока j/j_D вблизи границы двух ферромагнетиков при различных отношениях подвижностей $b = 1$ (1), 0.9 (2), (0.8) (3), 0.7 (4), угол между направлениями намагниченностей 120 градусов, $P_1/P_2=5$

Заключение

С учетом спиновой зависимости подвижности электронов рассмотрено численное решение уравнения для неравновесной спиновой поляризации на границе магнитного контакта с током, образованного двумя ферромагнетиками. Установлено, что для одного и того же диапазона частот даже при небольших значениях разности подвижности электронов со спином вверх и вниз плотность тока может быть на два порядка меньше, чем плотность тока при одинаковой подвижности.

Литература

1. Fert A., George J.-M., Jaffrès H. et al. // Europhys. News, 2003. V. 34. P. 227 (2003).
2. Zutic I., Fabian J., Das Sarma S. // Rev. Mod. Phys, 2004, V. 76, P. 323 (2003).
3. Kadigrobov A., Ivanov Z., Claeson T. et al. // Europhys. Lett. 2004. V. 67. P. 948.
4. Вилков Е.А., Михайлов Г.М., Чигарев С.Г. и др. // Радиотехника и электроника, 2016, Т. 61, № 9, С. 844 (2016).
5. Вилков Е. А., Никитов С. А., Логунов М. В., Чигарев С. Г. // Радиотехника и электроника, 2019, том 64, № 12, С. 1228 (2019).