

Спин-инжекционное терагерцовое излучение в магнитных переходах

Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман¹⁾, И. В. Маликов*, Г. М. Михайлов*, А. И. Панас, С. Г. Чигарёв, Э. М. Эпштейн

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, 142432 Черноголовка, Московская область, Россия

Поступила в редакцию 19 января 2011 г.

После переработки 31 января 2011 г.

В структуре с точечным контактом между ферромагнитным стержнем и тонкой ферромагнитной пленкой при пропускании постоянного тока достаточно высокой плотности обнаружено электромагнитное излучение в диапазоне 1–10 ТГц при комнатных температурах. Излучение вызвано инжекцией неравновесных спинов между компонентами структуры. Согласно оценкам, инжекция может приводить к появлению инверсной заселенности спиновых энергетических подзон. Мощность излучения на порядки превосходит тепловой фон с учетом нагрева током, причем она безынерционно следит за током.

1. Эксперимент. Исследуемая структура представляет собой неоднородный магнитный переход и состоит из двух основных ферромагнитных компонент: стержня из магнитожесткого материала, в нашем эксперименте – из закаленной стали, и тонкой (наноразмерной толщины) пленки из магнитомягкого материала, у нас – из пермаллоя. Вид структуры показан на рис.1. Вся структура для простоты реализации и расчета имеет цилиндрическую симметрию. Стержень заострен на конце до диаметра $2R = 10\text{--}100\text{ мкм}$, толщина пленки составляет $h = 10\text{--}100\text{ нм}$.

Описанная структура обладает важным для дальнейшего свойством, обсуждавшимся нами ранее в работах [1, 2], а именно, в силу непрерывности тока в пленке может достигаться высокая плотность поляризованного по спину тока, которая в отношении $2R/h \gg 1$ превышает плотность тока в стержне. При этом, как видно из рис.1, в центре стержня создается минимум энергии для электронов с основным направлением спина. Такие электроны концентрируются вблизи минимума. С ростом тока квазиуровень Ферми $\epsilon_{F\downarrow}$ возрастает, и электроны из минимума все больше проникают в пространство пленки за краем стержня. На расстоянии от края стержня $0 < r - R < l$, меньшем спиновой длины диффузии $l \sim 20\text{--}30\text{ нм}$, основные спины оказываются направленными противоположно M_2 , что означает инверсную спиновую заселенность. Инверсии способствует максимум энергии дна спиновой подзоны для электронов с неосновными спинами, который возникает вблизи оси стержня (см. рис.1). Наличие максимума

энергии для таких электронов приводит к отдалению их от стержня. В результате вследствие неоднородности в переходе происходит сепарация электронов по спинам и возможно нарастание мощности электромагнитного излучения при межподзонных переходах.

Для обнаружения излучения мы располагали приемник со стороны подложки на расстоянии $L \geq 100\text{ мм}$ от нее так, чтобы он мог поворачиваться, имея в центре излучатель. Проблема создания током инверсной заселенности спинов в ферромагнитных пленках и наблюдения излучения при переходах между подзонами давно вызывает значительный интерес, и теоретические оценки ожидаемых терагерцовых частот излучения сделаны в ряде работ, например, [3–6]. Поэтому в качестве приемника была применена ячейка Голея и два фильтра для фиксации диапазона частот: для низких частот применялась металлическая сетка с ячейками $125 \times 125\text{ мкм}$, а для высоких частот – стандартный фильтр фирмы ТИДЕКС (рис.2). В результате исследуемый диапазон частот составил 1–10 ТГц. При этом приемник находился в волновой зоне, поскольку выполнялось соотношение $L \gg \lambda$, где λ – длина волны.

2. Результаты измерений и обсуждение.

Начнем с результатов измерения зависимости интенсивности излучения от угла наблюдения φ , то есть от угла между осью стержня и нормалью к плоскости объектива. Типичная угловая зависимость имеет вид, показанный на рис.3. Можно видеть, что выраженной направленности излучение не имеет и в среднем при любом угле в объектив попадает мощность $W \sim 2.5\text{ мВт}$. При диаметре объектива $\sim 6\text{ мм}$ это дает мощность излучения в полный телесный угол 4π , равную $W_{\text{total}} \sim 10\text{ мВт}$. Теперь интересно

¹⁾ e-mail: zil@ms.ire.rssi.ru

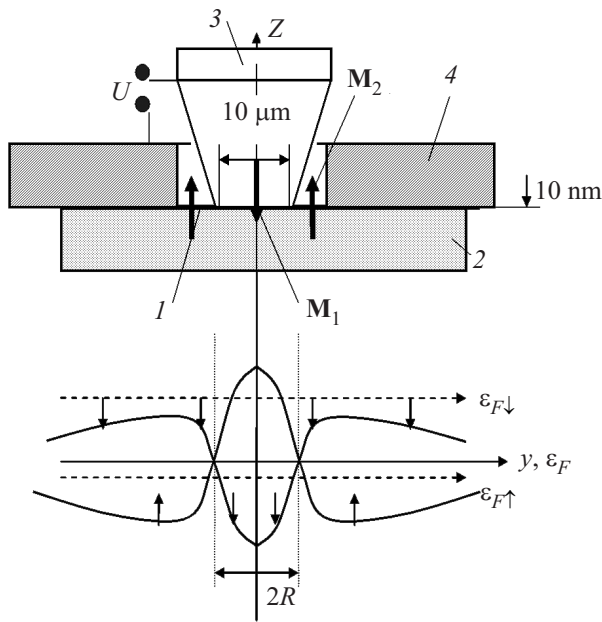


Рис.1. Схема структуры: 1 – пленка, 2 – подложка из окисленного кремния SiO_2 или сапфира Al_2O_3 , 3 – стержень, 4 – медное контактное кольцо с отверстием посередине для стержня. Между стержнем и контактным кольцом подается электрическое напряжение U и создается постоянный ток, который проходит вдоль оси стержня и через пленку пермаллоя. Стержень намагничен вдоль своей оси, причем вектор намагниченности \mathbf{M}_1 внутри стержня представлен на рисунке жирной стрелкой, а вне стержня компонента \mathbf{M}_2 вектора намагниченности в замыкающем потоке, которая перпендикулярна плоскости пленки, представлена двумя жирными стрелками. Следует иметь в виду, что \mathbf{M}_2 зависит от свойств магнитопровода, примыкающего снизу к подложке 2. В нижней части рисунка показана система координат, ось z которой совпадает с осью стержня. Сплошными линиями в проекции на плоскость yz представлено (качественно) дно спиновых подзон в пленке пермаллоя: направления спинов в подзонах указаны тонкими стрелками. Уровень Ферми ε_F при наличии тока расщепляется на два квазиуровня Ферми $\varepsilon_{F\downarrow}$ и $\varepsilon_{F\uparrow}$. Квазиуровни Ферми представлены на рисунке пунктирными линиями

оценить, какова должна быть эффективная абсолютная температура тела T , излучающего такую мощность. В указанном диапазоне частот справедлив закон Рэлея–Джинса [7], согласно которому

$$W_{\text{total}} = \frac{2\pi kTS}{c^2} \int_{f_1}^{f_2} f^2 df, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, c – скорость света, S – площадь излучающего тела, f – частота излучения. Подставляя сюда $S \sim 0.1 \text{ см}^2$ и частоты $f_1 \sim$

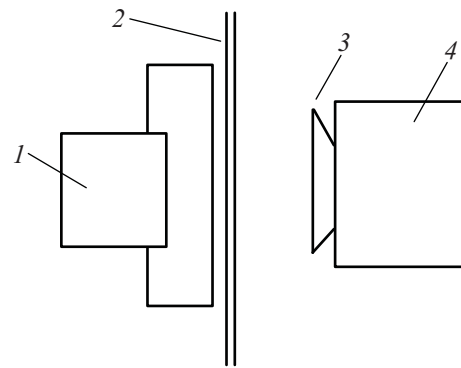


Рис.2. Схема приемного блока: 1 – излучатель, 2 – фильтр низких частот, 3 – фильтр высоких частот, 4 – ячейка Голея

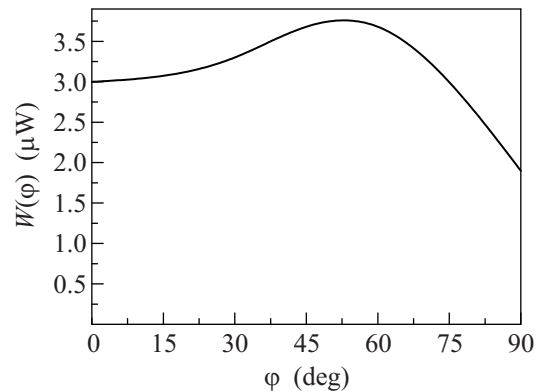


Рис.3. Угловая зависимость мощности принимаемого излучения $W(\varphi)$ при токе ~ 400 мА

$\sim 10^{12}$ Гц, $f_2 \sim 10^{13}$ Гц, получаем $T \geq 3000$ К. Столь высокие температуры в эксперименте отсутствовали. Поэтому ясно, что мощность принимаемого излучения слишком велика и не может быть объяснена нагревом излучателя.

На следующем этапе была измерена принимаемая мощность в зависимости от тока при угле $\varphi = 0$. Результаты показаны на рис.4. Как оказалось, излучение возникает не при любом сколь угодно малом токе, а лишь начиная с некоторого порога. При уменьшении тока получается, что прямая и обратная ветви зависимости $W(\varphi)$ не вполне совпадают – возникает петля. Дело выглядит так, что протекание тока при его возрастании меняет свойства образца, и поэтому при убывании этого тока мы имеем дело с несколько другой средой. Можно предположить, что такое поведение вызвано коэрцитивностью пленки пермаллоя. В самом деле, магнитный поток из стержня перемагничивает пленку, причем ток, инжектирующий электроны проводимости, вносит свой вклад в это перемагничивание. При уменьшении то-

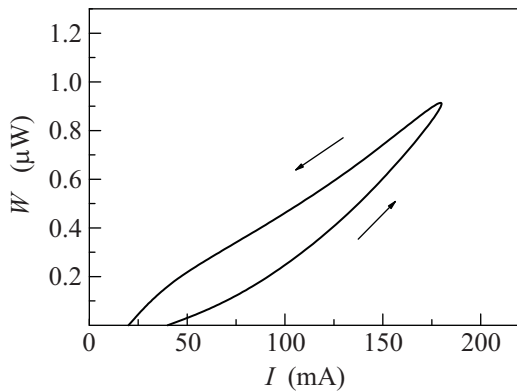


Рис.4. Зависимость мощности излучения от тока. Стрелки указывают направление изменения тока

как вклад инжекции электронов ослабевает, но состояние пленки при этом следует за током с некоторой задержкой. Заметим, что сам факт наличия порогов по току дополнительно свидетельствует о наличии излучения нетепловой природы.

Существенно узнать, насколько детально следит излучение за током при его изменении во времени со скачками и выключением. Из рис.5 видно, что излу-

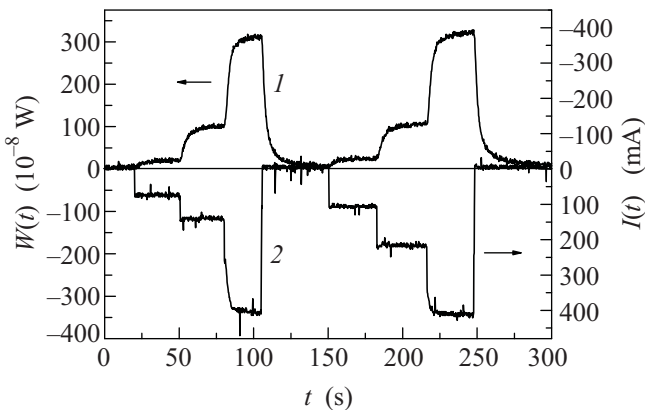


Рис.5. Зависимость мощности излучения $W(t)$ (кривая 1, левая ось ординат) и тока $I(t)$ (кривая 2, правая ось ординат) от времени t

чение повторяет все вариации тока. С тепловым влиянием можно связать лишь плавный характер фронтов импульсов излучения при резких скачках тока и плавный “хвост” на уровне нескольких процентов вблизи нуля. Столь сильное относительное подавление теплового излучения вызвано применением подложек с хорошей теплопроводностью. Ранее в работах [1, 2, 8] в подложке применялся фторопластовый слой, который задерживал тепло и приводил к сильному разогреву образца током. При этом тепловое излучение возрастало, а магнитные свойства образ-

ца и излучение магнитной природы ослабевали. В исследуемой теперь структуре температура образца остается невысокой (не более 60–100 °C), и излучение магнитной природы становится основным эффектом, значительно превосходящим тепловой фон.

Поляризованный ток инжектирует спины и нарушает равновесие вблизи контакта слоев (см. обзор [9]). Согласно оценкам работы [8], это может приводить к инверсии заселенности спиновых подзон. Далее мы покажем, что такая инверсия действительно происходит при больших токах в нашей структуре, представленной на рис.1, вследствие противоположного направления намагниченностей \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_2 в прямом и замыкающем магнитном потоке. Решается следующее уравнение для вектора спиновой поляризации \mathbf{P} электронов проводимости в пленке [8]:

$$\frac{d^2 \mathbf{P}}{dr^2} + (1 - 2\nu) \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{P}}{dr} - \frac{\mathbf{P} - \bar{\mathbf{P}}}{l^2} = 0, \quad (2)$$

где r – расстояние от оси стержня,

$$\nu = \frac{R j}{2l j_D}, \quad (3)$$

j – плотность текущего в стержне тока, $j_D = enl/\tau$ – характеристический ток ($j_D \sim 10^9$ А/см²), e – заряд электрона, n – концентрация электронов в пленке, τ – время релаксации спинов. Уравнение (2) решается при условиях, что на больших расстояниях от стержня поляризация равновесна, то есть $\mathbf{P} = \bar{\mathbf{P}}(\infty)$, а на границе со стержнем, то есть при $r = R$, спиновый поток непрерывен. Тогда при $r = R$ получаем [8]

$$\delta \mathbf{R} = \left(Q_1 \hat{\mathbf{z}} (\hat{\mathbf{M}}_1 \cdot \hat{\mathbf{M}}_2) - \bar{\mathbf{P}} \right) \frac{j(R)}{j_D} \frac{K_\nu(R/l)}{K_{\nu+1}(R/l)}, \quad (4)$$

где $\delta \mathbf{P} \equiv \mathbf{P} - \bar{\mathbf{P}}$ – неравновесная часть спиновой поляризации, $\hat{\mathbf{z}}$ – единичный вектор вдоль оси стержня, $Q_1 = |\sigma_\downarrow - \sigma_\uparrow| / (\sigma_\downarrow + \sigma_\uparrow)$ – параметр спиновой поляризации проводимости стержня, σ_\downarrow и σ_\uparrow – парциальные проводимости для электронов со спинами по $\hat{\mathbf{M}}_1$ и против $\hat{\mathbf{M}}_1$, $\hat{\mathbf{M}}_{1,2} = \mathbf{M}_{1,2} / |\mathbf{M}_{1,2}|$, K_ν – модифицированная функция Бесселя 2-го рода. Поскольку всегда $\hat{\mathbf{M}}_1 \cdot \hat{\mathbf{M}}_2(R) < 0$, из (4) следует, что при достаточно большом отношении j/j_D достигается инверсная заселенность, когда $\mathbf{P}(R) = -\hat{\mathbf{z}} |\mathbf{P}(R)|$. Оценки, сделанные в [8], показывают, что инверсия достигается уже при $j \sim 10^8 - 10^9$ А/см².

Существенно отметить, что зависимость от тока, согласно (3), входит не только явно, но и через индекс функций Бесселя ν . Вследствие этого оказывается, что изменение знака тока может сильно (более, чем на 30%) менять поляризацию $|P(R)|$

и мощность излучения. Столь большие изменения нельзя объяснить термоэлектрическими эффектами (Нернста–Эттингсгаузена и др.), которые в металлах не превосходят долей процента. Экспериментально, однако, сильная “невозвратность” излучения действительно наблюдалась, и это может дополнительно свидетельствовать в пользу спин-инжекционного механизма.

Укажем на некоторые контрольные эксперименты, которые подтверждают магнитную природу и изложенную концепцию нетеплового терагерцового излучения. Во-первых, при замене стального стержня на медный нетепловое излучение полностью исчезло, интенсивность падала, невозвратность не наблюдалась. Во-вторых, при сохранении стального стержня и замене пленки пермаллоя на пленку молибдена излучение и невозвратность исчезали. В-третьих, в структуре на рис.1 присоединение снизу к подложке 2 магнитопровода из мягкой трансформаторной стали позволило отвести замыкающий магнитный поток от исследуемого образца. В результате компонента поля M_2 была уменьшена до нуля. В эксперименте это проявилось в исчезновении следящего за током ТГц излучения и в возрастании плавно меняющегося во времени теплового излучения, вызванного просто безызлучательной релаксацией спинов, поляризованных вдоль оси z .

3. Заключительные замечания. Таким образом, в магнитном переходе наблюдалось довольно мощное излучение в диапазоне 1–10 ТГц. Мощность излучения на порядок превышала тепловой фон. Излучение не имело выраженной направленности, а его интегральная по направлениям мощность составила ≥ 10 мВт. Излучение возникало вследствие прохождения в структуре тока, который превышал определенный порог. С ростом тока мощность излучения нарастала. При уменьшении тока излучение осла-

бевало и прекращалось при другом пороговом токе. Знак тока мог влиять на интенсивность излучения, меняя ее более чем на 30%.

Оценки показали, что в исследуемой структуре под влиянием тока происходила сильная инжекция неравновесных спинов вблизи контакта. Могли даже создаваться участки с инверсной заселенностью спиновых подзон. Именно инжекция спинов порождала ТГц излучение и его невозвратность при изменении знака тока.

Авторы благодарны Ю.Г. Кусраеву, О.В. Бецкому, Г.А. Овсянникову и Ю.Г. Яременко за внимание к работе.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований # 10-02-00030-а.

-
1. С. Г. Чигарёв, А. И. Крикунов, П. Е. Зильберман и др., *РиЭ* **54**, 742 (2009).
 2. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, А. И. Панас и др., *РиЭ* **55**, 715 (2010).
 3. А. М. Kadigrobov, Z. Ivanov, T. Claeson et al., *Europhys. Lett.* **67**, 948 (2004).
 4. А. М. Kadigrobov, R. I. Shekhter, and M. Jonson, *ФНТ* **31**, 463 (2005).
 5. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, А. И. Крикунов и др., *Письма в ЖЭТФ* **85**, 192 (2007).
 6. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Э. М. Эпштейн и др., *Твердотельный источник электромагнитного излучения*. Патент РФ № 2344528, *Бюлл. изобретений*, № 2, 2009.
 7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Статистическая физика*, М.: Наука, 1964.
 8. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, А. И. Панас и др., *РиЭ* **55**, 1211 (2010).
 9. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, А. И. Панас, Э. М. Эпштейн, *УФН* **179**, 359 (2009).