

ПЛОТНОСТЬ ТОКА, ПРОТЕКАЮЩЕГО В КОНТАКТЕ МАГНИТНОГО ПЕРЕХОДА ТИПА СТЕРЖЕНЬ-ПЛЕНКА СПИН-ИНЖЕКЦИОННОГО ТЕРАГЕРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА

Е. А. Вилков, С. Г. Чигарев

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, 141120, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 26 мая 2017 г.

Аннотация. В модели магнитного перехода типа стержень – пленка спин-инжекционного ТГц генератора рассмотрено прохождение тока через контакт ферромагнитный стержень – ферромагнитная пластина. По экспериментально измеренному сопротивлению контакта стержень–пластина определен реальный радиус токопроводящей части контактной поверхности. Установлено существенное уменьшение радиуса проводящей области по сравнению с площадью механического контакта. Это приводит к увеличению плотности тока через контакт в десятки раз вплоть до величины необходимой для возникновения ТГц излучения в рассматриваемом магнитном переходе.

Ключевые слова: магнитный переход, механический контакт, сопротивление стягивания, сопротивление пленки, контактное сопротивление, радиус контактной поверхности, плотность тока.

Abstract. The passing of electric current through the contact a ferromagnetic rod – a ferromagnetic plate is considered in a model of magnetic junction of the type rod–film of spin - injection THz's generator. The actual radius of an electrically conductive part of a contact surface is determined by experimentally measured contact resistance of the rod–plate. Essential decrease of radius of conductive area in comparison with the area of mechanical contact is established. It leads to the increase in a current density through the contact by hundreds of times up to the magnitude necessary for emergence of THz - radiation in the considered magnetic junction.

Keywords: Magnetic junction, mechanical contact, tightening resistance, film resistance, contact resistance, radius of a contact surface, current density.

Введение

Теоретические и экспериментальные исследования режимов работы спин-инжекционного генератора, в котором магнитный переход образован контактом острия ферромагнитного стержня диаметров $d \sim 10-50$ мкм с ферромагнитной пленкой наноразмерной толщины ($\Delta \sim 30$ нм), приведенные в [1], показали, что в пленке такого магнитного перехода нарушение равновесного спинового состояния, приводящего к ТГц генерации, возможно как по границе острия стержня, так и непосредственно под его торцом. Подтверждением этому служит удовлетворительное соответствие частот генерации измеренных экспериментально с их расчетными величинами. Однако при этом возникает вопрос о возможности достижения требуемой плотности тока ($\sim 10^6$ А/см² и более) в области под стержнем. Действительно, если в области по границе стержня требуемая плотность тока достигается за счет использования пленки наноразмерной толщины ($\Delta \sim 30$ нм), когда площадь прохождения тока $S = \pi d \Delta$, то под стержнем площадь протекания тока на несколько порядков больше, так как в этом случае $S = \frac{\pi d^2}{4}$. Для решения этого вопроса рассмотрим более детально контакт стержень – пленка.

Общие представления

Согласно имеющимся представлениям (см. например [2, 3]), механический контакт двух поверхностей в силу их шероховатости осуществляется не по всей плоскости (кажущейся площади соприкосновения), а в отдельных точках, как показано на рис.1а, по контактной поверхности, образованной этими точками. Величина контактной поверхности S зависит от материалов контактирующих элементов и силы прижима. При этом, согласно [2], контактная поверхность может формироваться как за счет упругой деформации выступов шероховатости, так и их пластической деформации. Величина радиуса контактной поверхности a для каждого случая определяется следующим соотношением [2]

- при упругой деформации
$$a = 0,863 \sqrt[3]{\frac{F \times r}{E}} \quad (1)$$

где F – контактное нажатие, H , r – радиус стержня, E – модуль упругости материала, H/m^2 ;

- при пластической деформации
$$a = \sqrt{\frac{F}{\pi n \sigma_{\dot{m}}}} \quad (2)$$

где $\sigma_{\dot{m}}$ – предел прочности материала на смятие H/m^2 , n – число точек контакта.

Оценка радиуса контактной поверхности в используемой структуре стержень-пленка при контакте сталь-сталь и контактном нажатии $1 H$ дает величину $a = 28$ мкм, то есть величину того же порядка что и радиус кажущейся площади соприкосновения, измеряемого под микроскопом. При этом наблюдается пластическая деформация острия стержня.

Однако, не вся контактная поверхность электропроводна, так как она покрыта различными пленками и загрязнениями. Это схематично изображено на рис.1б (изображение взято из [3]).

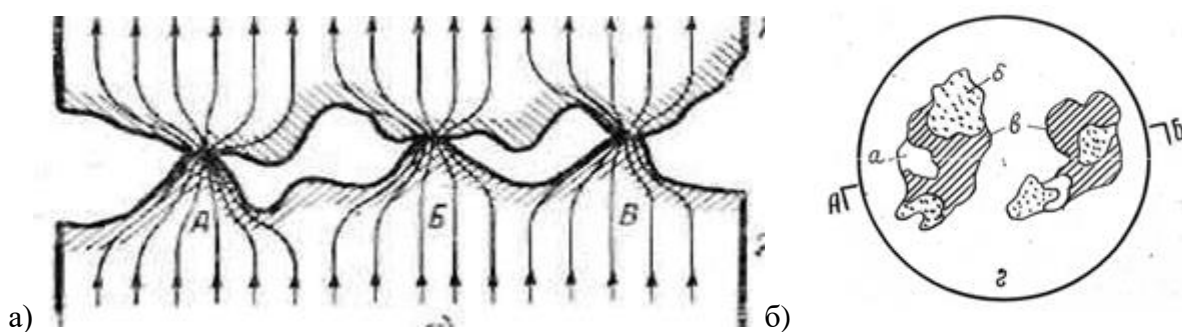


Рис.1 Схема контакта двух металлических поверхностей (а). Стрелками показан протекающий ток. (б) Схема поверхности контакта: a – чисто металлический контакт; b – квазиметаллический контакт; v – изолирующие плёнки; z – кажущаяся поверхность [3].

Таким образом, контактное сопротивление представляет собой сумму сопротивления стягивания $R_{ст}$, связанного с сужением проводящих областей (см. рис.1а) и сопротивления пленок $R_{пл}$

$$R = R_{ст} + R_{пл} \quad (3)$$

Контактное сопротивление зависит от класса чистоты поверхностей, силы прижима F и материала контактирующих элементов. Известна [4] эмпирическая формула для определения величины контактного сопротивления

$$R = \frac{k}{F^m} \quad (4)$$

где k – коэффициент, учитывающий силу прижима, который так же зависит от контактирующих металлов, F – усилие прижима в килограммах, m – коэффициент учитывающий эффективность контакта, которая определяется формой контактирующих элементов. Так, согласно [4], для контакта сталь – сталь $k = 7,6 \times 10^{-3}$, сталь – медь $k = 3,2 \times 10^{-3}$. При контакте острие – плоскость $m=0,5$. Подставляя эти величины в (3) для контакта стальной стержень-ферромагнитная пластина (Fe, или Co) при усилении прижима 1 Н получим контактное сопротивление $R_{г} = 7,6 \times 10^{-3}$ ом.

В свою очередь для чистой контактной поверхности связь сопротивления стягивания с радиусом контактной поверхности определяется соотношением [5]

$$R_{см} = \frac{\rho}{2a} \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление материала контакта. В общем случае определить размер проводящей области проблематично, поэтому проще, сначала определить сопротивление контакта R , а затем оценить по формуле 5 значение радиуса области проводимости a , принимая во внимание, что «стягивание» тока происходит не только из-за шероховатости поверхности, но и из-за уменьшения токопроводящей части в следствие образования на ней непроводящих пленок.

Экспериментальное определение контактного сопротивления структуры стержень-пленка

Измерение контактного сопротивления проводилось методом 4-х точки на макете структуры типа «стержень-пленка», изображенного на рис. 2.

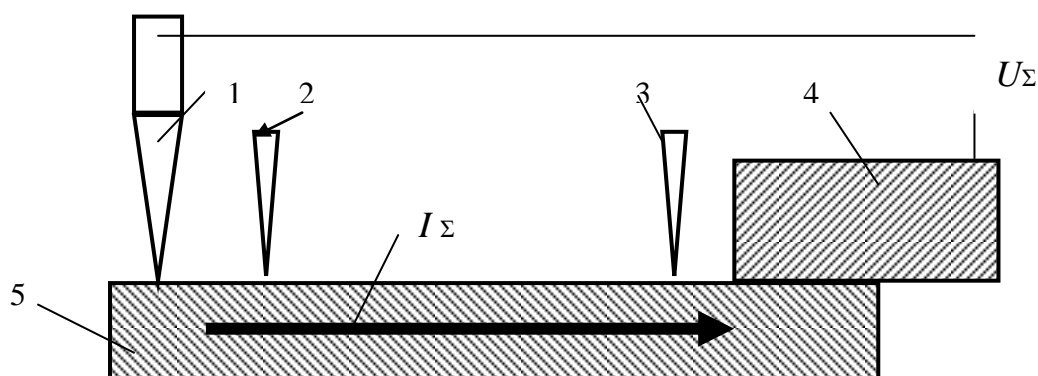


Рис.2. Схема проведения измерения контактного сопротивления в структуре стержень-пленка.

На рис.2 структура стержень–пленка образована стержнем 1 с заострением, контактирующим с проводящим элементом 5, в качестве которого в эксперименте могла быть использована как массивная металлическая пластина, так и пленка наноразмерной толщины, нанесенная на диэлектрическую подложку. Электрическая цепь в структуре замыкалась с помощью коллектора 4 (массивная медная пластина). К стержню и коллектору прикладывалось постоянное напряжение U_{Σ} , что приводило к возникновению в цепи электрического тока I_{Σ} . С помощью электродов 2, 3, связанных с милливольтметром измерялось соответствующее падение напряжения на отдельных участках исследуемой структуры. Так при контакте электрода 3 со стержнем 1 измерялось падение напряжения в точке контакта стержня с проводящим элементом $U_{ст}$, а при контакте электрода 2 с коллектором измерялось падение напряжения в контакте коллектора с проводящим элементом $U_{кол}$. При этом расстояние между соответствующим электродом 2 и стержнем или электродом 3 и коллектором делалось минимально возможным (менее мм).

Как отмечалось в [6], при использовании пленок наноразмерной толщины, в области контакта стержня с пленкой наблюдается сопротивление соизмеримое с сопротивлением пленки на участке между стержнем и коллектором. Природа этого сопротивления в [6] не рассматривается, поэтому для устранения величины неизвестной природы при определении контактного сопротивления, то есть сопротивления по поверхности контакта острия стержня с пленкой вместо наноразмерной пленки использовалась массивная стальная пластины. Это позволило свести к минимуму влияние сопротивления по толщине проводящего слоя под торцем острия стержня. Как показал эксперимент, в случае массивной стальной пластины оно пренебрежимо мало по сравнению с поверхностным сопротивлением контакта.

На рис. 3 представлены результаты таких измерений при использовании стальной пластины, контактирующей со стальным стержнем.

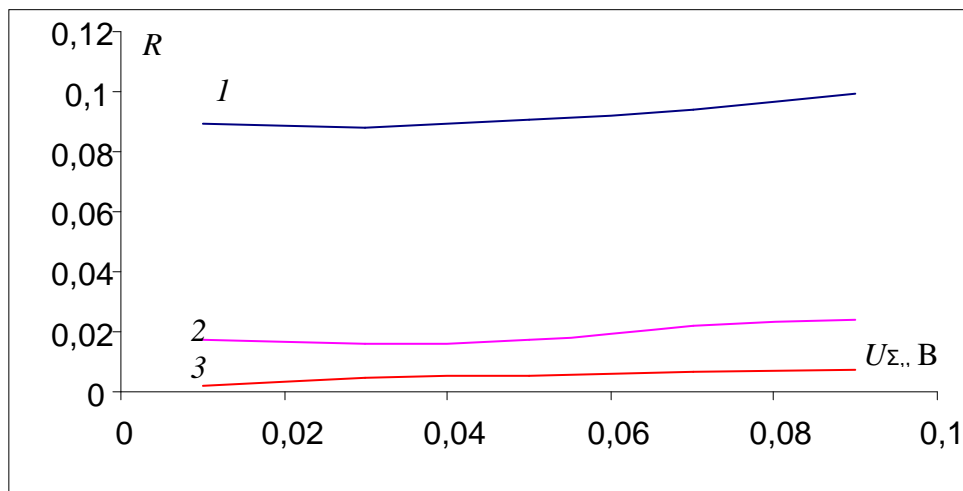


Рис.3. Зависимость от напряжения U_{Σ} общего сопротивления структуры R_{Σ} - кривая 1, кривая 2 - $R_{\text{стержень-пластина}}$ и кривая 3 $R_{\text{коллектор}}$ пластина коллектор. $R_{\text{коллектор}}$ на графике увеличено в 10 раз.

Результаты, представленные на рис.3 для контактного сопротивления, удовлетворительно соответствует расчетным величинам по формуле (4). При этом сопротивление контакта острого конца стержня почти в 20 раз больше

сопротивления контакта коллектора. Такое различие примерно соответствует различию площадей контактов рассматриваемых участков.

Зная контактное сопротивление в точке контакта стержень – пленка по формуле 4 можем оценить радиус токопроводящего участка контакта. Так при $R_{ст} \sim 2 \times 10^{-2}$ ом и удельном сопротивлении $\rho = 9,7 \times 10^{-8}$ ом·см, (ферромагнитных стержня и пластины) радиус токопроводящего участка $a \sim 2$ мкм. Получается, что непроводящие пленки на контактной поверхности более чем в 10 раз уменьшают площадь для прохождения тока.

Проведенные измерения позволяют определить реальную плотность тока пронизывающего границу раздела стержень пленка. Так при ток $I = 0,1$ А плотность тока $j \sim 8 \times 10^5$ А/см².

Таким образом, с учетом реального состояния контактирующих поверхностей стержня и пленки в спин-инжекционном генераторе на границе раздела стержня и пленки можем получить плотность тока необходимую для возникновения ТГц излучения.

Выводы

В магнитном переходе типа «стержень-пленка» размер проводящей поверхности контакта более чем в 10 раз меньше размера механического контакта. Это приводит к увеличению плотности тока, протекающего через границу раздела контактирующих стержня и пленки, в десятки раз, то есть до величины достаточной для возникновения ТГц излучения из области контакта.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ №15-07-00390, 16-07-00324

Литература

1. Вилков Е.А., Чигарев С.Г. Диапазон генерации спин-инжекционного ТГц генератора. Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. N12. URL <http://jre.cplire.ru/jre/nov16/4/text.pdf>
2. Электрические и электронные аппараты. Часть I. Физические явления в электрических контактах. Национальный исследовательский Томский университет.

3. А.А. Комаров, В.Н. Яковлев. Электрические контакты. Учебно-методическое пособие Самарский институт инженеров железнодорожного транспорта Самара 2001
4. Электрические контактные соединения. [электронный ресурс. URL: lektsii.org/2-1333.html]
5. Р.Хольм. Электрические контакты. М.1961. Иностранная литература. С.464.
6. С.Г.Чигарев, А.И.Крикунов, П.Е.Зильберман и др. Ток в системе зонд-тонкопленочная слоистая структура. Радиотехника и электроника, 2009, Т.54, №6, с. 742-746.

Ссылка на статью:

Е. А. Вилков, С. Г. Чигарев. Плотность тока, протекающего в контакте магнитного перехода типа стержень-пленка спин-инжекционного терагерцового генератора. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/4/text.pdf>