

**Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации  
Московский Физико-Технический Институт  
(Государственный Университет)  
Кафедра Физики и Техники Низких Температур  
Институт Физических Проблем им. П. Л. Капицы РАН**

---

**Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению 511600  
(прикладные математика и физика)**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА  
В ТРЁХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЕ Fe/Si/Fe**

**Студент 522 гр. Кузюк И.В.**

**Научный руководитель  
Доктор физико-математических наук,  
Профессор  
Н. М. Крейнс**

**Москва — 2009**

## **Оглавление**

<b>Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>Экспериментальные образцы .....</b>	<b>5</b>
<b>Схема экспериментальной установки.....</b>	<b>6</b>
<b>Возбуждение ФМР в трёхслойной системе Fe/Si/Fe.....</b>	<b>9</b>
<b>Экспериментальные результаты .....</b>	<b>10</b>
<b>Основные результаты дипломной работы.....</b>	<b>13</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>14</b>

## Введение

Магнитные многослойные системы, или сверхрешетки, представляющие собой периодические структуры, состоящие из чередующихся тонких слоев (толщиной от десятков до сотен ангстрем) ферромагнитного металла (Fe, Co, Ni...), разделённых тонкими неферромагнитными слоями (Ag, Au, Cr, Cu, Mn...), образуют особый класс материалов с необычными физическими свойствами. В этих структурах были открыты такие явления, как гигантское магнитосопротивление, антипараллельное и неколлинеарное упорядочение ферромагнитных слоев, осцилляции межслойного обмена в зависимости от толщины неферромагнитной прослойки. Практически все перечисленные выше явления впервые были обнаружены в системе Fe/Cr/Fe. В дальнейшем эти свойства были открыты и в других системах как с антиферромагнитной прослойкой (Mn), так и с прослойкой из немагнитных металлов (Cu, Au, Ag).

Большое число теоретических и экспериментальных работ посвящено изучению природы взаимодействия между соседними ферромагнитными слоями в таких системах. Многослойные структуры, состоящие только из двух ферромагнитных (ФМ) пленок, разделенных немагнитной (НМ) прослойкой, принято также называть «сэндвичами», а для структур с большим количеством чередующихся слоев ФМ и НМ часто используется термин «сверхрешетка». Благодаря косвенному обмену через прослойку неферромагнитного материала, намагниченности ферромагнитных слоев могут упорядочиться между собой ферромагнитным, антиферромагнитным, либо неколлинеарным образом. Прикладывая к образцу внешнее магнитное поле, можно менять угол между магнитными моментами и изучать зависимость энергии обмена от угла между векторами намагниченности слоев.

Данная работа посвящена исследованию системы Fe/Si/Fe. В отличие от хорошо изученных систем с металлическими прослойками, здесь роль прослойки играет полупроводник Si. Несмотря на довольно большое число работ (см., например, [1-5]), посвященных исследованиям межслойного взаимодействия в таких структурах, его механизм остаётся до сих пор неясным.

Для феноменологического описания межслойного обмена в таких структурах существует несколько теоретических моделей. Наиболее часто используется модель, так называемого «биквадратичного обмена», впервые введённая в работах [6] и [7].

Энергию взаимодействия ферромагнитных слоёв на единицу площади в рамках этой модели записывают следующим образом:

$$E = \frac{J_1}{M_S^2} (M_1, M_2) + \frac{J_2}{M_S^4} (M_1, M_2)^2$$

Здесь  $M_S$  – это модуль намагниченности в ФМ слоях.  $J_1$  и  $J_2$  – соответственно константы билинейного и биквадратичного обмена.

Для получения описываемых многослойных структур могут использоваться разные методики: молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), ионно-лучевое распыление, метод магнетронного напыления. Метод МЛЭ позволяет получать образцы наивысшего качества с точки зрения гладкости границ раздела слоев и кристаллографического совершенства получающихся пленок. Подбором технологических параметров удастся добиться величины шероховатости границ, не превышающей нескольких межатомных расстояний. При соответствующем выборе пары материалов, из которых изготавливается образец, кристаллические решетки слоев хорошо соответствуют друг другу, так что образец оказывается монокристаллическим по всей своей толщине.

В данной работе исследовались магнитные свойства трехслойных структур Fe/Si/Fe, выращенных методом МЛЭ на подложке MgO. Исследования магнитных свойств проводились методом ферромагнитного резонанса (ФМР). В работе изучались зависимости частот акустической и оптической мод ФМР от величины внешнего постоянного магнитного поля. Измерения были проведены при различных температурах в пределах от 77 К до комнатной.

## Экспериментальные образцы

В эксперименте использовались образцы Fe/Si/Fe, выращенные методом МЛЭ на подложке MgO (Рис.1). Толщины слоёв железа составляли  $70\text{Å}$ , а кремния  $\sim 10\text{Å}$ . Были изучены 2 образца отличающиеся разной температурой  $T_{\text{Si}}$  подложки в процессе напыления слоя кремния. Для образца I  $T_{\text{Si}}=77\text{ K}$ , для образца II  $T_{\text{Si}}=300\text{ K}$ . В качестве буферного слоя использовалась пленка серебра толщиной  $1000\text{Å}$ . Перед напылением серебряного буфера на подложку осаждалась тонкая «зародышевая» железная пленка, которая предотвращала рост образование в слое Ag кристаллитов с различной кристаллографической ориентацией.

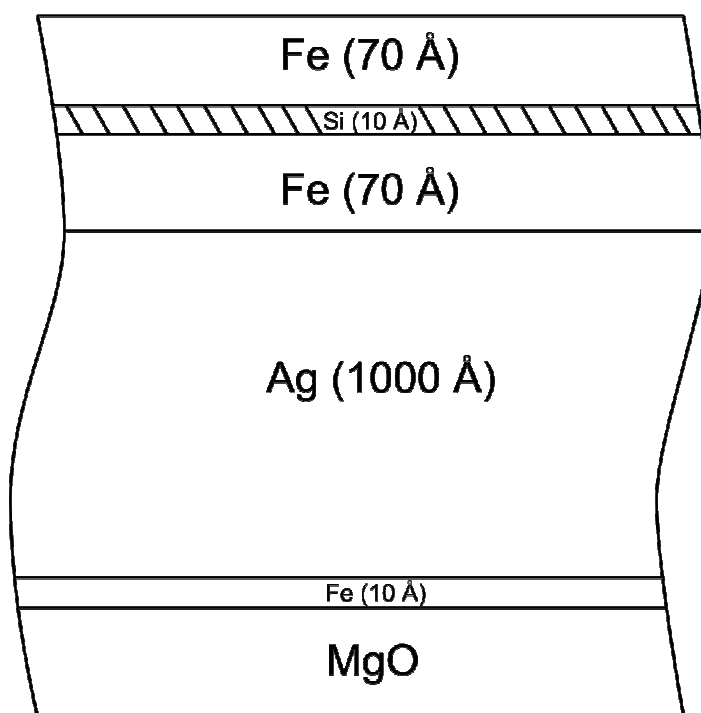


Рис. 1. Структура экспериментальных образцов.

## Схема экспериментальной установки

На рисунке 2 представлена принципиальная схема установки – спектрометра ферромагнитного резонанса.

В эксперименте использовались генераторы СВЧ излучения на основе отражательных клистронов с выходной мощностью до 20 мВт и диапазоном частот от 7 до 37 ГГц. Генератор соединялся с помощью волновода с резонатором, в котором находился образец. Далее второй волновод выходил из резонатора и оканчивался детектором. Для стабилизации частоты генерации использовался модуль автоподстройки частоты (АПЧ).

Магнитное поле создавалось электромагнитом, измерения проводились в диапазоне от 0 до 7 кЭ. Величина магнитного поля измерялась датчиком Холла.

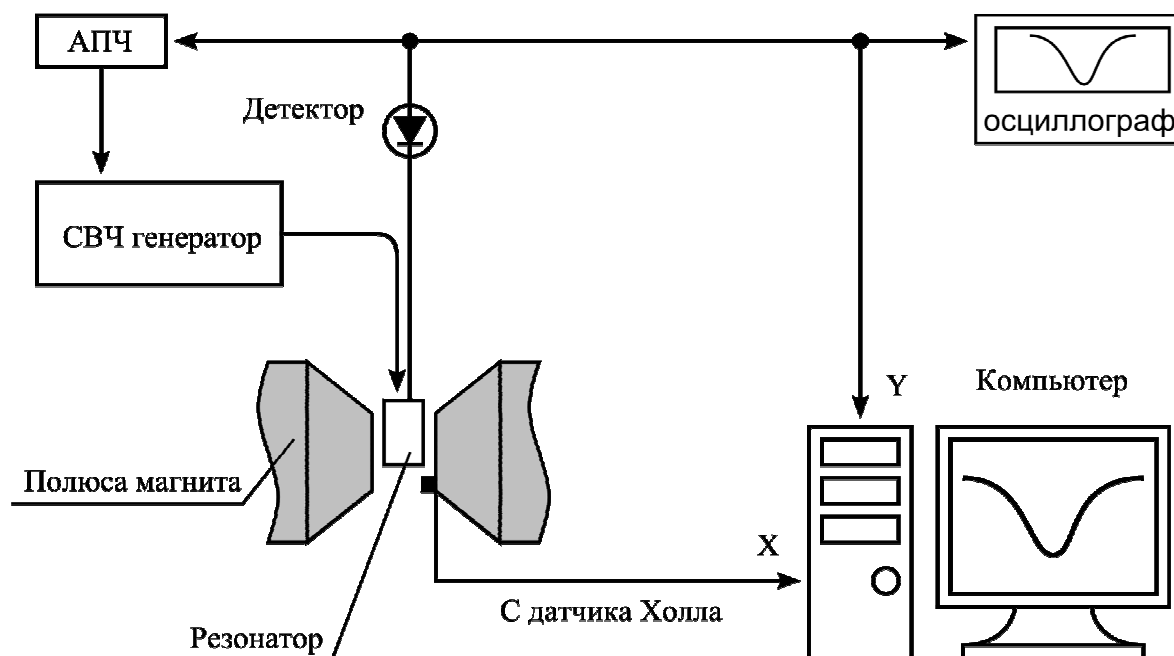


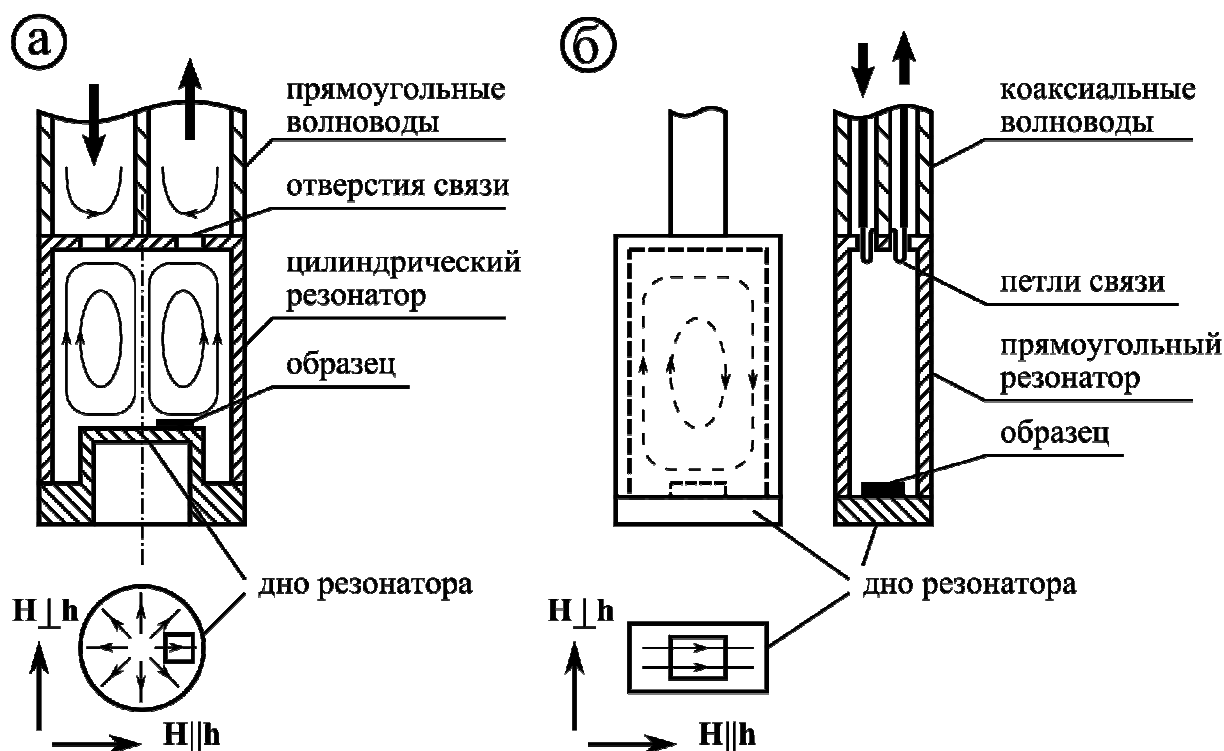
Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Сигналы с датчика Холла и детектора обрабатывались платой АЦП, и на компьютере фиксировалась зависимость поглощения от внешнего магнитного поля.

Для измерения использовались цилиндрические и прямоугольный резонаторы (рис. 3а, б). Образец располагался на дне резонатора. В цилиндрических резонаторах, рис. 2а, возбуждалась одна из магнитных мод  $H_{011}$ ,  $H_{012}$ ,  $H_{013}$ . Для этих типов колебаний переменное СВЧ магнитное поле направлено по радиусу на дне резонатора. Таким образом, при размещении образца на дне резонатора могли реализовываться два типа возбуждения ФМР: поперечное, когда СВЧ поле перпендикулярно внешнему статическому магнитному полю, и продольное, в случае СВЧ поля, параллельного

внешнему. При этом в обоих случаях как постоянное, так и переменное поле лежат в плоскости образца. Для устранения электрических колебаний  $E_{11p}$ , вырожденных с  $H_{01p}$ , имелся зазор между дном и боковой поверхностью резонатора, исключая радиальные токи.

При измерении на частоте 7 ГГц использовался прямоугольный резонатор, в котором возбуждалось колебание  $E_{110}$  (рис. 3б). На дне резонатора, где помещается образец, магнитное поле направлено параллельно его длинной стороне. Таким образом, аналогично ситуации с цилиндрическим резонатором, в зависимости от направления поля реализуется либо поперечная, либо продольная геометрия возбуждения резонанса.



**Рис. 3. Распределение магнитных полей и расположение образца внутри резонаторов.**

Для градуировки магнитного поля на дно резонатора помещалось реперное парамагнитное вещество с известным g-фактором.

Резонаторы помещались в стеклянную колбу, которую можно было откачивать, или заполнять теплообменным газом (гелием) (рис. 4). Эта колба, в свою очередь, помещалась в азотный дьюар. Измерения проводились в диапазоне температур от 77 К до 300 К. Нагревание производилось с помощью нагревателей из константовых проволок, намотанных на резонатор. Пропуская через них ток, можно было регулировать температуру в резонаторе. Для определения температуры использовалась термопара медь-константан.

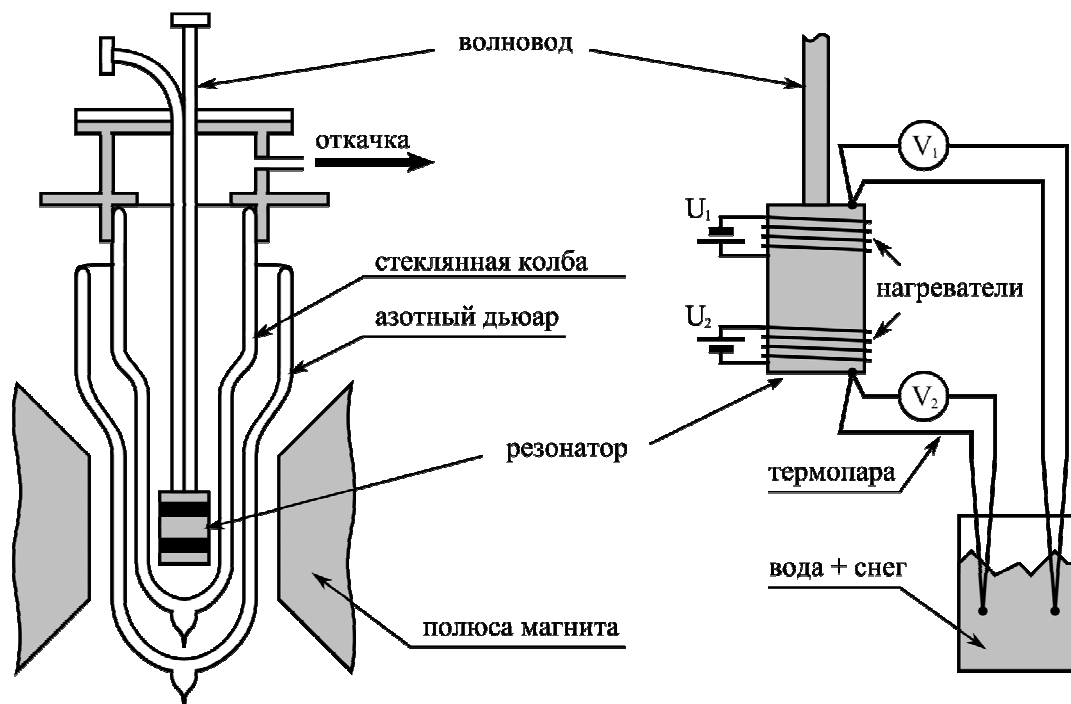


Рис. 4. Схема измерений ФМР при низких температурах

## Возбуждение ФМР в трёхслойной системе Fe/Si/Fe

Уединенный магнитный момент, помещённый в магнитное поле  $H$ , совершает прецессию с частотой  $\omega = \gamma H$ , где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение. Переменная составляющая намагниченности перпендикулярна магнитному полю. При наложении переменного поля перпендикулярного статическому полю, наблюдается резонансное поглощение на частоте  $\omega$ . Если переменное поле параллельно статическому, то резонанса не наблюдается.

В случае трёхслойной системы Fe/Si/Fe имеется два магнитных момента, связанных обменным взаимодействием через немагнитную прослойку. Имеется два типа колебаний: колебание моментов в фазе (рис. 5а), и в противофазе (рис. 5б). Соответственно имеется две собственные частоты. Колебание в фазе называют акустической модой, а колебание в противофазе – оптической. При этом акустическая мода возбуждается переменным полем, перпендикулярным статическому (поперечная накачка), а оптическая – переменным полем, параллельным статическому (продольная накачка).

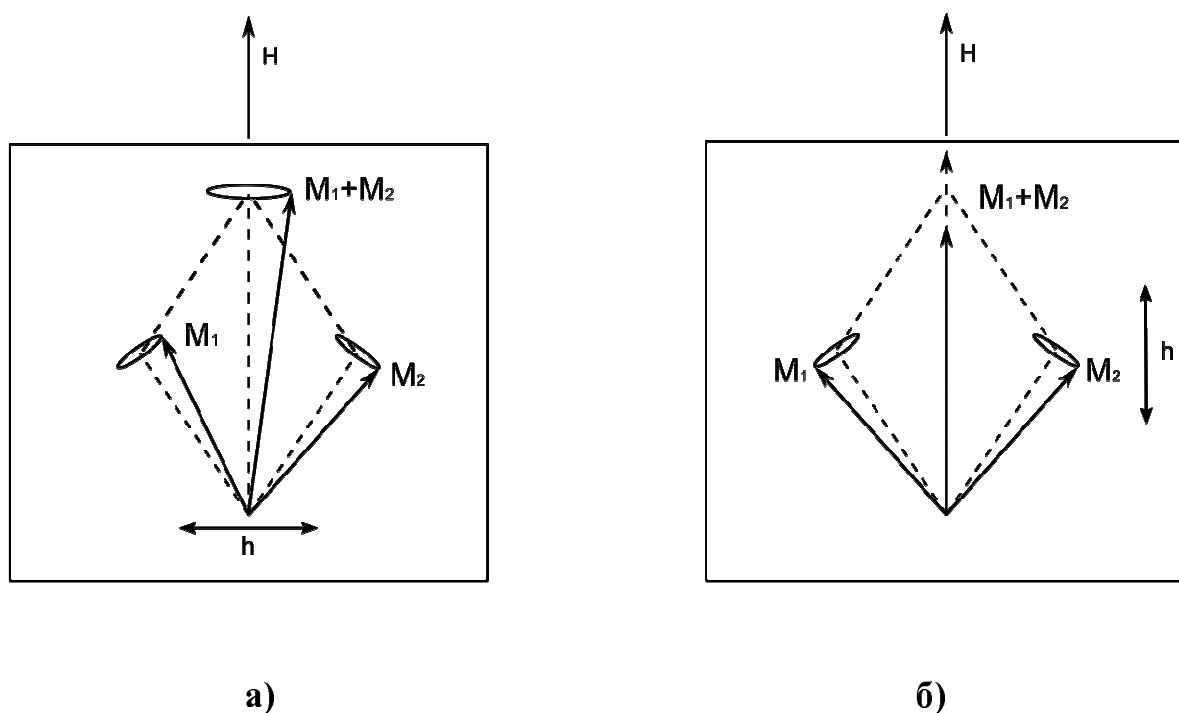


Рис. 5. Колебания намагниченности при поперечной (а) и продольной (б) накачках.

Следует сказать, что в данной работе использовались плёнки со сравнительно большой площадью поверхности, поэтому, как видно из рис. 3а, осуществлялась одновременно и продольная и поперечная накачки. Для увеличения интенсивности возбуждения относительно слабой оптической моды, образцы помещались в резонаторе таким образом, чтобы обеспечить максимальную продольную компоненту СВЧ накачки.

## Экспериментальные результаты

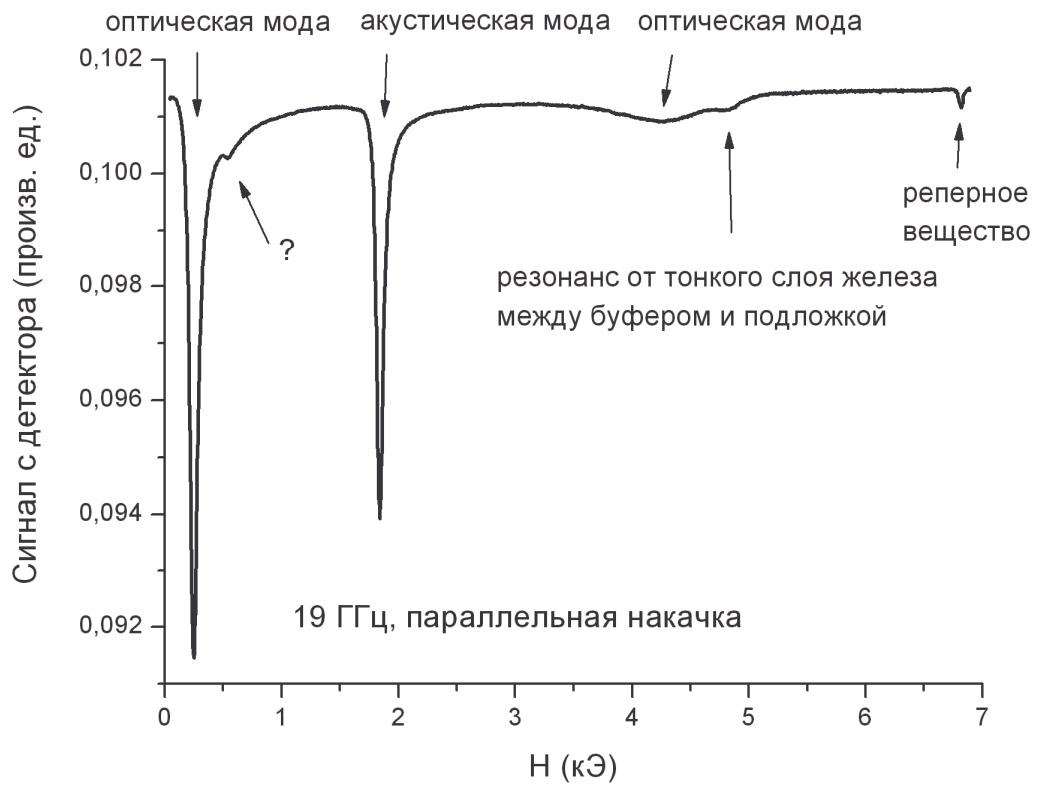
На рис. 6 представлена одна из записей зависимости поглощения в образце I от поля  $H$  для частоты 19 ГГц при комнатной температуре. В спектре поглощения имеется ряд линий, происхождение которых удается идентифицировать по их частотной зависимости. В поле  $\sim 2$  кЭ (рис. 6) наблюдается акустическая линия. Эта линия наиболее интенсивна при поперечной накачке, но не исчезает полностью и в случае преимущественно продольной накачки. Слева и справа от акустической наблюдаются линии, соответствующие оптической колебательной моде. Появление двух оптических линий в спектре связано с тем, что зависимость частоты оптической моды от поля  $f_{\text{opt}}(H)$  для образца I имеет максимум. Оптическая линия слева от акустической соответствует возрастающему участку  $f_{\text{opt}}(H)$ , а справа от акустической — спадающему участку  $f_{\text{opt}}(H)$ . На рис. 7а представлена результирующая зависимость  $f_{\text{opt}}(H)$  и  $f_{\text{ac}}(H)$  для образца I при комнатной температуре.

Помимо линий поглощения, связанных непосредственно с изучаемой структурой, записываемые спектры (рис. 6) содержат ряд дополнительных пиков. Узкая линия в поле  $\sim 7$  кЭ — резонанс в реперном веществе. Ещё одна линия в области сильных полей соответствует резонансу в слое железа, напылённом между подложкой и буфером. Происхождение ещё одной линии при величине поля 0,7 кЭ не было установлено.

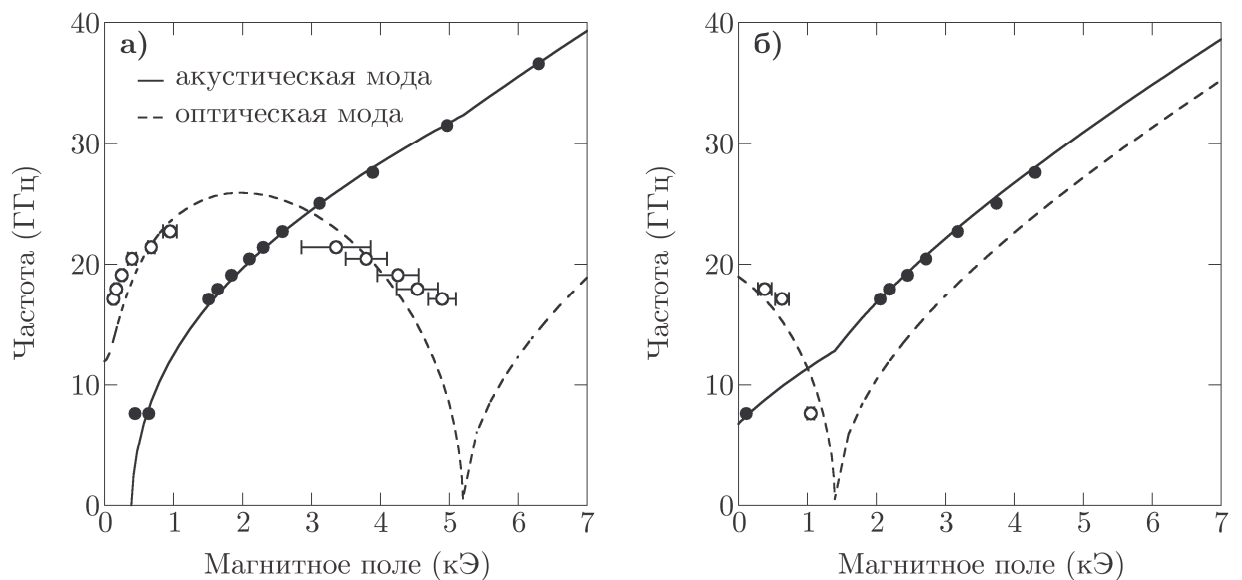
Спектр образца II (рис. 7б), в отличие от образца I, демонстрировал монотонно убывающую зависимость частоты оптической моды от поля. При этом величины резонансных полей для оптической моды образца II гораздо меньше, чем у убывающей ветви оптической моды образца I. Эта разница демонстрирует существенное различие параметров межслойного обмена для двух исследованных образцов.

Исследование температурных зависимостей спектров образца II в диапазоне 77-300 К показало сильную зависимость частоты оптической моды от температуры. На рис. 8 представлена серия кривых поглощения в зависимости от температуры для этого образца. Как видно из рисунка, ветвь оптической моды при понижении температуры сдвигается вправо. Этот факт свидетельствует об увеличении поля насыщения структуры, а следовательно о росте величины межслойного обмена при уменьшении температуры.

Предварительное исследование температурной зависимости спектров образца I показало аналогичное образцу II поведение величины межслойного обмена.



**Рис. 6.** Запись кривой поглощения для образца I на частоте 19 ГГц при комнатной температуре.



**Рис. 7.** Спектр оптической и акустической мод для образца I (а) и образца II (б) при комнатной температуре. Пунктирные и сплошные линии – спектры акустической и оптической ветвей в приближении модели биквадратичного обмена.

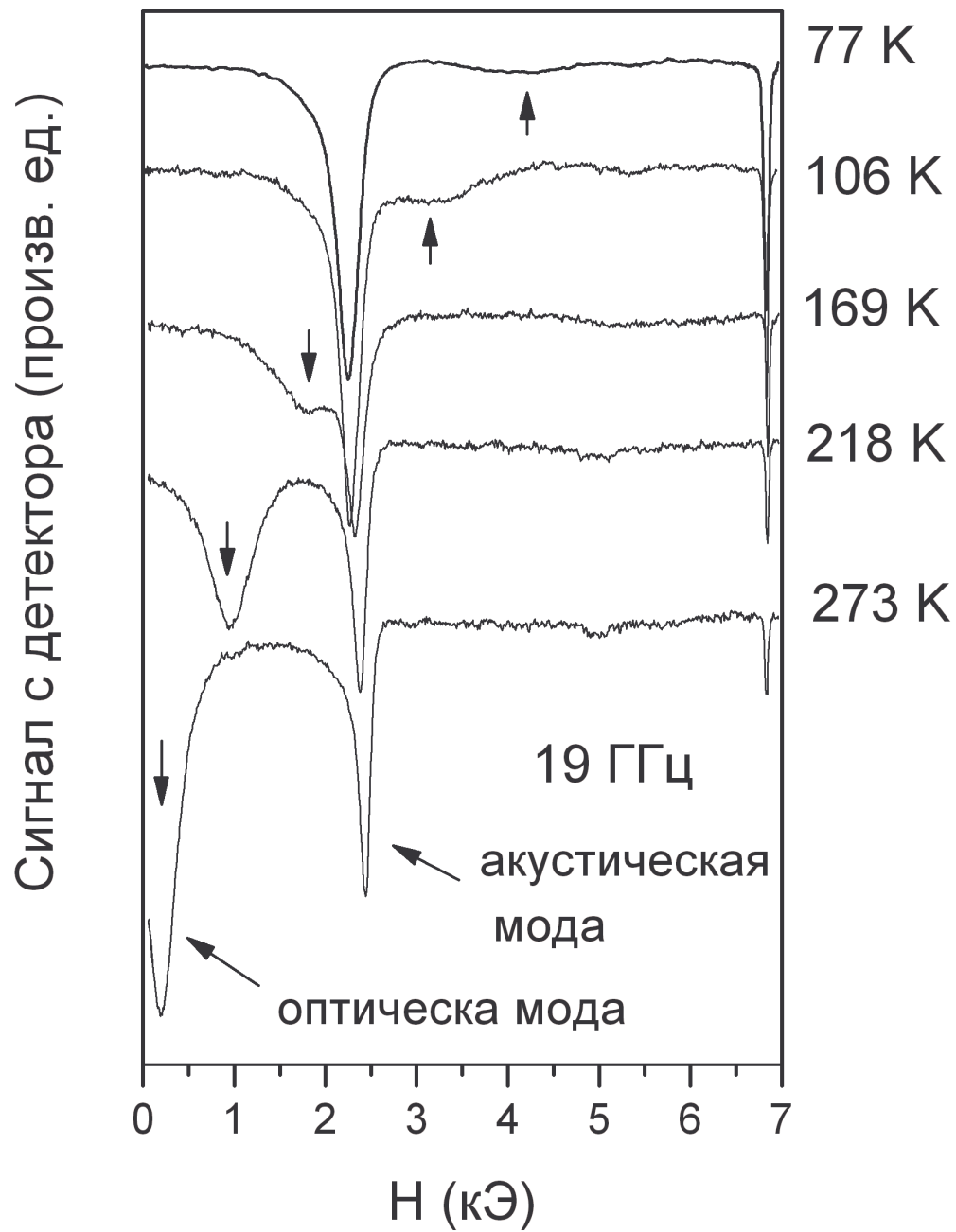


Рис. 8. Зависимость кривых поглощения от температуры для образца II.

## Основные результаты дипломной работы:

- 1) Исследованы температурные зависимости спектров ФМР для двух образцов Fe/Si/Fe.
- 2) В спектрах ФМР наблюдаются, как акустическая, так и оптическая ветви резонансного поглощения.
- 3) Обнаружена сильная температурная зависимость частоты оптической моды в диапазоне 77 – 300 К
- 4) Характер температурной зависимости частоты оптической моды (увеличение значения резонансного поля с понижением температуры) свидетельствует о росте межслойного взаимодействия с уменьшением температуры.

В заключении мне хотелось бы в первую очередь поблагодарить моего научного руководителя Н. М. Крейнес за её внимательное руководство и усилия, давшие мне возможность выполнить эту работу.

Хочу выразить благодарность А. Б. Дровосекову за терпение и понимание, а также помощь в освоении методики проведения эксперимента и в осознании сути явления.

Благодарю Д. И. Холина за постоянное внимание, за интересные обсуждения эксперимента, помогавшие мне в понимании эксперимента.

Я благодарю А. И. Смирнова за его руководство учебой на кафедре, за те курсы, которые он прочитал. Без знаний, полученных из этих курсов, проведение данной работы было бы затруднительным.

Искренне благодарю А. Ф. Андреева за предоставленную возможность выполнить данную работу в Институте Физических Проблем им. П. Л. Капицы.

## Список литературы:

1. S. Toscano, B. Briner, H. Hopster and M. Landot, *J. Magn. Magn. Matter* 114, L6 (1992).
2. G. J. Strijkers, J. T. Kohlhepp, H. J. M. Swagten, and W. J. M. de Jonge, *PRL* 84, 1812 (2000).
3. Bürgler, M. Buchmeier, S. Cramm et al., *J. Phys.: Condens. Matter* 15, S443 (2003).
4. A. Paul, M. Buchmeier, D. Bürgler et al., *Phys. Rev. B* 77, 184409 (2008).
5. Н. Варнаков, J. Bartolomé, J. Sesé, С. Г. Овчинников и др., *ФТТ* 49, 1401 (2007).
6. M. Ruhrig, R. Schäfer, A. Hubert, R. Mosler, J. A. Wolf, S. O. Demokritov, P. Grünberg, *Phys. Stat. Sol. A* **125**, 635 (1991).
7. B. Heinrich, J. F. Cochran, M. Kowalewski, J. Kirschner, Z. Celinski, A. S. Arrott, and K. Myrtle, *Phys. Rev. B* **44**, 9348 (1991).