

На правах рукописи

КОНОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА НА РАСПЫЛЕНИЕ
И СОСТАВ ПОВЕРХНОСТИ НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Специальность 01.04.04. – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре физической электроники физического факультета Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук

Шелякин Лев Борисович

доктор физико-математических наук

Юрасова Вера Евгеньевна

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Мартыненко Юрий Владимирович

доктор физико-математических наук

Бачурин Владимир Иванович

Ведущая организация: Московский авиационный институт (государственный технический университет)

Защита состоится _____ 2008г., в 16⁰⁰ часов, на заседании диссертационного совета Д 501.001.66 в МГУ по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, физический факультет, аудитория 5-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан _____ 2008 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Ершов А.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В последнее время возрос интерес к исследованию эмиссии вторичных частиц (атомов, ионов, электронов и фотонов) при ионном облучении твердого тела вблизи температур фазовых переходов второго рода. Этот интерес обусловлен как необходимостью решения фундаментальных вопросов взаимодействия ионов с поверхностью твердого тела, так и быстрым ростом практического использования процесса распыления для модификации и анализа твердых тел.

В первых работах этого нового направления исследования было показано, что распыление никеля скачкообразно увеличивается при переходе мишени из ферромагнитного в парамагнитное состояние; кроме того, было обнаружено резкое возрастание (в 2 раза) коэффициента распыления вблизи температуры Кюри.

Изменение распыления вблизи магнитного фазового перехода указывает на интересный эффект: влияние ориентации спинов на вторичную эмиссию атомных частиц (так называемый, «квантовый эффект в распылении»). Теоретический анализ и численное моделирование показали, что этот эффект может быть частично объяснен изменением потенциала взаимодействия атомов, движущихся в кристалле. Такое изменение связано с тем, что ориентация спинов влияет на распространение каскадов столкновений, на энергию связи атомов мишени и, следовательно, на процесс распыления.

Несмотря на то, что к настоящему времени выполнен целый ряд работ по исследованию распыления и вторичной ионной эмиссии ферромагнитных материалов, остается еще много неизученных зависимостей. В частности, не ясно, как влияет угол падения ионов на изменение распыления поликристалла и монокристалла ферромагнетика при магнитном фазовом переходе. Кроме того, отсутствуют

экспериментальные работы, направленные на изучение характеристик ионного распыления и состава поверхности ферромагнитных сплавов в широком диапазоне температур, включающем как точку Кюри самого сплава, так и точки Кюри составляющих его компонент. Между тем, такие работы важны не только для понимания механизмов вторичной эмиссии нейтральных и заряженных частиц из ферромагнетиков, но и для практического использования. Сюда относится, например, поиск специальных магнитных конструкционных материалов и условий облучения для уменьшения их разрушения в плазменных установках. Разработка количественных методов ионно-лучевой диагностики также требует подробной информации об особенностях вторичной ионной эмиссии частиц в широком диапазоне температур, включающем точки фазовых переходов.

В связи со сказанным, представляло интерес провести исследование температурной зависимости ионного распыления для ферромагнитных сплавов. Были выбраны следующие железоникелевые сплавы с близким элементным составом и разной точкой Кюри: инвар Н35 (35%Ni,65%Fe, $T_c=275^\circ\text{C}$), пермаллой Н40 (40% Ni,60%Fe, $T_c=325^\circ\text{C}$) и супермаллой НМ79 (79%Ni, 16%Fe, 5%Mo, $T_c=345^\circ\text{C}$). Эти ферромагнитные сплавы отличаются уникальными свойствами и широко используются в промышленности, военной и космической технике. Инвар Н35 обладает исключительно низким коэффициентом теплового расширения, пермаллой Н40 имеет малую коэрцитивную силу и низкие потери на гистерезис, а супермаллой (или молибденовый пермаллой) НМ79 характеризуется максимальной магнитной проницаемостью и большим электросопротивлением.

Цель работы

Целью настоящей работы являлось изучения особенностей температурной зависимости распыления никеля и ферромагнитных

железоникелевых сплавов с разной точкой Кюри. Ставились следующие конкретные задачи,

1. Экспериментальное исследование угловой зависимости коэффициентов ионного распыления поликристаллического никеля в ферромагнитном и парамагнитном состояниях.
2. Компьютерное моделирование методом молекулярной динамики угловой зависимости коэффициента распыления поликристалла и грани (001) монокристалла никеля в ферромагнитном и парамагнитном состояниях.
3. Экспериментальное изучение коэффициента распыления ферромагнитных сплавов – инвара Н35 (35%Ni65%Fe), пермаллоя Н40 (40%Ni60%Fe) и молибденового пермаллоя НМ79 (79%Ni16%Fe5%Mo) в широком диапазоне температур, включающем как точку Кюри самих сплавов, так и точки Кюри компоненты.
4. Исследование изменения состава поверхности железоникелевых сплавов при магнитном фазовом переходе.

Научная и практическая ценность

Проведено экспериментальное исследование и численное моделирование процесса ионного распыления поликристалла никеля при температурах, соответствующих ферромагнитному (f) и парамагнитному (p) состояниям мишени. В результате экспериментов были получены абсолютные значения коэффициентов распыления Y_f и Y_p поликристаллического никеля при бомбардировке мишени ускоренными ионами под углами от 0^0 до 65^0 от нормали к поверхности.

Экспериментально и путем расчета установлено, что для поликристаллического никеля разница ΔY коэффициентов распыления в ферромагнитном и парамагнитном состояниях резко возрастает с ростом угла падения ионов на мишень. Численное моделирование распыления показало, что для монокристалла никеля возрастание ΔY наблюдается также

и при падении ионов вблизи открытых каналов кристаллической решетки. Таким образом, увеличение разницы между коэффициентами распыления никеля в ферромагнитном и парамагнитном состоянии наблюдается при наклонном падении ионов и при падении ионов вблизи открытых каналов кристаллической решетки. Это может быть объяснено тем, что в таких случаях атомы распыляются в результате более длинных цепочек соударений, и эффект изменения потенциала взаимодействия атомов при переходе из ферромагнитного в парамагнитное состояние накапливается (кумулятивный эффект в распылении).

Исследованы температурная зависимость коэффициента распыления $Y(T)$ и состав поверхности для монокристаллов железоникелевых сплавов с разной точкой Кюри: инвара Н35 (35%Ni65%Fe) с $T_c = 275^\circ\text{C}$, пермаллоя Н40 (40%Ni60%Fe) с $T_c=325^\circ\text{C}$ и пермаллоя НМ79 (79% Ni 16% Fe 5% Mo) с $T_c = 345^\circ\text{C}$. Показано, что при переходе этих сплавов из ферро- в парамагнитное состояние их распыление увеличивается.

Обнаружен немонотонный характер температурной зависимости распыления исследованных сплавов: имеются ярко выраженные максимумы вблизи точек Кюри сплавов и никеля. Для зависимости $Y(T)$ сплава Н40 наблюдается тенденция к образованию третьего максимума - при приближении к температуре Кюри железа.

Установлено, что концентрация примесей – кислорода и углерода на поверхности сплавов Н35 и НМ79 уменьшается вблизи их точек Кюри за счет увеличения интенсивности десорбции О и диффузии С в этой области температур.

Обнаруженные особенности температурных зависимостей распыления ферромагнитных сплавов и изменения состава примесей на их поверхности при ионном облучении важны для практического применения. Полученные результаты необходимо учитывать для развития методов анализа поверхности ионными пучками, а также при практическом использовании железоникелевых сплавов в условиях ионного облучения.

Основные положения, выносимые на защиту

- Показано, что при переходе всех исследованных Fe-Ni сплавов из ферро- в парамагнитное состояние их распыление увеличивается.

- Получено двукратное возрастание разницы ΔY коэффициентов распыления поликристалла никеля в ферромагнитном и парамагнитном состояниях при переходе от нормального падения ионов к наклонному (65° от нормали). Это объясняется тем, что при наклонном падении ионов атомы распыляются в результате более длинных цепочек соударений, и эффект изменения потенциала взаимодействия при магнитном фазовом переходе накапливается (кумулятивный эффект в распылении).

- Методом МД моделирования установлено возрастание разницы ΔY коэффициентов распыления монокристалла никеля в ферромагнитном и парамагнитном состояниях при ионной бомбардировке в направлениях, близких к направлениям открытых каналов кристаллической решетки.

- Экспериментально получена немонотонная температурная зависимость коэффициентов распыления $Y(T)$ и состава поверхности для монокристаллов железоникелевых сплавов с разной точкой Кюри: инвара Н35 (35%Ni65%Fe) с $T_c = 275^\circ\text{C}$, пермаллоя Н40 (40%Ni60%Fe) с $T_c = 325^\circ\text{C}$ и пермаллоя НМ79 (79% Ni 16% Fe 5% Mo) с $T_c = 345^\circ\text{C}$.

- Обнаружено, что температурная зависимость распыления $Y(T)$ грани (111) монокристаллов инвара и пермаллоя, имеет максимумы вблизи точек Кюри сплавов и никеля. В области высоких температур наблюдается тенденция к образованию третьего максимума - при приближении к точке Кюри железа ($T_c = 840^\circ\text{C}$).

- Наличие максимумов распыления при температурах Кюри компонент Fe-Ni сплавов объяснено наличием областей статистических флуктуаций намагниченности, центрами которых являются атомы никеля или железа, окруженные только атомами того же сорта. Поэтому на поверхности сплава возможно образование островков из атомов компонент сплава и, вследствие этого, возникновение максимумов распыления вблизи их точек Кюри.

- Установлено, что концентрация примесей – кислорода и углерода на поверхности инвара Н35 и пермаллоя НМ79 уменьшается вблизи их точек Кюри за счет увеличения интенсивности десорбции О и диффузии С в этой области температур.

Апробация работы.

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях – 4. Результаты, вошедшие в диссертацию, были представлены на 6-и конференциях:

- 8th Joint Vacuum Conference, Pula, Croatia, 4-9 June 2000.
- Международный симпозиум по диагностике поверхности ионными пучками, Запорожье, Украина, октябрь 2000.
- XV Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» ВИП-2001, Москва, 27-31 августа 2001.
- 3^{-ая} Республиканская конференция по физической электронике, Ташкент, Узбекистан, 2002.
- XVI Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» ВИП-2003, Звенигород, 25-29 августа 2003.
- 20th International conference on atomic collisions with solids (ICACS-20), Italy, Genova, 3-6 July, 2004.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 140 страниц текста, включая 30 рисунков, и список литературы из 166 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит подробный обзор литературы по влиянию магнитного фазового перехода на процесс распыления нейтральных и заряженных атомных частиц. В первом параграфе излагаются результаты

исследований температурной зависимости распыления ферромагнетиков, описываются полученные экспериментальные зависимости, рассматривается расчет тонкой структуры кривой коэффициента распыления на основе флуктуационной теории намагничивания. Второй параграф посвящен анализу влияния температуры на вторичную ионную эмиссию (ВИЭ), ферромагнитных материалов, приводятся экспериментальные данные, дается качественная оценка изменения ВИЭ при магнитном фазовом переходе. В третьем параграфе сделан обзор аномалий температурной зависимости различных процессов в ферромагнетиках.

Во второй главе описываются экспериментальные и расчетные методики, используемые в работе. Приведена конструкция ионного источника, фокусирующей системы, рабочей камеры экспериментальной установки и держателей образцов с интегрированной системой поддержания температуры. Обсуждается способ измерения коэффициентов распыления весовым методом и с использованием кварцевых микровесов.

Рассматривается методика проведения численного расчета для моделирования процесса распыления, включая алгоритм построения мишени и параметров потенциалов взаимодействия.

Взаимодействие между сталкивающимися ионами и атомами мишени рассчитывалось в работе методом молекулярной динамики с использованием подвижного блока связанных атомов. Термические смещения атомов считались некоррелированным и оценивались исходя из выражения для свободной энергии. Неупругие потери энергии рассчитывались по формуле Фирсова.

Использовался потенциал взаимодействия:

$$U(r) = (A_b/r) \exp(-r/a_f) + A \exp(-r/a_{bm}) - D \exp(-\beta(r-r_0)^2). \quad (1)$$

Здесь первое слагаемое – потенциал Бора, второе – потенциал Борна-Майера, третье – распределение Гаусса, где $A_b = Z_1 Z_2 e^2$, $a_f = 0.8853 a_0 (Z_1^{1/2} + Z_2^{1/2})^{-2/3}$, $A = (Z_1 Z_2)^{3/4}$, Z_1 , Z_2 – атомные номера

взаимодействующих частиц, a_0 – радиус Бора, r - вектор, определяющий положение частицы, $b_{\text{ам}}=0.219\text{\AA}$. Константы r_0 , D , β в распределении Гаусса были получены подгонкой потенциальной энергии кристалла под значения постоянной решетки, энергии связи и модуля упругости для недеформированного кристалла при комнатной температуре (т.е. для никеля это ферромагнитное состояние), что дало: $r_0=2.4369\text{\AA}$, $D = 0.8018$ эВ, $\beta = 2.1813 \text{\AA}^{-2}$. Полученный таким образом комбинированный потенциал хорошо описывает взаимодействие атомов с энергиями в диапазоне от тепловых до десятков кэВ.

Магнитная компонента потенциала взаимодействия, вызывающая увеличение энергии связи атомов с параллельными спинами, была рассчитана ранее аналитически М.В.Кувакиным. В общем случае потенциал взаимодействия двух атомов магнитного материала может быть записан как: $U_f = U_p + \Delta U$, где U_f и U_p – потенциалы взаимодействия в случае параллельной и произвольной ориентации спинов, соответственно. Спин-зависящая поправка ΔU (определенная по модели Томаса-Ферми в приближение Слэттера для волновых функций $3d$ -электронов с нескомпенсированными спинами) бралась равной: $\Delta U_{\text{Ni}} = -5.16 \exp(-0.811r^2)$, где ΔU измеряется в эВ, а r – в ангстремах.

Третья глава посвящена экспериментальному и компьютерному исследованию угловой зависимости распыления никеля в ферро- и парамагнитном состоянии. Получены экспериментальные и расчетные данные по угловой зависимости распыления поликристаллического никеля в ферромагнитном и парамагнитном состоянии при бомбардировке ионами неона с энергией 10 кэВ. Результат показан на рис.1, откуда следует хорошее соответствие результатов расчета и эксперимента. Видно, что кривая угловой зависимости коэффициента распыления $Y_p(\alpha)$ для Ni в парамагнитном состоянии лежит всегда выше чем $Y_f(\alpha)$; разница между $Y_p(\alpha)$ и $Y_f(\alpha)$ сначала возрастает с ростом угла α , затем уменьшается (для

углов бóльших 60°). Значение $\Delta Y = \{(Y_p - Y_f)/Y_f\} 100\%$ составляет 9%, 16%, 20% и 18% для углов $\alpha = 0^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$ и 60° , соответственно.

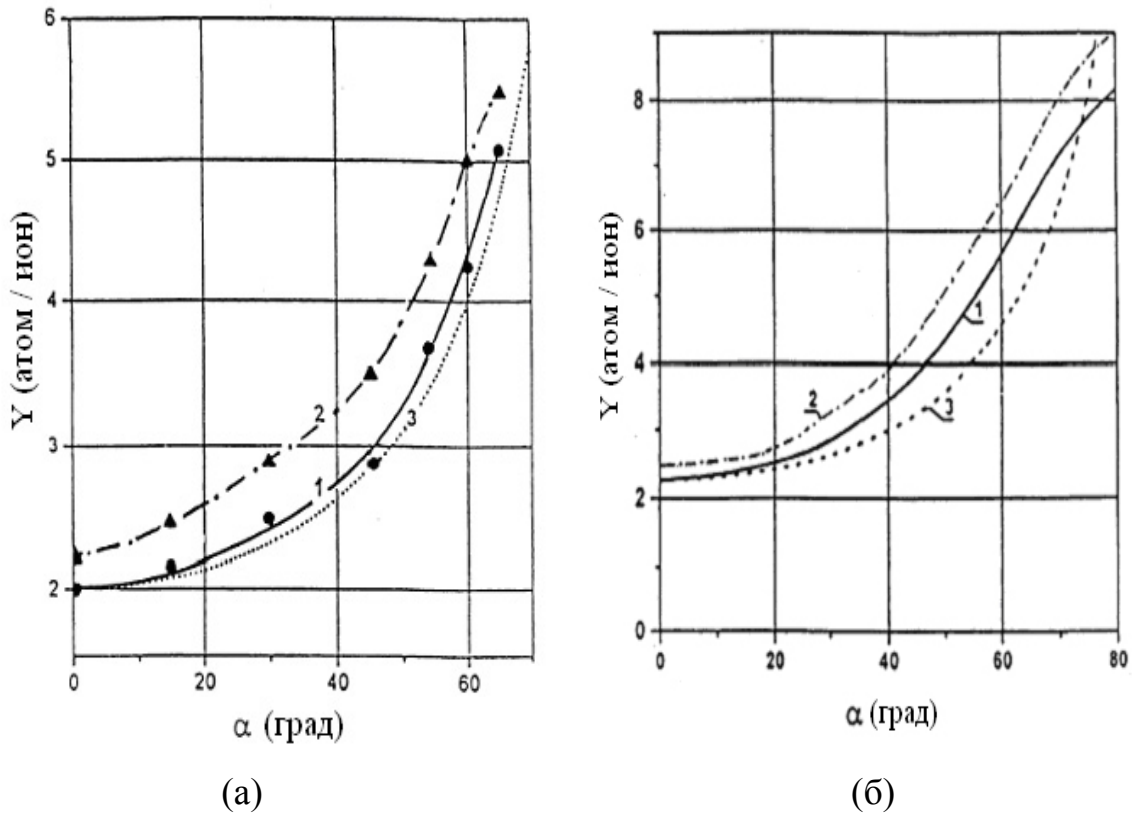
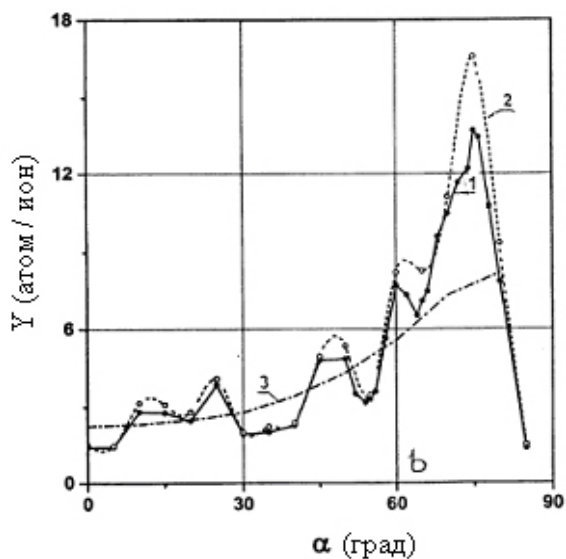
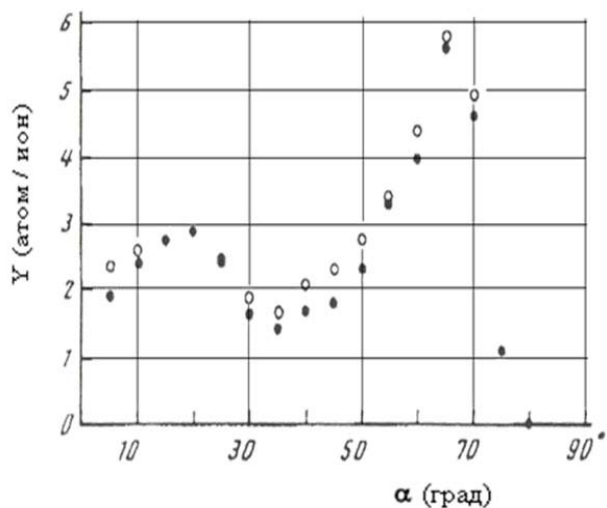


Рис.1. Угловая зависимость коэффициента распыления Y поликристаллического Ni при бомбардировке ионами Ne^+ , $E_0=10\text{кэВ}$. (1) – ферромагнитное состояние ($T=200^{\circ}\text{C}$), (2) – парамагнитное состояние ($T=380^{\circ}\text{C}$). (3) – расчетная зависимость $Y(\alpha)=2/\cos(\alpha)$. (а) – эксперимент, (б) – расчет.

Проведены также численные расчеты угловой зависимости коэффициента распыления грани (001) монокристалла никеля в ферромагнитном и парамагнитном состояниях при падении ионов неона с энергией 10 и 1 кэВ в плоскостях (100) и (110). На рис.2 показан результат для падения ионов в плоскости (110). Для энергий ионов 10 кэВ наблюдаются четкие минимумы распыления вдоль открытых каналов [001], [113], [112] и [221]. При меньшей энергии облучающих ионов ($E_0=1$ кэВ), как и следовало ожидать, в угловой зависимости распыления монокристалла проявляются минимумы только вдоль наиболее широких открытых каналов – в направлениях [001] и [112] (см.рис.2).



(a)



(б)

Рис.2. Расчетная угловая зависимость коэффициента распыления Y грани (001) монокристалла Ni в ферромагнитном (1) и парамагнитном (2) состояниях; падение ионов Ne^+ в плоскости (110). Кривая (3) – $Y(\alpha)$ для поликристаллического Ni в ферромагнитном состоянии. (a) $E_0=10$ кэВ; (б) $E_0=1$ кэВ, пара-(\circ) и ферромагнитное (\bullet) состояние.

Из полученных экспериментальных и расчетных данных следует, что разница между Y_p и Y_f для распыления поли- и монокристалла Ni максимальна в случае наклонного падения ионов. Вместе с тем, для монокристалла Ni рассчитанные угловые зависимости Y_p и Y_f сильно различаются не только при наклонном падении ионов, но и для падения вблизи открытых каналов ($\sim 5-10^\circ$ от оси канала). В этих случаях частицы распыляются в результате более длинных цепочек столкновений. Максимальная разница распыления в f и p состояниях $\Delta Y \sim 20\%$ наблюдается для локального максимума $Y(\alpha)$ при $\alpha \sim (60-75^\circ)$, что видно из рис.2а.

На рис.3.а показано относительное количество атомов, распыленных ионами Ne^+ с энергией 10 кэВ из поликристалла Ni в ферромагнитном состоянии в зависимости от длины L цепочки столкновений для двух углов падения ионов. На рис. 3.5.б эти же данные представлены для грани (001) монокристалла Ni при падении ионов в плоскости (110). Видно, что количество атомов, распыленных в результате более длинной цепочки соударений, значительно больше в случае наклонного падения, по

сравнению с нормальным. Одним из процессов, приводящим к удлинению цепочки столкновений, заканчивающейся распылением атома, является процесс приповерхностного каналирования и фокусировки.

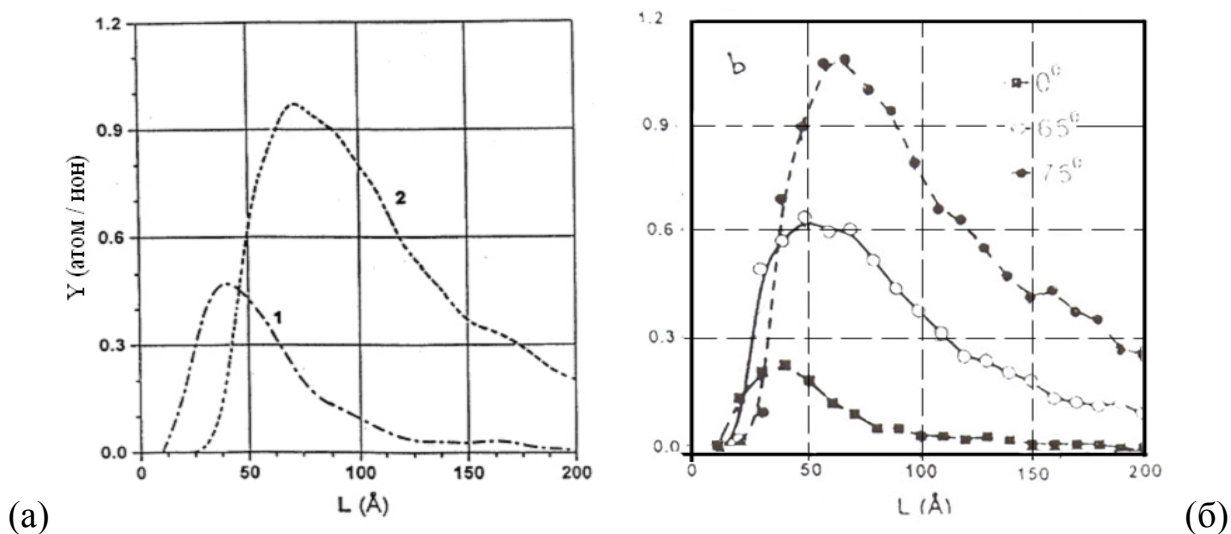


Рис.3 (а) Относительное число атомов, распыленных ионами Ne с энергией 10 кэВ из поликристалла Ni в ферромагнитном состоянии, в зависимости от длины L цепочки соударений; углы падения ионов: (1) $\alpha = 0^\circ$, (2) $\alpha = 80^\circ$. (б) То же, что на рис.(а), но для распыления грани (001) Ni при падении ионов в плоскости (110).

Таким образом, как для поликристаллического, так и для монокристаллического никеля, наибольшая разница при распылении в парамагнитном и ферромагнитном состоянии наблюдается для таких углов падения ионов на мишень, при которых атомы распыляются в результате более длинных цепочек соударений (для наклонного падения ионов и при падении ионов вблизи открытых каналов). В этом случае изменение потенциала взаимодействия атомов при магнитном фазовом накапливается для большего числа соударений (кумулятивный эффект).

В четвертой главе излагаются результаты экспериментального исследования изменения распыления и состава поверхности монокристаллов железоникелевых сплавов при магнитном фазовом переходе. Приводятся данные экспериментов по определению температуры Кюри для сплавов, описывается методика измерения коэффициента распыления с помощью кварцевых микровесов и сравнение полученных данных с весовым методом. Исследования температурной зависимости вторичной эмиссии нейтральных частиц проводились для материалов с

близким элементным составом и разной точкой Кюри. Были выбраны следующие железоникелевые сплавы: Н35 (35%Ni,65%Fe, $T_c=275^\circ\text{C}$), Н40 (40% Ni,60%Fe, $T_c=325^\circ\text{C}$), НМ79 (79%Ni, 16%Fe, 5%Mo, $T_c=345^\circ\text{C}$). Эти ферромагнитные сплавы отличаются уникальными свойствами и широко используются.

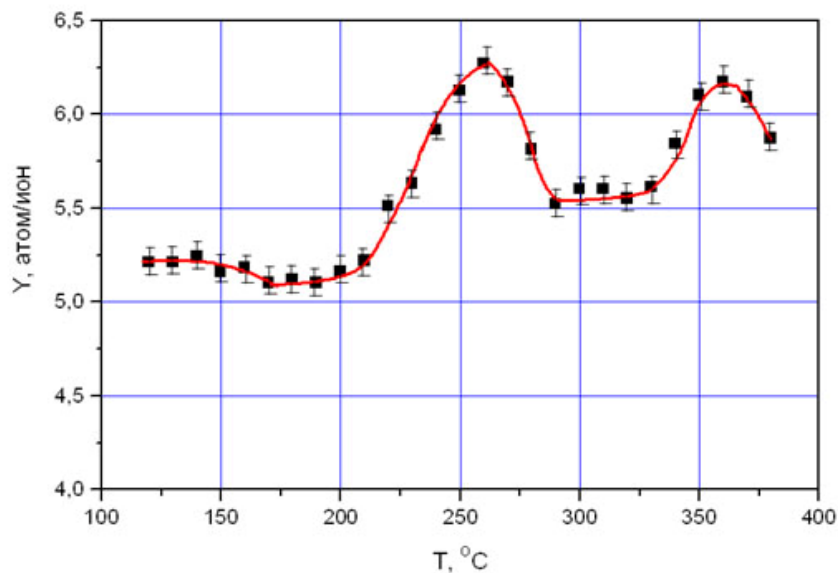


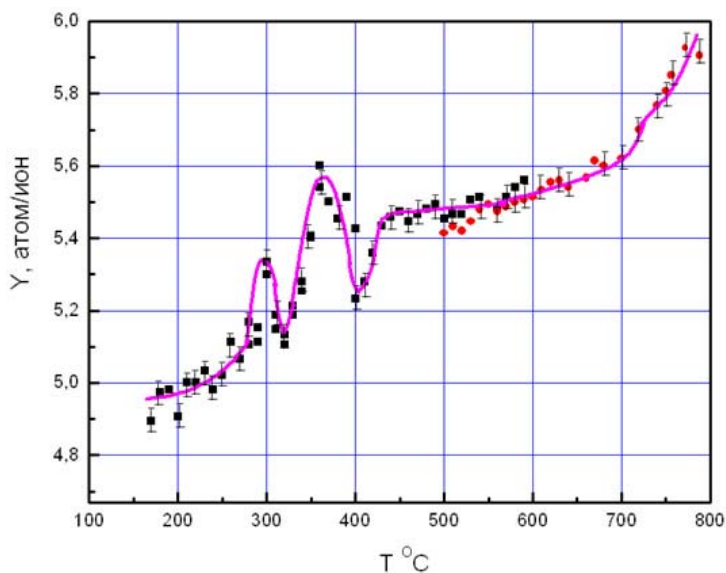
Рис.4. Температурная зависимость коэффициента распыления грани (111) монокристалла инвара (35%Ni65%Fe) при облучении ионами неона с энергией 10 кэВ, падающими в плоскости (110) под углом $\alpha = 45^\circ$. Угол наблюдения в плоскости (110) $\theta = 45^\circ$ (т.е. составляет 90° относительно направления падения ионов).

Температурная зависимость распыления сплава Н35 показана на рис.4. Коэффициент распыления образца в ферромагнитном состоянии практически не менялся с температурой и составлял ~ 5.2 ат./ион.

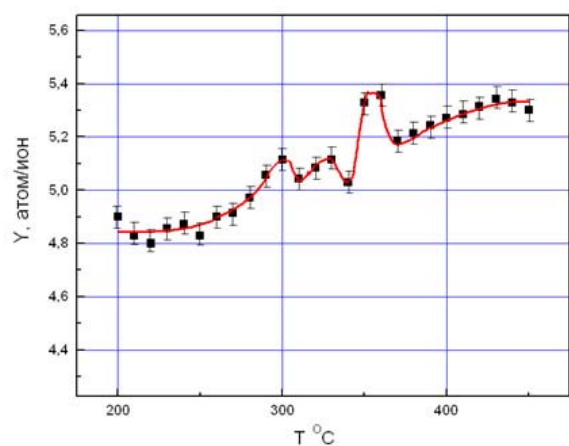
Как видно из рис.4, начиная с $T \sim 220^\circ\text{C}$, происходит подъем температурной зависимости распыления инвара Н35, а затем при $T = 260^\circ\text{C}$, вблизи температуры Кюри сплава ($T_c = 275^\circ\text{C}$), достигается максимум распыления. При дальнейшем повышении температуры, происходит резкий спад зависимости $Y(T)$, а потом следует почти плоский участок, соответствующий парамагнитному состоянию инвара, где Y несколько больше (\sim на 8%), чем для ферромагнитного состояния. Примерно такой же рост $Y(T)$ наблюдался для никеля при f - p переходе.

Начиная с $T \sim 330^{\circ}\text{C}$ происходит новый подъем температурной зависимости $Y(T)$, и при $T \sim 360^{\circ}\text{C}$ возникает второй максимум распыления инвара. Разумно предположить, что этот максимум $Y(T)$ связан с магнитным фазовым переходом Ni, островки которого, согласно экспериментальным данным, присутствуют на поверхности инвара.

Исследовалась также температурная зависимость коэффициента распыления грани (111) монокристалла пермаллоя Н40 (40%Ni60%Fe) для двух углов падения ионов – $\alpha = 45^{\circ}$ и $\alpha = 30^{\circ}$ в плоскости (110). Угол наблюдения в плоскости (110) $\theta = 45^{\circ}$ (т.е. при $\alpha = 45^{\circ}$ составлял 90° относительно направления падения ионов). Такая геометрия эксперимента была выбрана для того, чтобы изучить случаи направленного выхода распыленных частиц ($\alpha = 45^{\circ}$) и диффузного ($\alpha = 30^{\circ}$). Полученные температурные зависимости коэффициентов распыления представлены на рис.5а,б. Видно, что основные особенности кривых $Y(T)$ здесь те же, что и для сплава Н35: существует два максимума распыления при температуре несколько ниже точки Кюри сплава ($T_c = 325^{\circ}\text{C}$) и в точке Кюри никеля.



(а)



(б)

Рис 5. То же, что на рис.4, для грани (111) пермаллоя (40%Ni60%Fe) при углах падения ионов $\alpha = 5^{\circ}$ (а) и $\alpha = 30^{\circ}$ (б) в плоскости (110).

Для пермаллоя Н40, так же, как и в случае распыления инвара Н35, наблюдаются плоские участки кривой $Y(T)$ в ферромагнитной и парамагнитной области, при этом коэффициент распыления в p -состоянии оказывается выше, чем в f -состоянии примерно на 9%. В отличие от Н35, максимумы на зависимости $Y(T)$ для Н40 менее выражены (рис.5) – они лишь немного превышают значение Y для p -состояния. Это больше проявляется при падении ионов под углом $\alpha = 30^\circ$ (рис.5б), когда распыленные частицы выходят из кристалла не в плотноупакованном направлении, а в произвольном. При температурах от 500 до 600⁰С, для сплава Н40 проявляются некоторые флуктуации зависимости $Y(T)$. Они, возможно, связаны с образованием на поверхности островков различных упорядоченных фаз Fe-Ni.

Обращает на себя внимание быстрый рост коэффициента распыления сплава Н40, начиная с 700⁰С, что может быть обусловлено приближением к точке Кюри другой компоненты сплава – железа ($T_c = 840^\circ\text{C}$). Известно, для сплавов Fe-Ni характерно образование областей статистических флуктуаций намагниченности, центрами которых являются атомы железа, окруженные только атомами того же сорта. Поэтому на поверхности сплава возможно образование островков из атомов железа и, вследствие этого, возникновение максимумов распыления вблизи точки Кюри железа.

Представляет интерес структура, появившаяся на грани (111) инвара в результате облучения ионами неона с энергией 10 кэВ при падении под углом 45⁰ в плоскости (110), показанная на рис.6. В ряде участков поверхности видны шестигранные образования, обладающие той же симметрией, что и распыляемая грань. Ориентированные фигуры на рис.6 немного наклонены, что связано с падением ионного пучка на распыляемую грань под углом 30⁰ от нормали к поверхности. Изменения структуры при магнитном фазовом переходе сплава не наблюдалось.

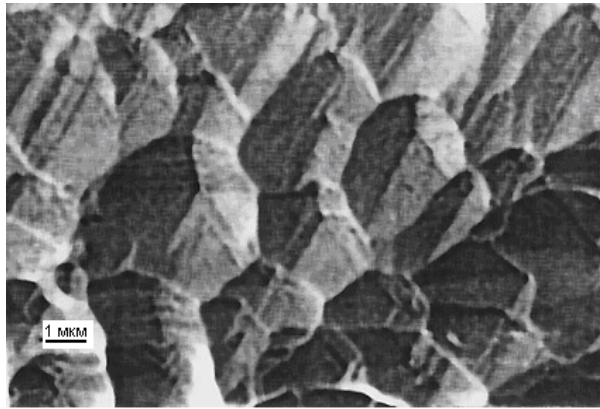


Рис.6. Рельеф поверхности грани (111) монокристалла инвара (35%Ni65%Fe) после бомбардировки онами Ne^+ с энергией 10 кэВ под углом 45° в плоскости (110) при дозе облучения 10^{20} ион/см².

Методом электронной оже-спектроскопии проводилось исследование состава поверхности сплавов Fe-Ni до, и после распыления. Исследовались сплавы инвар Н35 (35%Ni65%Fe) и молибденовый пермаллой НМ79 (79%Ni16%Fe5%Mo). На обзорном энергетическом оже-спектре сплавов были хорошо видны характерные оже-линии для никеля, железа, а в последнем случае и молибдена. До очистки поверхности ионной бомбардировкой линии загрязнений поверхности кислородом и углеродом имели значительную величину. После очистки поверхности линия углерода существенно уменьшилась, а линия кислорода была неразличима. Измерения показали, что процентный состав исследованного сплава практически не меняется при облучении. Поскольку данные оже-анализа усреднены по нескольким поверхностным слоям, этот результат не противоречит предположению о наличии на самой поверхности сплава островков Ni и Fe. Отсутствие сегрегации для сплавов Fe-Ni, возможно, связано с близостью масс атомов компонент сплава.

Интересный результат получен при измерении концентрации примесей в Fe-Ni сплавов в ферро- и парамагнитном состоянии. Оказалось, что концентрация примесей на поверхности сплавов Н35 и НМ79 изменяется с температурой и имеет особенности вблизи точки Кюри сплавов (рис.7).

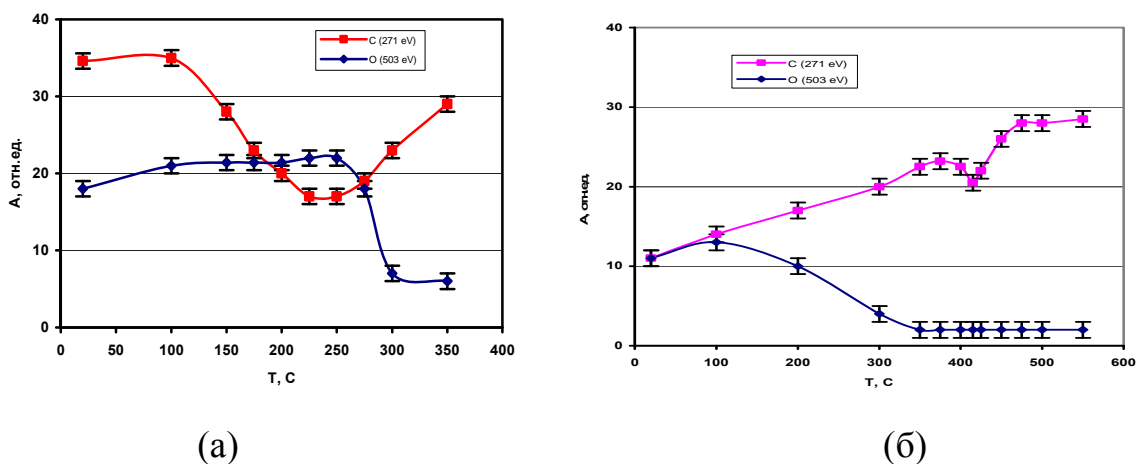


Рис.7. Температурная зависимость амплитуды оже-пиков кислорода и углерода для грани (111) монокристаллов инвара Н35 (Ni35%Fe65%) (а) и пермаллоя НМ79 (Ni79%Fe16%Мо5%) (б), после облучения поверхности ионами аргона с энергией 10 кэВ при дозе 10^{19} ион/см².

Как видно из рис.7а, инвара для Н35 наблюдается значительное уменьшение кислорода вблизи точки Кюри сплава ($T_c = 275^\circ\text{C}$). Отчетливый широкий минимум углерода проявляется немного ниже T_c для Н35. Для монокристалла пермаллоя НМ79 ($T_c=345^\circ\text{C}$) тоже наблюдается уменьшение кислорода вблизи точки Кюри сплава, как и в случае Н35. Но для пермаллоя Н79 минимум углерода более узкий и расположен несколько выше температуры Кюри. Поведение зависимостей рис.7 может быть объяснено особенностями процессов десорбции и диффузии. В сплавах типа Fe-Ni основными загрязнениями объёма являются углеродные включения. В отличие от этого, кислородом могут быть насыщены лишь приповерхностные слои. Кислород на поверхности может находиться в физическом и в частично связанном состоянии (хемосорбированный кислород), т.е. может входить в состав оксидов основных компонент. При достаточно низкой температуре (100-600⁰С) в большинстве случаев десорбируется лишь слабо связанный кислород, а для разложения оксидов требуются существенно бóльшие температуры. Поэтому очевидно, что некоторый кислородный фон, остающийся при $T>300^0\text{C}$, связан с наличием оксидов.

Более раннее начало десорбции кислорода и меньший остающийся кислородный фон для сплава НМ79 можно объяснить добавкой Мо, которая затрудняет образование оксида. В то же время, в образце Н35 кислород, в основном, находится в более связанном состоянии, чем в НМ79, поэтому десорбция начинается позднее. Для удаления углерода с поверхности требуются достаточно высокие температуры, поэтому обычно с повышением температуры происходит диффузия углерода к поверхности, что видно из приведенных рисунков при $T > 300^{\circ}\text{C}$ для Н35 и при $T > 450^{\circ}\text{C}$ для НМ79.

Наблюдаемое в настоящей работе резкое падение концентрации кислорода и углерода на поверхности исследуемых сплавов при температурах вблизи точек Кюри связано с аномальным ростом десорбции и диффузии в этой области температур. Такой вывод не противоречит имеющимся в литературе данным о локальном росте интенсивности других процессов в области фазового магнитного перехода таких как: сублимация, окисление, термическое расширение, структурная перестройка, уширение пятен Венера. Эти аномалии во многих случаях связывают со значительным увеличением амплитуды колебаний поверхностных атомов вблизи точки Кюри. Действительно, анализ экспериментальных и теоретических данных, в частности, показал, что наблюдаемое в нашей лаборатории уширение пятен Венера в окрестности точки Кюри соответствует тому, которое должно быть при температуре $\sim 1200\text{K}$. Такой локальный рост амплитуды колебаний атомов мишени при температуре Кюри также может быть причиной появления минимума на кривой температурной зависимости амплитуды оже-пиков С и О. При этом углерод либо частично десорбирует с поверхности, либо диффундирует в глубь кристалла. Более резкое уменьшение кислорода за счёт десорбции на поверхности сплавов Fe-Ni в области T_c также может быть объяснено аномальной раскачкой поверхностных атомов.

Отметим, что обнаруженные особенности температурных зависимостей распыления и состава примесей на поверхности, необходимо учитывать при анализе поверхности ионными пучками и при практическом использовании железоникелевых сплавов в условиях ионного облучения.

В заключении приводятся выводы из представленной работы:

- Проведены экспериментальные исследования и численное моделирование процессов распыления никеля ионами неона с энергией $E_0=10$ кэВ при температурах, соответствующих ферромагнитному и парамагнитному состояниям мишени. Получены абсолютные значения коэффициентов распыления в ферро- (Y_f) и парамагнитном (Y_p) состоянии поликристаллического никеля при ионной бомбардировке мишени под углами от 0^0 до 65^0 от нормали к поверхности.
- Показано, что коэффициент распыления поликристаллического никеля в ферромагнитном состоянии Y_f (бомбардировка ионами неона с энергией 10 кэВ) изменяется с углом падения приблизительно по закону $2/\cos(\alpha)$. Для всех углов падения ионов (в диапазоне от 0^0 до 65^0) коэффициент распыления никеля в парамагнитном состоянии больше чем в ферромагнитном состоянии.
- Экспериментально и численным моделированием установлено, что разница ΔY коэффициентов распыления поликристалла никеля в ферромагнитном и парамагнитном состояниях возрастает с ростом угла падения ионов; для наклонного падения (α в диапазоне от 45^0 до 65^0) ΔY возрастает в 2 раза по сравнению с нормальным падением и составляет 20%. Для монокристаллического Ni возрастание ΔY наблюдается также и при падении ионов вблизи открытых каналов кристаллической решетки, как показал МД расчет.
- Увеличение разницы между коэффициентами распыления никеля в ферромагнитном и парамагнитном состояниях при наклонном падении ионов и при падении ионов вблизи открытых каналов кристаллической решетки объяснено кумулятивным эффектом в распылении. В указанных

случаях атомы распыляются в результате более длинных цепочек соударений, и эффект изменения потенциала взаимодействия атомов при переходе из ферромагнитного в парамагнитное состояние накапливается.

- Экспериментально исследована температурная зависимость коэффициентов распыления $Y(T)$ и состава поверхности для монокристаллов железоникелевых сплавов с разной точкой Кюри: инвара Н35 (35%Ni65%Fe) с $T_c = 275^\circ\text{C}$, пермаллоя Н40 (40%Ni60%Fe) с $T_c=325^\circ\text{C}$ и пермаллоя НМ79 (79% Ni 16% Fe 5% Mo) с $T_c = 345^\circ\text{C}$. Показано, что при переходе исследованных сплавов из ферро- в парамагнитное состояние их распыление увеличивается.

- Обнаружено, что температурная зависимость распыления $Y(T)$ грани (111) монокристаллов инвара и пермаллоя, имеет немонотонный характер – с максимумами вблизи точек Кюри сплавов и никеля. Для зависимости $Y(T)$ сплава Н40 наблюдается тенденция к образованию третьего максимума – при приближении к температуре Кюри железа.

- Установлено, что концентрация примесей – кислорода и углерода на поверхности сплавов Н35 и НМ79 уменьшается вблизи их точек Кюри за счет увеличения интенсивности десорбции О и диффузии С в этой области температур.

- Полученные особенности температурных зависимостей распыления и состава примесей на поверхности, необходимо учитывать при анализе поверхности ионными пучками и при практическом использовании железоникелевых сплавов в условиях ионного облучения.

Публикации по теме диссертации

1. *G.V.Adamov, V.E.Chekin, D.A.Konov, L.B.Shelyakin, V.E.Yurasova.* Influence of ion incidence angle on sputtering of nickel under magnetic phase transition.// Abstract of the 8th Joint Vacuum Conference, Pula, Croatia, 4-9 June, 2000, P.17.
2. *Г.В. Адамов, Д.А.Конов, В.Е.Чекин, Л.Б.Шелякин, В.Е. Юрасова.* Зависимость распыления поликристалла никеля от угла падения ионов,// Тезисы Международного симпозиума по диагностике поверхности ионными пучками, Запорожье, октябрь 2000, С. 7.
3. *Г.В. Адамов, Д.А.Конов, Л.Б. Шелякин, В.Е. Юрасова.* Изменение угловой зависимости распыления поликристалла никеля при магнитном фазовом переходе.// Труды XV Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью ВИП-2001, Звенигород, 27-31 августа, 2001, Москва, т. 1, С. 81-84.
4. *Г.В. Адамов, Д.А.Конов, Л.Б.Шелякин, В.Е. Юрасова.* Особенности распыления никеля в ферро- и парамагнитном состоянии при различных углах падения ионов.// Поверхность - рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2001. №8. С. 55-58.
5. *D.A.Konov, A.S.Mosunov, G.V.Adamov, L.B.Shelyakin, V.E.Yurasova.* Angular dependence of sputtering for nickel in ferro- and paramagnetic states, // Vacuum, 2002. V. 64. P. 47-53.
6. *С.С.Еловигов, Е.Ю.Зыкова, Д.А.Конов, К.Ф.Миннебаев, Л.Б.Шелякин, В.Е.Юрасова.* Эмиссия нейтральных и заряженных частиц при ионной бомбардировке ферромагнитных сплавов.// Сборник тезисов 3^{ей} Республиканской конференции по физической электронике, Ташкент, 2002, С. 98.
7. *С.С.Еловигов, Д.А.Конов, Р.С.Гвоздовер, Л.Б.Шелякин, В.Е.Юрасова.* Изменение распыления инвара при магнитном фазовом переходе,// Труды XVI Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью ВИП-2003, Звенигород, 25-29 августа, Москва, т.1, С. 109-112.
8. *С.С.Еловигов, Д.А.Конов, Р.С.Гвоздовер, Л.Б.Шелякин, В.Е.Юрасова.* Изменение распыления инвара при магнитном фазовом переходе.// Поверхность - рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2004. №5. С. 21-24.
9. *D.A.Konov, S.S.Elovikov, L.B.Shelyakin, J.S.Colligon, V.E.Yurasova.* Temperature dependence of ferromagnetic alloy sputtering.//Abstract of the 20th International conference on atomic collisions with solids (ICACS-20), Italy, Genova, 3-6 July, 2004, P.130.
10. *С.С.Еловигов, Е.Ю.Зыкова, Д.А.Конов, Л.Б.Шелякин, В.Е.Юрасова.* Влияние магнитного фазового перехода на распыление, ионную эмиссию и состав поверхности сплавов Fe-Ni,// Поверхность - рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2006. №7. С. 55-64.