

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Ф.М. ДОСТОЕВСКОГО

## **ФМХ ОмГУ 2022**

**СБОРНИК СТАТЕЙ  
X РЕГИОНАЛЬНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МАГИСТРАНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
ПО ФИЗИКЕ, МАТЕМАТИКЕ И ХИМИИ  
(Омск, 6–19 июня 2022 г.)**

© ФГАОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского», 2022

**ISBN 978-5-7779-2597-8**



2022

**УДК 53+51+54**  
**ББК 22.3я43я05+22.1я43я05+24я43я05**  
**Ф739**

*Рецензенты:*

д-р геол.-минерал. наук О.А. Голованова,  
канд. биол. наук М.Г. Потуданская,  
канд. физ.-мат. наук С.А. Сычев

*Ответственные редакторы:*

Ю. В. Захарова, Г. М. Серопян

**Ф739 ФМХ ОмГУ 2022:** сборник статей X региональной конференции магистрантов, аспирантов и молодых ученых по физике, математике и химии (Омск, 6 июня – 19 июня 2022 г.). – Омск : Издательство Омского государственного университета, 2022. – 1 CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

**ISBN 978-5-7779-2597-8**

В сборнике опубликованы статьи участников конференции, посвященные исследованиям в области математического моделирования, дискретной оптимизации, прикладной теоретической физики, экспериментальной физики, химии и химической технологии.

Для молодых ученых, магистрантов, аспирантов физико-математических и химических специальностей и направлений.

**УДК 53+51+54**

**ББК 22.3я43я05+22.1я43я05+24я43я05**

*Текстовое электронное издание*

*Самостоятельное электронное издание*

Минимальные системные требования:  
процессор с частотой 1,3 ГГц или выше; ОЗУ 512 Мб; Microsoft  
Windows XP/Vista/7/8/10;  
Adobe Acrobat Reader 8.0 и выше; CD-ROM; мышь

## СОДЕРЖАНИЕ

Организационный комитет ..... 6

### Секция «ДИСКРЕТНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

*И. М. Бучинский* Цепочки централизаторов и уравнения от одной переменной над двуступенно нильпотентными группами ..... 7

*П. А. Козлова* Спецификация нелинейных моделей бинарного выбора в классе нейронных сетей с «голосованием» ..... 14

*М. Ю. Сахно* Экспериментальное исследование методов составления расписаний для многоядерных процессоров ..... 18

*Е. В. Федотова* Гибридные алгоритмы решения некоторых задач упаковки в контейнеры ..... 22

*А. В. Хилько* Корпусно-конкатенативный синтез, его приложения и реализация ..... 25

### Секция «ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

*В. В. Бражник* Вычисление констант связи ренормгруппового преобразования трёхмерной неупорядоченной модели Изинга 32

*А. С. Егорина* Моделирование методом Монте-Карло критических свойств усложненного спинового вентиля ..... 36

*А. В. Ейхлер* Исследование динамического фазового перехода в тонких Гейзенберговских пленках ..... 40

*М. Ю. Макеев* Исследование зависимости энергетических и магнитных характеристик системы Fe/Pt/Fe от толщины составляющих структуру слоев ..... 44

*А. В. Минькова* Исследование магнитных свойств кирального гелимагнетика  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$  ..... 48

*М. М. Михайловский* Моделирование медленной динамики трехпленочной магнитной структуры в низкотемпературной фазе ..... 52

<i>Д. И. Поликовская</i> Определение положения атомов при адсорбции фурфуроле на поверхности Pd (111) в водном растворе .....	56
<i>Р. А. Сухачев</i> Исследование магнитной трехслойной системы Co/Cu/Co в рамках первопринципных расчетов.....	59
<i>Р. С. Шакиров</i> Исследование влияние дефектов различных типов на эффекты гистерезиса в мультислойных наноструктурах .....	63

#### Секция «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА»

<i>А. А. Жаксальков, Г. А. Вершинин</i> Анализ усиленного массопереноса в объеме гетерогенных металлических систем при воздействии на их поверхность концентрированными потоками энергии .....	67
<i>С. В. Жилина</i> Зависимость морфологии поверхности пленок нитрида алюминия, полученных методом магнетронного распыления, от толщины пленок .....	71
<i>Н. А. Мельников, Л. Н. Никифорова, И. А. Пешкова</i> Экспериментальное исследование влияния градиентной неоднородности кристалла системы $Bi_{100-c}Sb_c$ в интервале $7at.\% < c < 11at.\%$ на эффект Пельтье при температуре около 100К .....	77
<i>Д. С. Сидоренко</i> Исследование влияния частоты импульсов лазерного излучения на качество поверхности напыляемой плёнки.....	82
<i>Я. О. Демочко</i> Применение бинарных и двубинарных сигналов в волоконно-оптических системах связи .....	86
<i>А. С. Калита</i> Характеристики интерферометра Маха-Цендера как оптического фильтра и ответвителя.....	90
<i>А. Н. Байдаков, В. И. Струнин</i> Зависимость пьезоэлектрического коэффициента $d_{33}$ пленок AlN от мощности магнетронного напыления на ситалловых и кремниевых подложках .....	94

Секция «ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ»

*В. А. Зуева* Оценка концентрации катионов некоторых металлов в пробах круп, приобретенных в городе Омске (Россия) ..... 98

*А. И. Никитина* Синтез и свойства полимерных композитов на основе модифицированных гидроксипатитов ..... 103

Секция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЗОВАНИЯ»

*В. М. Демидович* Диагностика мотивации учебной деятельности в процессе обучения ..... 107

*А. А. Зенова* Контекстное обучение физике в условиях сетевого взаимодействия «предприятие – СПО – школа» ..... 111

*Е. А. Лапенко* Корреляция творческого потенциала и успеваемости студентов при обучении физике ..... 115

## Организационный комитет

<i>Сервах Владимир Вицентьевич</i>	д-р физ.-мат. наук, профессор, старший научный сотрудник Омского филиала Института математики им. С. Л. Соболева, профессор кафедры прикладной и вычислительной математики ОмГУ
<i>Прудников Владимир Васильевич</i>	д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики ОмГУ
<i>Потуданская Мария Геннадьевна</i>	канд. биол. наук, доцент, декан физического факультета ОмГУ
<i>Голованова Ольга Александровна</i>	д-р геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой неорганической химии ОмГУ
<i>Власова Ирина Васильевна</i>	д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой аналитической химии ОмГУ
<i>Серомян Геннадий Михайлович</i>	канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей, прикладной и медицинской физики ОмГУ
<i>Позыгун Ирина Станиславовна</i>	ст. преподаватель кафедры общей, прикладной и медицинской физики ОмГУ
<i>Леванова Татьяна Валентиновна</i>	канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник Омского филиала Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН, заведующий кафедрой прикладной и вычислительной математики ОмГУ
<i>Захарова Юлия Викторовна</i>	канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Омского филиала Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН, доцент кафедры алгебры и математического анализа ОмГУ

## Секция

# «ДИСКРЕТНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

---

## Цепочки централизаторов и уравнения от одной переменной над двуступенно нильпотентными группами

И. М. Бучинский

Научный руководитель: к.ф.-м.н. А. В. Трейер

**Аннотация.** В статье приводятся результаты исследований связи понятий централизаторной размерности и нетеровости по уравнениям от одной переменной для группы и для двуступенно нильпотентной группы  $G$  как без кручения с изолированным коммутантом, так и с кручением: для общего фиксированного  $t$  справедливо  $a^t = 1$  для всех  $a \in G$ , с изолированным коммутантом.

**Ключевые слова:** универсальная алгебраическая геометрия, уравнения от одной переменной, нетеровость по уравнениям, группа, двуступенно нильпотентная группа, централизатор, централизаторная размерность.

Данная работа относится к универсальной алгебраической геометрии – направлению математики, занимающемуся исследованием решений уравнений над различными алгебраическими системами. С достаточно обширным списком работ и теоретической базой можно ознакомиться, например, в монографии [6].

Напомним, что подгруппа  $H$  некоторой группы  $G$  называется изолированной, если для любого элемента  $g$  группы  $G$  и любого целого положительного числа  $m$  из включения  $g^m \in H$  следует включение  $g \in H$ . С основными понятиями теории групп можно ознакомиться, например, в [7].

Всюду далее будем обозначать через  $[x, y] = x^{-1}y^{-1}xy$  коммутатор двух элементов  $x, y \in G$ . Многообразие двуступенно нильпотентных групп  $N_2$  определяется тождеством:  $[x, y, z] = [[x, y], z] = 1$  для любых  $x, y, z \in G$ .

Существует немало работ, посвященных изучению двуступенно нильпотентных групп: например, работы [5, 9, 10, 11, 12]. Зная из, например, [10] общий вид элементов двуступенно нильпотентной группы, мы имеем общий вид уравнения от одной переменной с коэффициентами, зависящими от одного порождающего, над двуступенно нильпотентной группой:  $x^\alpha g[x, a] = 1$ .

Централизатором множества  $A$  элементов группы  $G$  называется множество всех таких элементов группы  $G$ , которые коммутируют сразу со всеми элементами из  $A$ . Понятие централизаторной размерности группы совпадает с понятием высоты централизаторной решетки группы. Важность данного понятия обоснована, например, в работе [2]. В ней же имеется широкий список ссылок на работы данного направления. Кроме того, в [2] показано, что группы, имеющие централизаторную решетку конечной высоты, универсально аксиоматизируемы.

Следуя [6], дадим наиболее важные для нас в данной работе понятия. Алгебраическая система  $\mathcal{A}$  называется нётеровой по уравнениям, если для любого целого положительного  $n$  любая система уравнений  $S(X)$  над  $\mathcal{A}$  от  $n$  переменных  $X$  эквивалентна своей некоторой конечной подсистеме  $S_0(X) \subseteq S(X)$ . Алгебраическая система  $\mathcal{A}$  называется 1-нётеровой по уравнениям, если она нётерова по уравнениям от одной переменной.

Следующая теорема является достаточным условием отрицания нетеровости по уравнениям от одной переменной в произвольных группах.

**Теорема 1.** Если в группе  $G$  существует бесконечная цепочка строго убывающих централизаторов, то  $G$  не является 1-нетеровой по уравнениям.

**Доказательство.** Пусть в группе  $G$  существует бесконечная цепочка централизаторов  $C(A_1) \supsetneq C(A_2) \supsetneq \dots \supsetneq C(A_n) \supsetneq \dots$ , где  $A_i \subset G$  для всех  $i$ . Пусть  $b_1 \in C(A_1) \setminus C(A_2)$ . Тогда найдется элемент  $a_1 \in A_2 \setminus A_1$  такой, что  $[b_1, a_1] \neq 1$ . Пусть  $b_2 \in C(A_2) \setminus C(A_3)$ . Тогда найдется элемент  $a_2 \in A_3 \setminus A_2$  такой, что  $[b_2, a_2] \neq 1$ . Несложно заметить, что при этом  $[b_2, a_1] = 1$ . Таким образом, существует пара

последовательностей элементов  $\{a_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  и  $\{b_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  такая, что  $[b_i, a_i] \neq 1$  для всех  $i$  и  $[b_j, a_i] = 1$  для всех  $j > i$ . Покажем, что бесконечная система уравнений  $S(x) = \{[x, a_i] = 1\}_{i \in \mathbb{N}}$  от одной переменной не является нетеровой по уравнениям. Действительно, пусть  $S_0(x)$  – произвольная конечная подсистема системы  $S(x)$ . Тогда обязательно найдется  $i$ , для которого  $V_G(S_0(x)) \supseteq C(A_i) \not\supseteq V_G(S(x)) = \bigcap_{i \in \mathbb{N}} C(A_i)$ . Таким образом, система  $S(x)$  от одной переменной не является нетеровой по уравнениям. ■

В [4] было показано, что бесконечная прямая степень неабелевой группы не  $q_\omega$ -компактна (одно из обобщений нетеровости по уравнениям). Несложно понять, что из теоремы 1 вытекает следующее утверждение.

**Следствие 1.** Бесконечная прямая степень неабелевой группы  $G$  не является 1-нетеровой по уравнениям.

**Доказательство.** Пусть  $G$  – неабелева группа,  $a \in G$  – элемент, который коммутирует не со всеми элементами из  $G$ , и пусть  $A_1 = \{(a, 1, 1, 1, \dots)\}$ ,  $A_2 = A_1 \cup \{(a, a, 1, 1, 1, \dots)\}$ ,  $A_3 = A_2 \cup \{(a, a, a, 1, 1, 1, \dots)\}$ , ... . Тогда из существования бесконечной цепочки централизаторов  $C(A_1) \supseteq C(A_2) \supseteq C(A_3) \supseteq \dots \supseteq C(A_n) \supseteq \dots$  и теоремы 1 следует отрицание 1-нетеровости по уравнениям для бесконечной прямой степени  $G$ . ■

Кроме того, в работе [1] доказывается, что сплетение неабелевой группы и бесконечной группы не является нетеровой по уравнениям. Из теоремы 1 и того факта, что бесконечная прямая степень неабелевой группы вкладывается в данное сплетение, непосредственно вытекает

**Следствие 2.** Сплетение неабелевой группы и бесконечной группы не является 1-нетеровой по уравнениям.

Следующая теорема показывает некоторую связь между понятиями централизаторной размерности и нетеровости по уравнениям от одной переменной для двуступенно нильпотентной группы без кручения с изолированным коммутантом.

**Теорема 2.** Если двуступенно нильпотентная группа  $G$  без кручения с изолированным коммутантом не является 1-

нетеровой по уравнениям, то в  $G$  существует сколь угодно длинная цепочка строго убывающих централизаторов.

**Доказательство.** Пусть  $G$  – двуступенно нильпотентная группа без кручения, не являющаяся нетеровой по уравнениям от одной переменной. Тогда по лемме 1 из [8] в  $G$  существуют последовательность уравнений  $S(x) = \{x^{\alpha_i} g_i[x, a_i] = 1\}_{i \in \mathbb{N}}$  и последовательность элементов  $\{b_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  такие, что  $b_i^{\alpha_i} g_i[b_i, a_i] \neq 1$  для всех  $i$  и  $b_j^{\alpha_j} g_j[b_j, a_i] = 1$  для всех  $j > i$ .

Рассмотрим первое уравнение  $x^{\alpha_1} g_1[x, a_1] = 1$  системы  $S(x)$  и  $b_2$  – его решение. Сделаем во всей системе  $S(x)$  замену переменной  $x = b_2 y$ . Тогда  $(b_2 y)^{\alpha_1} g_1[b_2 y, a_1] = 1$ . Возведя первую скобку в степень и расписав коммутатор, используя свойства группы  $G$ , получим  $y^{\alpha_1} b_2^{\alpha_1} g_1[b_2, a_1][y, a_1][b_2, y]^{\alpha_1} = 1$ . Так как  $b_2$  является решением этого уравнения, то  $b_2^{\alpha_1} g_1[b_2, a_1] = 1$ . Тогда  $y^{\alpha_1} [y, a_1][b_2, y]^{\alpha_1} = 1$ . Получаем, что  $y^{\alpha_1} = [b_2 a_1, y][g_1, y]^{\alpha_1}$ . Судя по последнему равенству и исходя из того, что коммутант группы  $G$  – изолирован, значение переменной  $y$  обязано быть из коммутанта группы  $G$ . Из определения двуступенно нильпотентной группы ( $[[x, y], z] = 1$  для всех  $x, y, z \in G$ ) получаем, что  $y^{\alpha_1} = 1$  и, следовательно, так как  $G$  – группа без кручения,  $\alpha_1 = 0$ . Тогда первое уравнение имеет вид  $g_1[x, a_1] = 1$ . Аналогично проведя замену  $x = b_2 y$  мы избавимся от коэффициента  $g$  и придем к виду  $[y, c_1] = 1$ . Переименуем в полученной системе  $S_1(y)$  переменную  $y$  в  $x$ . Отметим, что система  $S_1(x)$  не является нетеровой по уравнениям.

Перейдем ко второму уравнению общего вида  $x^{\alpha_{2,1}} g_{2,1}[x, a_{2,1}] = 1$ . Рассмотрим  $b_{3,1}$  – решение первых двух уравнений (исходное  $b_3$  уже может не быть таким решением). Сделаем в  $S_1(x)$  замену  $x = b_{3,1} y$ . Тогда аналогичными рассуждениями второе уравнение возможно привести к виду  $[y, c_2] = 1$ . Покажем, что вид первого уравнения при данной замене не изменится. Действительно, имеем  $[b_{3,1} y, c_1] = 1$ . Тогда  $[b_{3,1}, c_1][y, c_1] = 1$ . Из того, что  $b_{3,1}$  является решением

первого уравнения, то есть, что  $[b_{3,1}, c_1] = 1$ , получаем  $[y, c_1] = 1$ .

Таким образом, продолжая данную процедуру мы получим последовательность конечных систем  $S_{\leq i}(x) = \{[x, c_j] = 1\}_{j \leq i}$ . Рассмотрим для некоторого  $i$  конечную цепочку множеств  $A_1 \subsetneq A_2 \subsetneq \dots \subsetneq A_i$ , где  $A_i = \{c_1, \dots, c_i\}$ . Покажем, что справедлива следующая конечная цепочка вложений централизаторов:  $C(A_1) \supsetneq C(A_2) \supsetneq \dots \supsetneq C(A_i)$ . Действительно, для произвольного  $j < i$  известно, что  $C(A_j) \supsetneq C(A_{j+1})$ . Однако  $C(A_j) \ni b_{j+1, j-1} \notin C(A_{j+1})$ . При этом для любого  $i$  найдется цепочка строго убывающих централизаторов большей, чем для  $i$ , длины. ■

Кроме того, имеет место следующая теорема.

**Теорема 3.** Если двуступенно нильпотентная группа  $G$  с кручением: для общего фиксированного  $t$  справедливо  $a^t = 1$  для любого  $a \in G$ , с изолированным коммутантом не является 1-нетеровой по уравнениям, то в  $G$  существует сколь угодно длинная цепочка строго убывающих централизаторов.

**Доказательство.** Доказательство данной теоремы практически идентично доказательству теоремы 2 с разницей лишь в том, что при преобразовании  $i$ -го уравнения степень  $\alpha_i$  может быть равна, кроме нуля,  $t$ . В этом случае, так как  $t$  – фиксированное для всех элементов группы,  $i$ -е уравнение так же будет иметь вид  $g_i[x, a_i] = 1$ , которое аналогичным образом, как в доказательстве теоремы 2, приводится к виду  $[x, c_i] = 1$ . ■

Следующая теорема в совокупности с теоремой 1 являет собой критерий на языке цепочек централизаторов для двуступенно нильпотентных групп с некоторыми ограничениями.

**Теорема 4.** В каждой двуступенно нильпотентной группе  $G$ , как без кручения с изолированным коммутантом, так и с кручением: для общего фиксированного  $t$  справедливо  $a^t = 1$  для любого  $a \in G$ , с изолированным коммутантом, в которой существует совместная система уравнений от одной переменной, не являющаяся нетеровой по уравнениям, найдется бесконечная цепочка строго убывающих централизаторов.

**Доказательство.** Пусть  $S(x)$  – система уравнений от одной переменной в  $G$ , не являющаяся нетеровой по уравнениям. Во всей системе  $S(x)$  сделаем замену переменной  $x = ux_0$ , где  $x_0$  – решение всей системы  $S(x)$ . Тогда, следуя доказательству теоремы 2, мы получим бесконечную систему уравнений  $S'(x) = \{[x, c_i] = 1\}_{i \in \mathbb{N}}$  и, соответственно, бесконечную цепочку строго убывающих централизаторов. ■

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМ СО РАН, проект FWNF-2022-0003.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Gilbert B., Myasnikov A., Roman'kov V.* Two theorems about equationally Noetherian groups // *Journal of Algebra*. Vol. 194. Iss. 2. 1997. С. 654–664.
- [2] *Duncan A.J., Kazachkov I.V., Remeslennikov V.N.* Centraliser dimension and universal classes of groups // *Сиб. электрон. матем. изв.* № 3. 2006. С. 197–215.
- [3] *Esyp E. S., Kazatchkov I. V., Remeslennikov V.N.* Divisibility theory and complexity of algorithms for free partially commutative groups // *Groups, Languages, Algorithms. Contemporary Mathematics*. Vol. 378. 2005. P. 319–348.
- [4] *Shahryari M., Shevlyakov A.* Direct products, varieties, and compactness conditions // *Groups, Complexity, Cryptology*. Vol. 9, № 2. 2017. С. 159–166. <https://doi.org/10.1515/gcc-2017-0011>.
- [5] *Амаглобели М. Г., Ремесленников В. Н.* Расширение централизатора в нильпотентных группах // *Сиб. матем. журн.* Т. 54, № 1 (2013). С. 8–19.
- [6] *Даниярова Э.Ю., Мясников А.Г., Ремесленников В.Н.* Алгебраическая геометрия над алгебраическими системами – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2016. 243 с.
- [7] *Каргаполов М.И., Мерзляков Ю.И.* Основы теории групп – М.: Наука, 1982.
- [8] *Котов М.В.* Несколько замечаний о нетеровости по уравнениям // *Вестник Омского Университета.* № 2. 2013. С. 24–28.
- [9] *Мищенко А. А., Тимошенко Е. И.* Универсальная эквивалентность частично коммутативных нильпотентных

групп // Сиб. матем. журн. Т. 52, № 5. 2011. С 1113–1122;  
Siberian Math. J. Vol. 52, N 5. 2011. P. 884–891.

[10] *Мищенко А.А., Трейер А.В.* Графы коммутативности для частично коммутативных двуступенно нильпотентных  $\mathbb{Q}$ -групп // Сиб. электрон. матем. изв. № 4. 2007. С. 460-481.

[11] *Ремесленников В.Н., Трейер А.В.* Структура группы автоморфизмов для частично коммутативных двуступенно нильпотентных групп // Алгебра и логика. Т. 49, N 1. 2010. С. 43-67.

[12] *Трейер А. В.* Два результата для группы автоморфизмов частично коммутативных двуступенно нильпотентных групп // Вестн. НГУ. Сер. матем., мех., информ. Т. 10, № 2. 2010. С. 85–97.

---

Бучинский Иван Михайлович,  
Омский филиал Института математики им. С. Л. Соболева,  
инженер-исследователь,  
644043, Омск, ул. Певцова, 13, 8-908-802-86-77,  
[buchvan@mail.ru](mailto:buchvan@mail.ru).

## Спецификация нелинейных моделей бинарного выбора в классе нейронных сетей с «голосованием»

П. А. Козлова

Научный руководитель: к. ф.-м.н., доцент С. М. Добровольский

**Аннотация.** Хорошо известно, что математическое моделирование представляет собой систему математических выражений, описывающих свойства, взаимосвязи, структурные и функциональные параметры объекта моделирования. Элементами моделей являются признаки, которыми описываются объекты наблюдения. Актуальность темы статьи определена тем, что предметной областью для изучения стали исследования в медицине.

**Ключевые слова:** статистический подход, прогнозирование, математическое моделирование, медицинские исследования, зависимости переменных, дифференциальный подход.

В докладе рассматриваются нелинейные регрессионные модели с бинарной зависимой переменной, которые на языке нейронных сетей могут быть описаны как двухслойная сеть с входным слоем, состоящим из нескольких стандартных нейронов (сумматор – нелинейный преобразователь), а второй – нейрон, осуществляющий процедуру «голосования» участников первого слоя.

Пусть  $x_1, \dots, x_n$  – независимые переменные, а  $y$  – зависимая бинарная переменная, тогда нейрон первого слоя имеет вид

$$P(y = 1) = F(\alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_n x_n),$$

где  $F$  – функция распределения (логистического или стандартного нормального).

Нейрон второго, результирующего слоя, возвращает 1, если большинство нейронов первого слоя имеют вероятность  $P(y = 1) > 1/2$  и 0 в противном случае.

Показано, что при выборе в качестве штрафной функции – функции правдоподобия, метод максимального правдоподобия

гарантирует единственность оценки весов связи, если максимум функции правдоподобия удастся найти (что является типичной ситуацией). Алгоритм поиска минимума штрафной функции «консилиума» определим следующим образом. Для «консилиума», состоящего из одного «эксперта», задача минимизации штрафной функции сводится к задаче максимизации функции правдоподобия, алгоритм решения которой хорошо известен. Для консилиумов большей мощности задача минимизации штрафной функции сводится к задаче минимизации штрафной функции каждого «эксперта» «консилиума». Действительно, искомый минимум достигается, если каждое слагаемое под знаком суммы достигает своего максимума, что эквивалентно сделанному утверждению. Отметим, что в силу выпуклости штрафной функции (как суммы выпуклых) минимум, если он существует, единственен. Это обстоятельство делает выбор таких моделей очень привлекательным, так как в общей ситуации штрафная функция, как правило, имеет много экстремумов, что крайне затрудняет процесс обучения и часто приводит к неудовлетворительным результатам. Кроме того, такие модели даже в случае самой простой архитектуры оказываются весьма эффективными в целом ряде задач прогнозирования (см., например, [3]).

Отметим, что в математической статистике модели бинарного выбора (probit и logit-модели) давно и хорошо известны (см., например, [1]) и являются простейшим (первый слой состоит из одного нейрона) случаем рассматриваемых в докладе моделей. Это обстоятельство позволяет заимствовать отлаженные и проверенные алгоритмы оценки весов связей из стандартных статистических пакетов прикладных программ, что упрощает верификацию соответствующего программного обеспечения.

Ещё одной важной особенностью рассматриваемого класса моделей является возможность корректного анализа зависимости даже в случае относительно небольших объёмов данных, что часто случается в прикладных исследованиях, в которых сбор больших объёмов данных достаточно труден и дорог. Это достигается путём построения нейронов первого слоя, имеющих небольшое количество входов (независимых

переменных), но в совокупности покрывающих все переменные в исходных данных. Такие пилотные исследования важны, так как в случае эффективности построенных моделей обосновывают и стимулируют затраты на дальнейший сбор данных.

В повседневной практической деятельности врачи встречаются с множеством заболеваний кишечника. Вопросы ранней диагностики ЯК вызывают трудности среди практикующих врачей. Установление диагноза не представляет сложности, если течение заболевания типичное и совпадает с описаниями в учебниках [2].

Результаты, полученные при анализе задачи диагностики некоторых кишечных заболеваний, обладающей особенностью. консилиумы из 3х экспертов (табл. 3.2):

**Таблица 1.**

<b>Состав консилиума</b>	<b>Н1</b>	<b>Н2</b>	<b><math>\Sigma</math></b>
1,2,4	0,02	0,81	0,83
1,5,6	0,21	0,33	0,54
1,4,6	0,12	0,32	0,44

Из таблицы видно, что консилиум из экспертов «труд и профессиональные вредности», «стресс» и «вредные привычки» имеет минимальную суммарную ошибку и результаты ошибки 1-го и 2-го рода, так же являются неплохими.

Таким образом, найдена модель из 3-х специалистов, которая дает наилучший результат по сравнению с предыдущим. В данной модели мы называем больного, здоровым в 14% случаях, и здоровых людей больными в 34%, отправляя их на эндоскопию.

Такие пилотные исследования важны, так как в случае эффективности построенных моделей обосновывают и стимулируют затраты на дальнейший сбор данных. Данная модель пока не может быть использована на практике. Так же данная модель должна пройти проверку на тестовых данных, после чего уже точно можно говорить о качестве модели.

Анкета и количество выборки, при дальнейших исследованиях также нуждаются в доработке.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] *Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А.* Эконометрика: Начальный курс.

– М., Дело, 2004 – 576 с.

[2] Гипотеза «истощения биома» в развитии язвенного колита/Г.Р. Бикбавова, М.А. Ливзан, И.В. Свалкин, Д.В. Турчанинов, Т.В. Третьякова, Ю.Е. Лопатина, Т.Ю. Панова. ФГБОУ ВО «Омский государственный медицинский университет» Минздрава России (644099, Омск, Россия) БУЗ Омской области «Областная клиническая больница» (644111, Омск, Россия)

[3] *Gorban A.N., Rossiev D.A.*, Neural networks on personal computer. Novosibirsk: Nauka. 1996. 276 p.

---

Козлова Полина Анатольевна,

Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,

2 курс магистратуры, ФМИТ,

644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)644238,

Polinka.svetliy@yandex.ru

## Экспериментальное исследование методов составления расписаний для многоядерных процессоров

М. Ю. Сахно

Научный руководитель: д.ф.-м.н., доцент А. В. Еремеев

**Аннотация.** В работе приведены результаты некоторых экспериментов, проведенных в рамках исследования задачи построения расписаний процессора с учетом ограниченной пропускной способности шины данных. Полученные результаты показывают, что учитывая, как работы используют шину данных, общее время завершения набора работ можно сократить. Сравнение производится с библиотекой Intel TBB, используемой в современном программном обеспечении для планирования выполнения работ на ядрах процессора.

**Ключевые слова:** многоядерный процессор, шина данных, планирование выполнения работ.

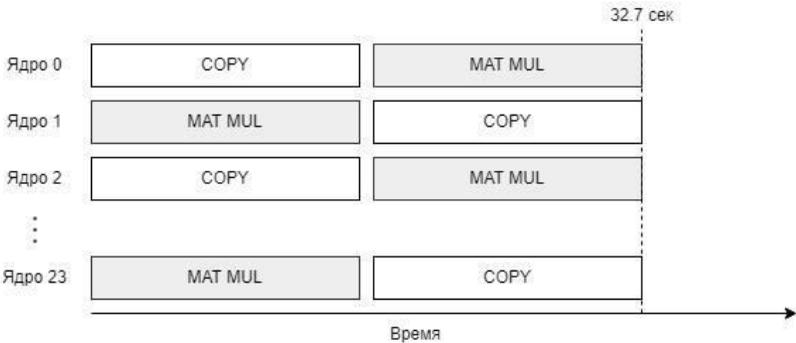
В данной статье приведены результаты некоторых экспериментов, проведенных в рамках исследования задачи построения расписаний процессора с учетом ограниченной пропускной способности шины данных [1]. Рассматриваемая задача актуальна для производителей процессоров, т.к. существующие решения по планированию выполнения работ на ядрах процессора (например, библиотека Intel TBB [2]) не учитывают использование шины данных работами. Полученные результаты показывают, что принимая это во внимание, общее время завершения набора работ можно сократить. Приведенный далее эксперимент показывает возможность такого ускорения.

Имеется сервер с 24 ядрами и 48 работ: 24 работы копирования вектора (COPY), которые интенсивно задействуют шину данных, и 24 работы перемножения матриц (MAT MUL), которые с шиной данных почти не взаимодействуют. Библиотека Intel TBB выполняет эти работы, как показано на рисунке 1, при этом 24 работы COPY запускаются одновременно, сильно замедляя друг друга. Выполнение всех 48 работ в этом случае занимает 39,2 сек. Однако оптимально было бы выполнять работы так, как показано на рисунке 2, т.к. в этом

случае работы, выполняемые одновременно, будут меньше замедлять друг друга. Такой вариант исполнения занимает 32,7 сек. Таким образом, учёт того, как работы используют шину данных, позволяет ускорить решение, построенное библиотекой Intel TBB, на 19,8%.



**Рисунок 1.** Выполнение работ библиотекой Intel TBB.



**Рисунок 2.** Оптимальное выполнение работ.

Далее был проведен эксперимент, в котором сравнивается реальное время выполнения работ согласно расписаниям, построенным библиотекой Intel TBB, с реальным временем выполнения работ согласно расписаниям, построенным пакетом CPLEX с использованием модели частично целочисленного линейного программирования [1]. Для проведения вычислительного эксперимента в качестве работ были взяты процедуры из библиотеки Intel Math Kernel Library: копирование вектора, суммирование абсолютных значений элементов

вектора, вычисление суммы одного вектора с результатом произведения другого вектора на число, QR-разложение матрицы. Выбор таких процедур обусловлен тем, что они по-разному используют шину данных. Для тестирования было сгенерировано 960 примеров с различным количеством работ (4, 6, 7, 8, 10), различным частичным порядком (тривиальный, построенный случайным образом (с вероятностью  $\frac{1}{2}$  определяется, должна ли работа  $j_1$  предшествовать работе  $j_2$ ), бинарное дерево и один-ко-многим-к-одному (сначала одна задача, после нее много задач, после них вновь одна), для разного количества ядер (2, 3, 4).

Среднее преимущество решений, полученных с помощью пакета CPLEX, над Intel TBB, обозначается как  $\Delta := \text{avg}(\frac{\text{makespan}_{\text{MIP}} - \text{makespan}_{\text{TBB}}}{\text{makespan}_{\text{MIP}}} \cdot 100\%)$ , где  $\text{makespan}_{\text{MIP}}$  и  $\text{makespan}_{\text{TBB}}$  – это общее время завершения работ, выполненных согласно расписаниям, построенным с помощью пакета CPLEX и библиотеки Intel TBB соответственно.

**Таблица.** Среднее преимущество  $\Delta$  оптимального решения по сравнению с TBB, %

	4 раб.	6 раб.	7 раб.	8 раб.	10 раб.
<b>Тривиальный ч.п.</b>	6	13,1	9,2	11,9	11,5
<b>Один-ко-многим-к-одному</b>	1,1	9,4	6,9	11,1	11,5
<b>Случайный ч.п.</b>	2,9	4	3,5	4,6	4
<b>Бинарное дерево</b>	3,7	4,9	4,8	9,4	10

Результаты тестирования, приведенные в таблице, показали, что в среднем по каждой серии примеров общее время завершения всех работ меньше, если их выполнять в соответствии с расписаниями, полученными пакетом CPLEX. Среднее преимущество по всем сериям составляет 7,2%. Максимальное среднее преимущество по серии составляет 13,1%. Максимальное преимущество по отдельно взятому примеру – 44,9%.

Наименьшее преимущество наблюдается для серий примеров, которые были сгенерированы с использованием случайного частичного порядка. Это объясняется тем, что данный тип частичного порядка обладает наибольшим количеством связей между работами и, соответственно, в большем количестве случаев библиотека Intel TBB находит оптимальные или близкие к ним расписания. И наоборот, наибольшее преимущество показывают серии примеров с тривиальным частичным порядком.

Вычисления проводились на ЭВМ Intel Core i7-8565U CPU 1.80 ГГц, оперативная память 16 Гб, с выключенными технологиями Turbo Boost и Hyper-Threading.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Сосновская М.Ю., Сахно М.А.* Построение расписаний процессора с учетом ограниченной пропускной способности шины данных // Сборник статей VII Региональной конференции магистрантов, аспирантов и молодых ученых по физике, математике и химии. – Омск: Изд-во ОмГУ, 2020. – С. 37-39
- [2] Intel Threading Building Blocks <https://github.com/oneapi-src/oneTBB>

---

Сахно Мария Юрьевна,  
Омский филиал Института математики им. С.Л. Соболева СО  
РАН,  
2 курс аспирантуры,  
644043, Омск-43, ул. Певцова 13, (3812)236739,  
[sosnovskayamy@gmail.com](mailto:sosnovskayamy@gmail.com)

# Гибридные алгоритмы решения некоторых задач упаковки в контейнеры

Е. В. Федотова

Научный руководитель: к.ф.-м.н. П. А. Борисовский

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются различные задачи упаковки в контейнеры, в частности новая постановка с ограниченным количеством контейнеров разного типа. Представлено два генетических алгоритма для данной задачи, которые используют разные схемы представления решений. Описана новая кодировка, основанная на использовании известного алгоритма First Fit Decreasing. Приведены результаты вычислительного эксперимента на тестовых наборах из литературы и на самостоятельно сгенерированных примерах.

**Ключевые слова:** задача упаковки с различными типами контейнеров, генетический алгоритм, схема представления.

Задача упаковки в контейнеры является известной NP-трудной задачей комбинаторной оптимизации и имеет множество формулировок. Классическая постановка состоит в том, чтобы упаковать набор из  $n$  предметов с заданными весами в минимальное количество одинаковых контейнеров, для которых известна вместимость [2]. Если кроме веса для предметов задан период их существования, то имеем дело с темпоральной задачей [3]. Постановка, в которой веса предметов и вместимости контейнеров заданы векторами называется многомерной (векторной) [1]. На практике может возникнуть задача упаковки с неодинаковыми контейнерами, которая формулируется следующим образом: дано несколько типов контейнеров с разной вместимостью, также задана стоимость контейнеров для каждого типа. Необходимо упаковать все предметы в контейнеры так, чтобы стоимость упаковки была минимальной [4]. В данной статье рассматривается такая постановка с добавлением ограничения на количество контейнеров каждого типа.

Для приближенного решения задач упаковки могут применяться различные алгоритмы жадного типа. Хорошие

результаты на практике показывают известные эвристики First Fit (FF) и First Fit Decreasing (FFD). В начале работы обоих алгоритмов открыт один контейнер. Алгоритм FF просматривает предметы в некотором заданном порядке и каждый очередной предмет помещает в первый подходящий (имеющий достаточно свободного места для данного предмета) контейнер. Если для предмета не найден подходящий контейнер из числа открытых, то открывается новый, и предмет помещается в него. Принцип работы алгоритма FFD такой же, но предметы рассматриваются в порядке убывания их весов.

Описанные жадные алгоритмы были использованы в генетических алгоритмах (ГА) для декодирования генотипов в решения. Реализованы ГА со следующими декодерами: декодер на основе перестановок (Seq-FF) и новый декодер на основе сдвигов (Shift-FFD). Генотип в обоих ГА состоит из двух  $n$ -мерных векторов. В первом из этих векторов, обозначенном  $t$ , содержатся номера типов контейнеров для каждого предмета. Второй частью генотипа для Seq-FF декодера служит вектор  $\pi$ , являющийся перестановкой предметов. Чтобы для данного генотипа  $g = (t, \pi)$  получить решение задачи, необходимо для каждого типа контейнера выбрать предметы в соответствии со значениями вектора  $t$  и применить алгоритм FF, рассматривая предметы в порядке, заданном перестановкой  $\pi$ . Декодер Shift-FFD использует вектор  $s$  для определения отклонений от решения, полученного алгоритмом FFD. Если предмет  $j$  был назначен алгоритмом FFD в контейнер номер  $k$ , то декодер размещает предмет  $j$  в контейнер с номером  $k + s_j$ .

Для вычислительного эксперимента использовались следующие тестовые данные: набор из статьи [1] для двумерной векторной задачи, наборы из [5] и [4] для задачи упаковки с разными типами контейнеров. Результаты, полученные ГА с Seq-FF декодером для первого набора незначительно лучше результатов другого ГА, для двух последних наборов, наоборот, некоторое преимущество у ГА с декодером Shift-FFD. Тестовые данные для темпоральной задачи — это 23 примера, которые описаны в [3]. Все примеры этой серии решены оптимально ГА с декодером Seq-FF, ГА с другим декодером не дал ни одного оптимального решения. Для задачи с разными типами

контейнеров и ограничением на их количество было сгенерировано два набора данных. На примерах этих наборов ГА показывают похожие результаты, хотя некоторые примеры не были решены алгоритмом с декодером Seq-FF, в то время как применение декодера Shift-FFD позволило найти решения хорошего качества.

В результате вычислительных экспериментов было выявлено, что два ГА на всех наборах данных показывают примерно одинаковые результаты. Некоторое преимущество на примерах для задачи с разными типами контейнеров отмечено в решениях, найденных ГА с декодером Shift-FFD. Для задачи с одним типом контейнеров лучшие результаты показал ГА с декодером Seq-FF.

Работа выполнена при частичной поддержке Математического Центра в Академгородке, соглашение с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации номер 075-15-2019-1613.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Caprara A., Toth P.* Lower bounds and algorithms for the 2-dimensional vector packing problem // *Discrete Applied Mathematics*. 2001. 111(3). P. 231–262.
- [2] *Delorme M., Iori M., Martello S.* Bin packing and cutting stock problems: Mathematical models and exact algorithms // *European Journal of Operational Research*. 2016. 255(1). P. 1–20.
- [3] *Furini F., Xueying S.* Matheuristics for the Temporal Bin Packing Problem // In *Amodeo L., Talbi E.-G., Yalaoui F.* (eds), *Recent Developments in Metaheuristics*. Springer. 2018. P. 333–345.
- [4] *Haouari M., Serairi M.* Heuristics for the variable sized bin-packing problem // *Comput Oper Res*. 2009. 36(10), P. 2877–84.
- [5] *Monaci M.* Algorithms for packing and scheduling problems. PhD thesis. University of Bologna. 2002.

---

Федотова Евгения Владимировна,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
2 курс магистратуры, ФМИТ, 644077, Омск, пр. Мира 55-А,  
(3812)644238, ev.fed1500@gmail.com

# Корпусно-конкатенативный синтез, его приложения и реализация

А. В. Хилько

Научный руководитель: к.т.н., доцент А. Л. Агафонов

**Аннотация:** В последнее время корпусно-конкатенативные методы синтеза привлекают всё больше внимания со стороны совершенно разных отраслей науки и искусства. Основание данного вида синтеза лежит в использовании крупных баз данных, содержащих различные вариации звуковых сегментов, которые в дальнейшем служат в качестве «строительных блоков» для достижения желаемой звуковой дорожки. С увеличением объёма подобных баз данных происходит прирост числа возможностей по достижению недоступных ранее результатов, которые могут в себя включать: «озвучивание» видеозаписей, создание высококачественного речевого синтеза, широкое применение в области музыкальных выступлений и создании композиций. В данной работе будет проведен обзор основных принципов и методов реализации конкатенативного синтеза и описан проект FluCoMa, в рамках которого разрабатывается инструментарий для создания собственных решений, основанных на корпусно-конкатенативном подходе.

**Ключевые слова:** конкатенативный синтез, методы звуковой обработки, сегментация, анализ дескрипторов, спектральное сравнение, звуковые базы данных.

## Введение

В последнее время корпусно-конкатенативные методы синтеза привлекают всё больше внимания со стороны совершенно разных отраслей науки и искусства. Основание данного вида синтеза лежит в использовании крупных баз данных, содержащих различные вариации звуковых сегментов, которые в дальнейшем служат в качестве «строительных блоков» для достижения желаемой звуковой дорожки.

С увеличением объёма подобных баз данных происходит прирост числа возможностей по построению недоступных ранее результатов, которые могут в себя включать: «озвучивание» видеозаписей, создание высококачественного речевого синтеза,

широкое применение в области музыкальных выступлений и создании композиций.

Используется содержимое указанных баз преимущественно следующим образом: все находящиеся в ней звуки делятся на «единицы» и сортируются на группы, после чего по некоторому алгоритму происходит отбор из разных групп в попытке заполнить «целевой» звуковой фрагмент. Отбор происходит при помощи дескрипторов проанализированных звуковых единиц базы данных – набора характеристик, присвоенных им во время анализа. Наиболее подходящие единицы группируются в цепочку для заполнения целевой звуковой дорожки, обрабатываются для наиболее естественного и точного звучания и объединяются в единое целое. Чем больше исходная база данных – тем меньше надобность в дальнейшей обработке выбранных частиц и выше шанс подобрать наиболее точный звуковой отрезок. Таким образом может достигаться высокая точность в формировании звучания целевого результата: например, партии определённого музыкального инструмента или куски речи, которые потребовалось синтезировать.

Разработка в области корпусно-конкатенативного синтеза затрагивает несколько различных отраслей исследований, в основном в области цифровой обработки сигналов (анализ, синтез, сравнение), компьютерных наук (работа с базами данных), статистики и машинного обучения (классификация), музыкальное моделирование и интеракции в режиме реального времени.

Подход, основанный на работе с данными в области создания и моделирования звука, во многом обязан исследованиям, проводившимся на протяжении последних 20 лет в области синтеза речи [5]. Наиболее близкое обычному человеку использование данного синтеза – технология «text-to-speech (TTS)», встроенная во многие крупные онлайн-переводчики, предназначенная для воспроизведения вслух полученного при переводе текста.

Многие композиторы используют данный вид синтеза для того, чтобы передать определённую атмосферу и настроение: подбирая особым образом базу звуков, из которых будет

заполняться целевое полотно, можно получать результат, содержащий необходимый эмоциональный окрас, что часто используется, например, при создании музыкальных сопровождений ко всякого рода выставкам [4] и даже при создании саундтреков к кинофильмам [2].

### **Описание метода**

Как уже отмечалось, конкатенативный синтез тесно связан с понятием базы данных, заполняющих её звуковых единиц, целевых моделей звука – всё это помогает нам создавать наиболее натуральные и плавные переходы между отдельными звуковыми частицами, выбирая единицы с наиболее совпадающим звуковым «контекстом». Информация, содержащаяся в исходных звуковых дорожках, анализируется и применяется при совершаемом процессе выбора подходящих звуковых единиц. Процесс анализа, сортировки, выбора аудиоматериала может управляться при помощи высокоуровневых контролируемых параметров синтеза – те параметры, к которым имеет доступ, например, композитор во время живого выступления, позволяющие на ходу кардинально менять образ звучания синтезатора [1].

Ссылки на исходные файлы, модули и дескрипторы модулей хранятся в базе данных. Подмножество базы данных, предварительно выбранное для одного конкретного синтеза, называется корпусом. Часто база данных неявно состоит из набора файлов. Реже используется реляционная или другая система управления базами данных (СУБД), которая может работать локально или на сервере. Базы данных звуков в Интернете с прямым доступом к звукам и дескрипторам также постепенно набирают популярность и становятся отличным источником для составления корпусов звуков.

Анализ – процесс разбиения и анализа единиц исходных данных с целью заполнения дескрипторов – численных данных, описывающих различные характеристики звукового материала. Перед включением в базу исходные звуковые файлы должны быть сегментированы по времени на единицы, что может быть выполнено путем автоматического выравнивания музыки с ее партитурой для слепой сегментации корпусов инструментов в соответствии с переходными процессами или спектральными

изменениями или произвольной сегментацией зерна для исследовательского синтеза и повторного синтеза; или это может произойти на лету. Deskриптор — это значение, описывающее определенное качество звука, которое может меняться со временем или быть постоянным. Целевая спецификация генерируется как последовательность единиц со значениями их целевых дескрипторов из символической оценки или анализируется из звуковой оценки (с использованием тех же методов сегментации и анализа, что и для исходных звуков).

Отбор единиц базы данных, наиболее подходящих под единицы звука целевого образа, происходит в соответствии с функцией расстояния и функцией качества конкатенации. Выбор может быть локальным (наилучшее совпадение для каждого целевого объекта находится индивидуально) или глобальным (находится последовательность с наименьшим общим расстоянием). Алгоритм выбора блоков/единиц имеет решающее значение, поскольку в нём содержатся все возможности конкатенативного синтеза на основе корпуса. Можно обозначить два основных класса алгоритмов: выбор путевым поиском, который является расширением классического алгоритма, используемого в синтезе речи, и выбор единицы, основанный на разрешении ограничений. Чаще всего используется простой локальный поиск наилучшей подходящей единицы без учета контекста, который можно рассматривать как вырожденную форму алгоритма выбора единицы поиска пути, но который использует ту же структуру функций расстояния.

Функции расстояния являются основной оценкой, которая определяет алгоритм выбора единиц для нахождения оптимальной последовательности единиц целевой спецификации.

Целевое расстояние выражает соответствие между целевой единицей и единицами базы данных. Это совпадение может быть основано на дескрипторах, прямом совпадении сигнала, спектральном совпадении или спектроморфологическом совокупном совпадении [3].

Задачей алгоритма поиска пути является нахождение наименее затратного с точки зрения функции расстояния

перехода от последовательности единиц корпуса к целевой последовательности.

Однако для музыкальных приложений существует ряд ограничений, связанных с достижимостью благоприятности звучания. Для этого вводится понятие «разрешения ограничений» [7] – наборы функций ошибок, допустимые при построении последовательностей.

Синтез – процесс выстраивания, заполнения целевого звукового образа данными, взятыми из базы данных. В процессе синтеза принимаются во внимание основные характеристики звуковых единиц желаемой дорожки для подбора наиболее подходящих частиц звука из базы: высота тона, амплитуда, тембральные характеристики. Описанный процесс напоминает процесс сбора мозаики – когда целостная картина заполняется кусочками различной формы, несущими на себе крупички заранее созданного изображения. В англоязычной литературе пионеры такого подхода, разработчики этот процесс так и называют – ‘audio mosaicing’ [6], [7].

### **Реализация**

На данный момент систем, реализующих конкатенативный синтез не так много, а инструментария, предоставляющего методы по разработке таких систем – ещё меньше. Однако активная разработка в этом направлении ведётся прямо сейчас, что в очередной раз доказывает актуальность и перспективность данной технологии. Одним из наиболее бурно развивающихся проектов является Fluid Corpus Manipulation project (FluCoMa), в рамках которого уже разработаны две итерации набора по разработке и изучению конкатенативно-корпусных музыкальных систем. Несмотря на совсем недавний старт проекта, достигнуты результаты, позволяющие в рамках использования разработанного инструментария создавать в среде Max/Msp свои собственные виртуальные реализации инструментов, использующих корпусно-конкатенативный синтез в качестве основного способа генерации и анализа звука. Данный набор в виде свободно распространяемой библиотеки для языка и среды разработки Max состоит преимущественно из 6 различных функциональных категорий программ (называемых «патчами»), где каждый блок

нацелен выполнять определённую задачу -- все они приведены на рисунке 1.

Analyse Data	Analyse Sound	Utility	Decompose	Slicing	Transform
BufStats	AmpFeature	BufCompose	BufNMF	AmpGate	AudioTransport
DataSet	BufNNSVD	BufFlatten	HPSS	AmpSlice	NMFCross
DataSetQuery	BufSTFT	BufScale	Sines	NoveltySlice	NMFFilter
Grid	Chroma	BufSelect	Transients	OnsetSlice	NMFMorph
KDTree	Loudness	BufSelectEvery		TransientSlice	
KMeans	MeiBands	BufThresh			
KNNClassifier	MFCF				
KNNRegressor	NMFMatch				
LabelSet	NoveltyFeature				
MDS	OnsetFeature				
MLPClassifier	Pitch				
MLPRegressor	SpectralShape				
Normalize					
PCA					
RobustScale					
Standardize					
Stats					
UMAP					

**Рисунок 1.** Проект FluCoMa

Analyse Data (“Анализ данных”) – набор компонент, используемых для работы с исходным набором данных – корпусом. Сюда входит как работа по составлению, заполнению, группировке данных, так и работа по их анализу; в частности, для задач классификации, стандартизации, анализа статистики используются методы машинного обучения и алгоритм k-ближайших соседей.

Analyse Sound (“Анализ звука”) – блок патчей, необходимых для анализа содержимого звуковых файлов: при помощи различных алгоритмов происходит сбор и получение данных по амплитудным, спектральным, тембральным и другим характеристикам исходного звукового сигнала.

Utility (“Вспомогательные”) – работа с буффером и памятью.

Decompose (“Декомпозиция”) – разбиение исходных дорожек на составные элементы на основе их спектральных характеристик.

Slicing (“Нарезка”) – деление звуковой дорожки на временные промежутки, имеющие смысл с композиционной точки зрения.

Transform (“Преобразования”) – способы изменения звуковых единиц для достижения наилучшего результата.

Благодаря данному набору функций получается открыть абсолютно новый горизонт в области генерации и анализа звука.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Aucouturier J.-J., Pachet F.* Jamming with plunderphonics: Interactive concatenative synthesis of music // *J. New Music Res.* Vol. 35, N 1. 2006. P. 35–50.
- [2] *Cardle M.* Automated sound editing // *Comput. Laboratory, Univ. of Cambridge, UK: Tech. Rep.*, 2004.
- [3] *Casey M.* Acoustic lexemes for organizing internet audio // *Contemp. Music Rev.* Vol. 24, N 6. 2005. P. 489–508.
- [4] *Hoskinson R., Pai D.* Manipulation and resynthesis with natural grains // *In Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC)*, Havana, Cuba, 2001. P. 338–341.
- [5] *Prudon R.* A selection/concatenation TTS synthesis system // *Ph.D. dissertation, LIMSI, Université Paris XI, Orsay, France*, 2003.
- [6] *Sturm B.L.* MATConcat: An application for exploring concatenative sound synthesis using MATLAB // *In Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC)*, Miami, FL, 2004. P. 641–644.
- [7] *Zils A., Pachet F.* Musical mosaicking // *In Proc. COST-G6 Conf. Digital Audio Effects (DAFx)*, Limerick, Ireland, 2001.

---

Хилько Александр Владиславович,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
1 курс магистратуры, ФМИТ,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)644238

**Вычисление констант связи ренормгруппового преобразования трёхмерной неупорядоченной модели Изинга**

В. В. Бражник

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. А.Н. Вакилов

**Аннотация.** Было проведено моделирование методом Монте-Карло термодинамического поведения трёхмерной модели Изинга вблизи критической точки с применением кластерного алгоритма Вольфа. С использованием метода перевзвешивания были вычислены различные термодинамические величины, такие, как: намагничённость, восприимчивость, корреляционная длина и ренормализационная константа связи, определяющая фиксированную (неподвижную) точку ренормализационного преобразования.

**Ключевые слова:** трёхмерная модель Изинга, методы Монте-Карло, метод перевзвешивания, ренормализационная константа связи.

Современные методы исследования фазовых переходов и критических явлений открывают всё больше возможностей для исследователей. С повышением мощности вычислительной техники растут возможности и появляются новые результаты в области изучения критических явлений [1]. Трёхмерная неупорядоченная модель Изинга всё ещё остаётся актуальной [2] для изучения и численного моделирования, ведь именно с помощью данной модели можно описать многие реально существующие системы.

Модель Изинга является простейшей и наиболее распространенной решёточной моделью и предназначена для описания намагничивания материала.

Гамильтониан трёхмерной неупорядоченной модели Изинга имеет вид:

$$H = -J \sum_{i,j}^N p_i p_j S_i S_j,$$

где  $J$  - это константа обменного взаимодействия между спинами, а  $p_i$  - числа заполнения, принимающие значения 0.1 и описываемые функцией распределения вида:

$$P(p_i) = (1 - p)\delta p_i + \delta(1 - p_i)$$

с  $p = 1 - c$ , где  $c$  - концентрация атомов примеси. Значение критической температуры трёхмерной неупорядоченной модели Изинга было получено в [3] данной работе и составляет  $T_c = 4.26267$ .

Для поставленных в работе целей подходил кластерный алгоритм Вольфа [4], который нейтрализует влияние эффектов критического замедления вблизи критической точки.

В качестве метода расчёта подошёл метод перевзвешивания [5], который позволил при моделировании системы в небольшом температурном диапазоне вокруг критической точки его немного расширить, тем самым экономя время и вычислительные мощности. Формула перевзвешивания имеет вид:

$$\langle O \rangle_\beta = \frac{\sum_E O(E) h_\beta}{\sum_E h_\beta(E)} = \frac{\sum_E O(E) h_{\beta c}(E) e^{-(\beta - \beta c)E}}{\sum_E h_{\beta c}(E) e^{-(\beta - \beta c)E}},$$

где  $E$  - энергия системы,  $h_\beta(E)$  - число состояний с энергией  $E$ .

В данной работе вычислялись следующие физические величины: намагниченность системы

$$M = \sum_i^N S_i$$

Восприимчивость

$$\chi = \frac{\langle M^2 \rangle - \langle M \rangle^2}{kT}$$

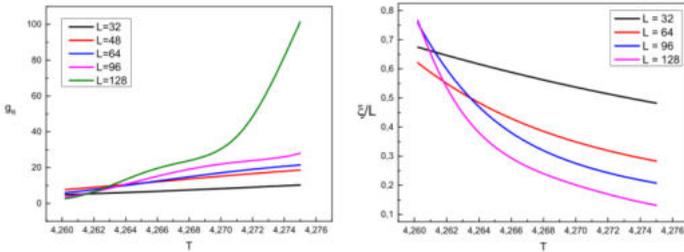
Корреляционная длина

$$\xi = \frac{1}{2 \sin\left(\frac{\pi}{L}\right)} \sqrt{\frac{\chi}{F} - 1}$$

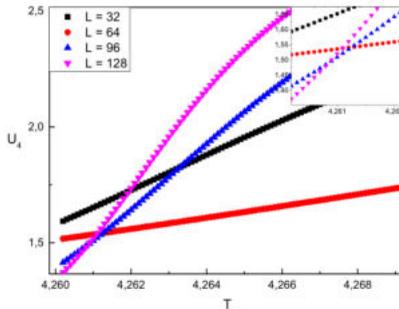
Ренормализационная константа связи

$$g_R = 3 \left( \frac{L}{\xi} \right)^3 \left( 1 - \frac{\langle M^4 \rangle}{3 \langle M^2 \rangle^2} \right)$$

В работе было проведено моделирование систем с линейными размерами решёток  $L = 32, 48, 64, 96, 128$  при критической температуре  $T_c = 4.26267$ . Усреднение термодинамических величин проводилось по  $2 \cdot 10^6$  состояниям, соответствующим одному шагу Монте-Карло. Были получены температурные и размерные зависимости константы связи для неупорядоченной системы, а благодаря полученному кумулянту Биндера удалось оценить критическую температуру фазового перехода, которая хорошо согласовывается с полученной ранее в работе [3].



**Рисунок 1.** Температурная зависимость константы связи  $g_R$  и зависимость от отношения  $\xi/L$



**Рисунок 2.** Температурная зависимость кумулянта Биндера  $U_4$

В отличие от других работ по вычислению констант связи метод перевешивания позволяет проводить вычисления

вблизи критической температуры, обеспечивая большую точность получаемых значений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Jiahao Xu, A.M. Ferrenberg, D.P. Landau.* 92 Years of the Ising Model: A High Resolution Monte Carlo Study // 2018. Journal of Physics: Conference Series. V. 1012, P. 012002.
- [2] *D. Zhang.* Exact Solution for Three-Dimensional Ising Model // 2021. Symmetry. V. 13. № 10. P. 1837.
- [3] *Прудников В.В., Прудников П.В., Вакилов А.Н., Криницин А.С.* Компьютерное моделирование критического поведения трехмерной неупорядоченной модели Изинга // ЖЭТФ. 2007. Т. 132, вып. 2. С. 417-425.
- [4] *Wolf U.* Collective Monte Carlo updating for spin systems // Phys. Rev.Lett. 1989. V. 62. P. 361–364.
- [5] *Ferrenberg R H and Swendsen R H,* New Monte Carlo technique for studying phase Transitions// Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. P. 2635-2638.
- [6] *Baker, Jr. G. A. and Kawashima N.*Renormalized Coupling Constant for the Three-Dimensional Ising Model // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. P. 995-997

---

Бражник Валерия Владимировна,  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
1 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск, пр. Мира 55-А, (3812) 647787,  
brazhnik\_valeria@mail.ru

# Моделирование методом Монте-Карло критических свойств усложненного спинового вентиля

А. С. Егорина

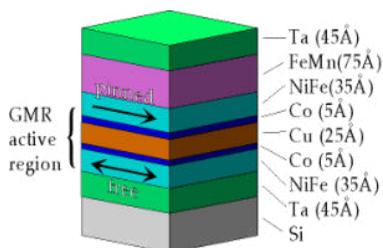
Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор П. В. Прудников

**Аннотация.** В данной работе рассмотрено критическое поведение спиновых систем и термодинамических характеристик, описывающих критическое поведение. Исследовано неравновесное поведение усложненного спинового вентиля. Выявлены эффекты старения.

**Ключевые слова:** спиновый вентиль, неравновесное поведение, медленная динамика, эффекты старения.

Физика ультратонких магнитных пленок с толщинами от одного-двух атомных слоев до нескольких десятков слоев является направлением интенсивных научных исследований в течении последних лет [1]. Повышенный интерес ученых вызван целым рядом уникальных свойств пленок, отличающихся от свойств объемных материалов, что обуславливает важность этих новых объектов как для развития фундаментальных основ физики магнетизма и физики поверхности, так и для практического приложения [2].

Ультратонкие пленки из магнитных металлов и сплавов являются составляющими элементами магнитных спин-вентильных структур, которые активно применяются в устройствах с эффектами гигантского магнитосопротивления (ГМС) [3].



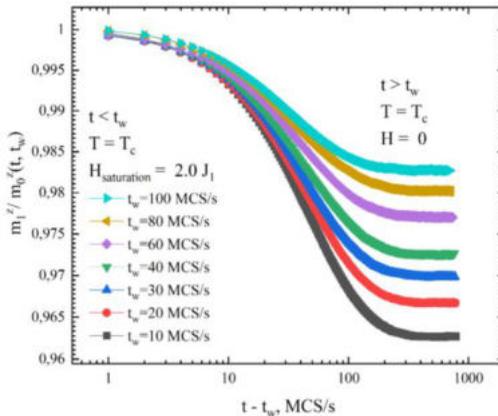
**Рисунок 1.** Спин-вентильная структура на основе ультратонких магнитных пленок [4].

Гамильтониан анизотропной модели Гейзенберга с анизотропией типа <<легкая ось>>, используемый для моделирования свойств ферромагнитной пленки в спин-вентильных структурах:

$$H = -J \sum_{\langle i, j \rangle} [(1 - \Delta(N))(S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) + S_i^z S_j^z] - h \sum_i S_i$$

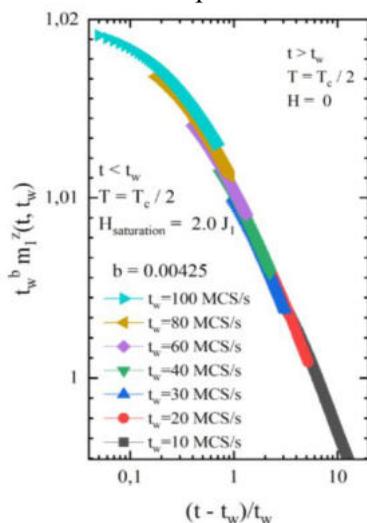
где  $\langle i, j \rangle$  показывает, что суммирование идет по ближайшим соседям;  $J$  - константа, характеризующая обменное взаимодействие между спинами  $S_i$ , закрепленными в узлах гранцентрированной кубической решетки;  $S_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$ -трехмерный единичный вектор;  $h = g\mu_0\mu_H H$  - переменная, характеризующая внешнее магнитное поле;  $\Delta$  - параметр анизотропии, зависящий от толщины слоев  $N$ .

На рис. 2 представлен график зависимости намагниченности  $m_1^z/m_0^z$  от времени наблюдения  $t - t_w$  ( $t_w = 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100$  MCS/s) демонстрирует поведение системы, где при увеличении времени ожидания  $t_w$ , процесс релаксации системы происходит в более длительный промежуток времени.



**Рисунок 2.** Зависимость намагниченности  $m_1^z/m_0^z$  от времени наблюдения  $t - t_w$  ( $t_w = 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100$  MCS/s).

Более длительное время “подготовки” образца увеличивает процесс его релаксации. Из этого следует, что в данной зависимости в усложненной спин-вентильной структуре наблюдаются эффекты старения. Данная зависимость дает универсальную картину эффектов старения, поэтому следующим этапом работы было построение динамического скейлинга, представленного на рис. 2.



**Рисунок 3.** Скейлинговая зависимость намагниченности  $t_w^b m(t, t_w)$  при  $b = 0.00425$  от времени  $(t-t_w)/t_w$  ( $t_w = 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100$  MCS/s).

Скейлинговая зависимость намагниченности  $t_w^b m(t, t_w)$  при  $b = 0.00425$  от времени  $(t-t_w)/t_w$ , характеризующаяся наложением кривых на графике  $t_w = 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100$  MCS/s, подтверждает наличие эффектов старения, представленных на рис. 2.

В данной работе было осуществлено исследование поведения спин-вентильной наноструктуры, которая описывается анизотропной моделью Гейзенберга с анизотропией типа “легкая ось” методами Монте-Карло. Было осуществлено исследование неравновесного поведения усложненной спин-вентильной структуры. Была показана

зависимость приведенной намагниченности  $m_1^z/m_0^z$  от времени наблюдения  $t-t_w$ , которая характеризует поведение релаксации намагниченности. Было продемонстрировано поведение системы, где при увеличении времени ожидания  $t_w$  процесс релаксации системы происходил за более длительный промежуток времени. Это подтверждает то, что в данной зависимости в усложненной спин-вентильной структуре наблюдаются эффекты старения. Наличие эффектов старения подтверждается коллапсом данных для динамических скейлинговых зависимостей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-32-70189, Минобрнауки РФ (соглашение 0741-2020-0002) и гранта Президента РФ МД-2229.2020.2.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Vaz C.A.F., Bland J.A.C., Lauhoff G.* Magnetism in ultrathin film structures, Rep. Prog. Phys. 2008. Vol. 71 056501.
- [2] *В.В. Прудников, П.В. Прудников, М.В. Мамонова, М.А. Медведева,* Теоретические методы описания критических свойств ультратонких пленок: монография. - Омск: Изд-во Ом. гос. ун-та, 2016.138 с.
- [3] *Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Van Dau F.N., Petro F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J.* Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices, Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. P. 2472-2475.
- [4] *Anthony T. C., Brug J. A., Shufeng Zhang,* Magnetoresistance of symmetric spin valve structures. IEEE Transactions on Magnetics, 30(6), P. 3819–3821.

---

Егорина Анастасия Сергеевна,  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
1 курс магистратуры, Физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812) 647787,  
[anastasia.sergeevna.egorina@gmail.com](mailto:anastasia.sergeevna.egorina@gmail.com)

# Исследование динамического фазового перехода в тонких Гейзенберговских пленках

А. В. Ейхлер

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. П.В. Прудников

**Аннотация.** Исследовано динамическое поведение анизотропной модели Гейзенберга для определения свойств динамического фазового перехода методом Монте-Карло для сверхтонкой магнитной пленки.

**Ключевые слова:** модель Гейзенберга, динамический фазовый переход, методы Монте-Карло.

Исследование неравновесных явлений и их динамическое поведение представляет собой растущий интерес.

Явление динамического фазового перехода может описывать статистические процессы, применяемые к социальной деятельности человека [1], волны зарядовой плотности [2].

Динамический фазовый переход происходит при смене динамически неупорядоченной фазы на динамически упорядоченную [3], которое происходит при движении полупериода внешнего осциллирующего поля к критическому значению  $t_{1/2c}$ .

В данной работе исследовалась многослойная структура с толщиной слоев  $N$  и линейным размером  $L$ .

Анизотропный гамильтониан системы был выбран в виде:

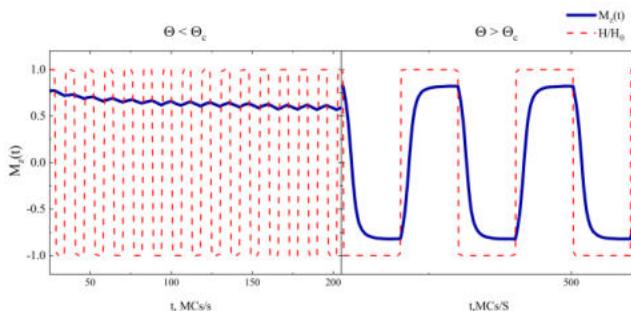
$$H = -J \sum_{i,j} [(1 - \Delta)(S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y)] - H(t) \sum_i S_i^z \quad (1)$$

где  $\vec{S}_i = (S_i^x, S_i^y, S_i^z)$ - трехмерный единичный вектор в узле. Расчеты ведутся в единицах обменного интеграла  $J$ .

$\Delta \neq 0$ , что соответствует анизотропной модели, значения которой для разного числа слоёв выбирались в соответствии с работой [4]. Температура имеет значение температуры Кюри для трехмерной модели Гейзенберга.

$H_0$  – амплитуда поля, которая зависит от полупериода внешнего поля  $H(t)$ . Поле направлено по оси  $O_z$ .

Для доказательства существования динамического фазового перехода необходимо определить динамически упорядоченную и неупорядоченную фазу, что представлено на рисунке 1.

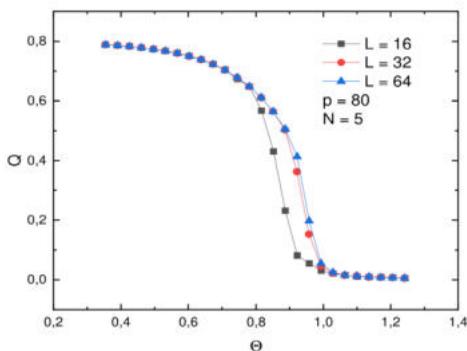


**Рисунок 1.** Значения намагниченности для динамически упорядоченного состояния (а) и динамически неупорядоченного (б) во внешнем осциллирующем поле.

Параметром порядка динамического фазового перехода является усредненная намагниченность по полупериоду  $t_{1/2}$ [3]:

$$Q = \frac{1}{2t_{1/2}} \int_0^{2t_{1/2}} m(t) dt \quad (2)$$

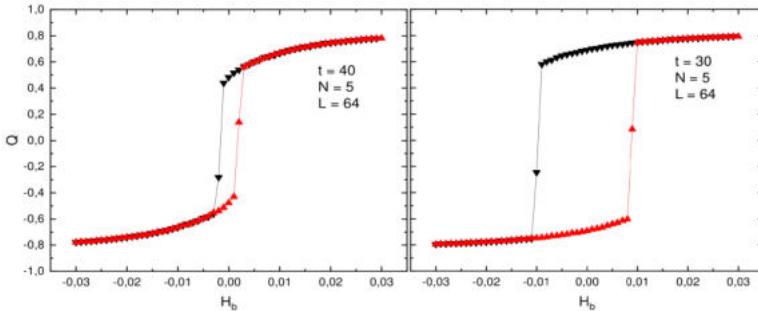
Полученные значения для  $Q$  представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Зависимость  $Q(\theta)$  для различных значений  $L$ .

Параметр  $\Theta$  выбирался из соотношения  $t_{1/2}/\tau$ , полу период деленный на время метастабильного состояния.

Проводилось исследование петель гистерезиса, которые показаны на рисунке 3.

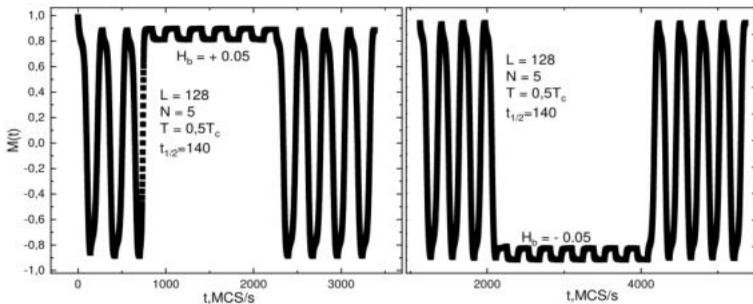


**Рисунок 3.** Зависимость  $Q$  от поля смещения  $H_b$  для значений полу периодов  $t_{1/2} < t_{1/2c}$ .

Квадратная петля гистерезиса говорит о качественном изменении намагниченности под действием полей смещения  $H_b$ , которые задавались в виде:

$$H_b = \langle H(t) \rangle = \frac{1}{2t_{1/2}} \int_0^{2t_{1/2}} H(t) dt \quad (3)$$

Динамический отклик для осцилляции намагниченности представлен на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Динамический отклик в поведении намагниченности  $M(t)$  при добавлении поля смещения  $H_b$

Динамический отклик находится в согласии с экспериментом и показывает возможность управления фазами [5].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение 0741-2020-0002).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Slavko B., Glavatskiy K., Prokopenko M.* Dynamic resettlement as a mechanism of phase transitions in urban configurations // *Phys. Rev. E*, 99, 042143 2019.
- [2] *Ogawa N., Murakami Y., Miyano K.* *Phys. Rev. B.* 2002. 65, 155107.
- [3] *Korniss G., White C.J., Rikvold P. A., Novotny M. A.* Dynamic phase transition, universality, and finite-size scaling in the two-dimensional kinetic Ising model in an oscillating field // *Phys. Rev. E* 2000. 63, 016120.
- [4] *Prudnikov P.V., Prudnikov V.V., Mamonova M.V., Piskunova N. I.* Influence of anisotropy on magnetoresistance in magnetic multilayer structures // *J.M.M.M.* 2019, 482, 201–205.
- [5] *MarínRamírez, J. M., Oblak, E., Riego, P., Campillo, G., Osorio J., Arnache O., Berger A.* Experimental exploration of dynamic phase transitions and associated metamagnetic fluctuations for materials with different Curie temperatures // *Phys. Rev. E* 2020, 102(2).

---

Ейхлер Алексей Викторович.

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского.

2 курс магистратуры, физический факультет.

644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)644238, alexey987@bk.ru

# Исследование зависимости энергетических и магнитных характеристик системы Fe/Pt/Fe от толщины составляющих структуру слоев

М. Ю. Макеев

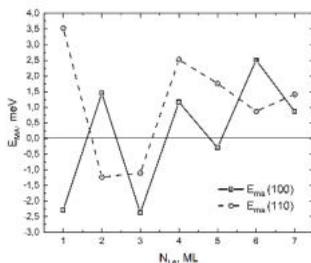
Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент М. В. Мамонова.

**Аннотация.** В рамках первопринципных расчетов с использованием программного комплекса VASP были проведены исследования системы Fe/Pt/Fe. Рассчитаны значения полной энергии, энергии магнитной анизотропии (ЭМА), а также параметра анизотропии  $\Delta$  граней (100) и (110) в зависимости от толщины пленки Fe.

**Ключевые слова:** VASP, полная энергия, энергия магнитной анизотропии, параметр анизотропии.

Интерес изучения магнитных пленок обусловлен широкой областью их применимости. Они находят применение в разных областях науки, например, в спин-вентельных системах [1], различных датчиках [2], в качестве магнитных носителей [3].

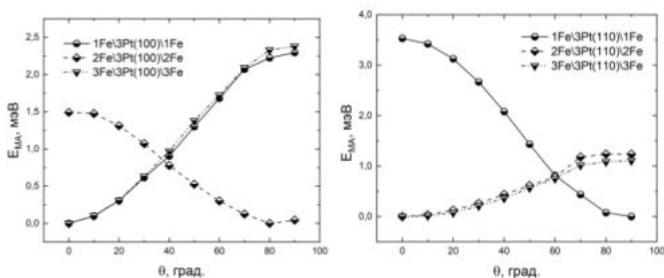
Магнитная анизотропия является одним из ключевых параметров магнитных материалов. Это релятивистское проявление связи между спином электрона и орбитальным моментом (спин-орбитальная связь) [4]. Модификация электронной структуры на поверхностях, вызывающая изменение магнитной анизотропии, приводит к интересному магнитному поведению в ультратонких магнитных пленках, продемонстрированному в [5].



**Рисунок 1.** Зависимость ЭМА от толщины пленки Fe. Для системы 1Fe/3Pt/1Fe, граней (100) и (110).

Изучим влияние толщины магнитной пленки, фиксируя толщину немагнитной подложки. Результаты расчетов энергии магнитной анизотропии для граней (100) и (110) для толщины подложки в 3 монослоя и толщинах пленки от 1 до 7 монослоев представлены на рис. 1. Значение ЭМА рассчитывалось по формуле  $E_{MA} = E_{\perp} - E_{\parallel}$ . Максимум ЭМА наблюдается для моноатомной пленки. С увеличением толщины пленки Fe, преобладает анизотропии типа легкая плоскость ( $E_{ma} > 0$ ). Наблюдается сходимость ЭМА к значению 1.0 meV.

Рассмотрим пленки в 1-3 монослоя. Для грани (110) более энергетически выгодными являются анизотропия в плоскости (монослой) и анизотропия типа легкая ось (два и три атомных слоя). Для грани (100): анизотропия типа легкая ось (1 и 3 атомных слоя), анизотропия в плоскости (два атомных слоя). Исследуем значение ЭМА для этих толщин, изменяя угол направления намагниченности от  $\Theta = 0$  (перпендикулярно плоскости) до  $\Theta = 90$  (лежит в плоскости). В данном случае ЭМА рассчитывалось по формуле  $E_{MA} = E_{hkl} - E_{min}$ , где  $E_{hkl}$  - полная энергия, а  $E_{min}$  - минимальное значение энергии, которое находится при  $\Theta=0$ , если преобладает перпендикулярная анизотропия, или при  $\Theta = 90$ , если анизотропия в плоскости.



**Рисунок 2.** Значение ЭМА для ФМ систем, граней (100) и (110) в зависимости от угла направления магнитного момента в плоскости XZ для систем, состоящих из трех монослоев платины и толщинах ферромагнитной пленки от одного до трех слоев.

На рис. 2 видно плавное изменение значения ЭМА при смене угла направления проекции намагниченности. Минимум наблюдается при  $\Theta = 0$  или  $\Theta = 90$ .

Получим параметр анизотропии  $\Delta$

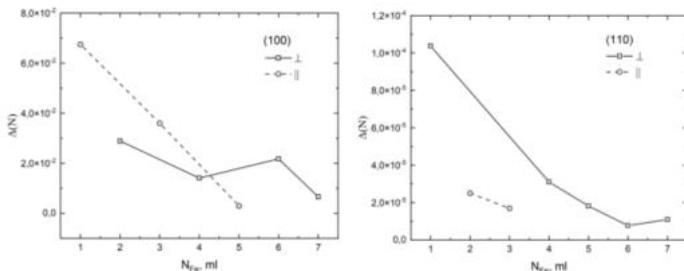
$$H_{\parallel} = - \sum_{i,j} J_{i,j} \{ S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y + (1 - \Delta_1) S_i^z S_j^z \} \quad (1)$$

$$H_{\perp} = - \sum_{i,j} J_{i,j} \{ (1 - \Delta_2) S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y + S_i^z S_j^z \} \quad (2)$$

Выразим из данных гамильтонианов  $\Delta_{\parallel}$  и  $\Delta_{\perp}$

$$\Delta_{\parallel} = \frac{E_x - E_z}{E_x} \quad \Delta_{\perp} = \frac{E_z - E_x}{E_z} \quad (3)$$

где  $\Delta_{\parallel}$  соответствует гамильтониану типа легкая плоскость, а  $\Delta_{\perp}$  гамильтониану типа легкая ось. Значения  $E_z$  и  $E_x$  соответствуют значению полной энергии, находящейся в плоскости и перпендикулярно плоскости, соответственно. Из рис. 2 и (3), получим  $\Delta$  для граней (100) и (110).



**Рисунок 3.** Рассчитанные значения параметра анизотропии  $\Delta$  для граней (100) и (110), при изменении толщины пленки железа.

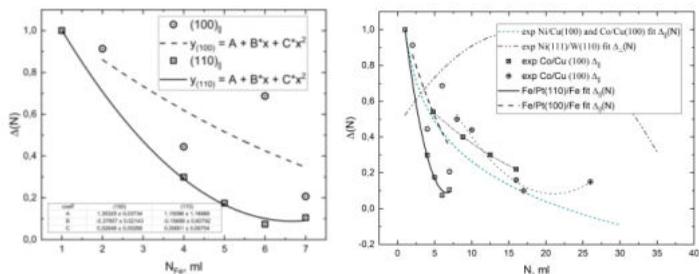
Параметр  $\Delta$  должен находиться в интервале от 0 до 1, поэтому примем максимальное значение, соответствующее монослойной пленке, за единицу, а затем аппроксимируем полученные данные.

**Таблица. 1.** Значение  $\Delta$  для анизотропии типа легкая ось

Грань	(100)	(110)
$\Delta_{\perp}$	0,182	0,242
	0,960	0,163

На рис. 4 представлены аппроксимированные параболой значения  $\Delta_{\parallel}$  для граней (100) и (110). Значения для  $\Delta_{\perp}$ , в связи с малым количеством точек, были вынесены в таблицу 1. Как

видно из рис. 4 аппроксимация  $\Delta_{||}$ , для системы Fe/Pт имеет схожее поведение с результатами, полученными из эксперимента для системы Co/Cu [6].



**Рисунок 4.** Зависимость параметра анизотропии  $\Delta$  параллельно плоскости от толщины пленки Fe; экспериментальные данные  $\Delta_1$  - Ni/Cu(001) и Co/Cu(001) [6],  $\Delta_2$  - для Ni(111)/W(110)[7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение 0741-2020-0002).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ennen I., Kappe D., Rempel T., Glenske C., Hutten A.* Sensors. 2016. V. 16. P. 904.
- [2] *Freitas, P., Ferreira, R., Cardoso, S., Cardoso, F.* J. Phys. Condens. Matter. 2007. V. 19. P. 165–221.
- [3] *Johnson M. T., Bloemen P. J. H., den Broeder F. J. A.,* Rep. Prog. Phys. 1996. V. 59. P. 1409–1458.
- [4] *Vaz C. A. F., Bland J. A. C., Lauhoff G.* Rep. Prog. Phys. 2008. V. 71. P. 51.
- [5] *Gradmann, U., Muller, J.* Phys. Status Solidi. 1968. V. 27. P. 313.
- [6] *Huang, F.* Phys. Rev. B, 1994. V. 49. P. 3962.
- [7] *Li and Baberschke.* Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68, P. 1208.

---

Макеев Михаил Юрьевич,  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
2 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)647787,  
mihailmaki603@gmail.com

## Исследование магнитных свойств кирального гелимагнетика $\text{CrNb}_3\text{S}_6$

А. В. Минькова

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Прудников П.В.

**Аннотация.** В данной работе было проведено компьютерное моделирование магнитных свойств одноосного кирального гелимагнетика  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$ . Было получено, что с увеличением поля, поведение намагниченности меняется, а увеличение или уменьшение константы Дзялошинского-Мория при значении внешнего магнитного поля  $H = 0$  дает малые изменения, что говорит о необходимости его введения.

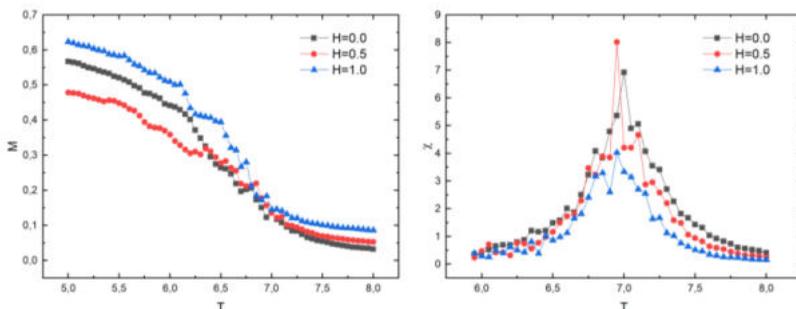
**Ключевые слова:** киральный гелимагнетик, взаимодействие Дзялошинского-Мория.

Все биологические значимые молекулы существуют как один из двух возможных зеркальных изомеров — это пример полного нарушения киральной симметрии. Образование спирали и единое фиксированное направление вращения спинов, снятие вырождения по киральности, обусловлено антисимметричным косвенным взаимодействием Дзялошинского-Мория, вызванное отсутствием инверсионной симметрии и сильной спин-орбитальной связью [1].

Инверсия пространства включает в себя геометрическую симметрию, а инверсия времени — динамическое движение. Сущность винтовой структуры следует рассматривать как сочетание пространственного вращения и перемещения. Понятие киральности устанавливает связь между геометрией и динамикой. Статические спиральные структуры различаются с точки зрения исходного определения киральности, описывающего лево- или правосторонность. Преобразование геометрии в динамику на киральной основе естественным образом приводит к материальным функциональным возможностям во всех областях естественных наук [2-4].

В данной работе проводится численное моделирование методами Монте-Карло магнитных свойств одноосного кирального гелимагнетика  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$ , который обладает слоистой структурой и является металлическим ферромагнетиком. Антисимметричное обменное взаимодействие Дзялошинского-Мория может существовать из-за отсутствия инверсионной симметрии в центре между двумя соседними атомами Cr [5].

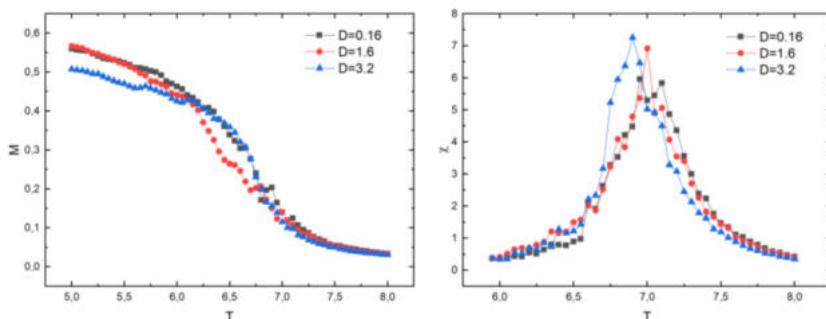
Компьютерное моделирование проводилось при линейном размере системы  $L = 8 \times 8 \times 128$  монослоев. Параметр анизотропии типа «легкая плоскость» выбирался  $K = 0.5J_1$ , а величина внешнего магнитного поля менялась при исследовании  $H=0.0, 0.5, 1.0 \mu_b$ ; Значения константы взаимодействия Дзялошинского-Мория рассматривалось в трех разных случаях:  $D=0.16, 1.6, 3.2 J_1$ . Число шагов Монте-Карло, отводимых на релаксацию системы равнялось  $\text{MCS}_{\text{rel}} = 10000$ ; число шагов Монте-Карло, отводимых на усреднение  $\text{MCS}_{\text{av}} = 20000$ . Значение константы межслоевого обменного взаимодействия бралось  $J_1=1.0$ ; значение константы внутрислоевого обменного взаимодействия  $J_2=8.0 J_2/J_1$ ; Температурный диапазон  $T \in [8.0; 5.0]$ . Моделирование проводилось из высокотемпературного начального состояния.



**Рисунок 1.** Компьютерное моделирование температурной зависимости намагниченности и восприимчивости при разных значениях внешнего магнитного поля  $h=0.0, 0.5, 1.0 \mu_b$

На рис. 1 видим, с увеличением значения внешнего магнитного поля появляются сильные флуктуации. Для более точной статистики требуется проведение моделирования с

большим числом шагов Монте-Карло. Исходя из поведения намагниченности видно, что с увеличением поля ее значение увеличивается, однако при  $H=0.5$  уменьшается. Из поведения восприимчивости виден фазовый переход второго рода ферромагнетик-парамагнетик. Пик восприимчивости возникает при критической температуре, отсюда выявлено, что при  $H=0.0$   $T_c=7.0J_1/k_b$ , при  $H=0.5$  и  $1.0$ ,  $T_c=6.95J_1/k_b$ . Пик восприимчивости сдвигается в область низких температур при появлении внешнего магнитного поля.



**Рисунок 2.** Компьютерное моделирование температурной зависимости намагниченности и восприимчивости при разных значениях константы Дзялошинского-Мория  $D=0.16, 1.6, 3.2 J_1$

Рассматривая полученные результаты на рис. 2, можно сделать вывод, что пик восприимчивости сдвигается в область более низких температур с увеличением константы взаимодействия Дзялошинского-Мория. Температурная зависимость восприимчивости так же демонстрирует фазовый переход второго рода из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

Было проведено компьютерное моделирование магнитных свойств одноосного кирального гелимагнетика  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$ . Численное моделирование было проведено методами Монте-Карло с применением алгоритма Метрополиса. Получено, что с увеличением поля, поведение намагниченности меняется, а увеличение или уменьшение константы Дзялошинского-Мория при  $h=0$  дает малые изменения, что говорит о необходимости

введения внешнего магнитного поля. Был обнаружен фазовый переход второго рода ферромагнетик-парамагнетик.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-32-70189, Минобрнауки РФ (соглашение 0741-2020-0002). Для выполнения расчетов были использованы вычислительные ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН» [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Григорьев С.В.* Спиновая киральность и рассеяние поляризованных нейтронов//Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. 2010.
- [2] *Togawa Y., Kousaka Y., Inoue K., Kishine J.I.* Symmetry, Structure, and Dynamics of Monoaxial Chiral Magnets // *J. Phys. Soc. Jpn.* 2016. V. 85. P. 1394-1401. 112001.
- [3] *Wagniere G.H.* On Chirality and the Universal Asymmetry // Zurich: Wiley-VCH. 2007. ISBN: 978-3-906-39038-3.
- [4] *Barron L.D.* Fundamental symmetry aspects of chirality // *Bio Systems.* 1987. V 20(1). P. 7-14.
- [5] *Miyadai T., Kikuchi K., Kondo H., Sakka Sh., Arai M., Ishikawa Y.* Magnetic properties of  $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$  // *Journal of the Physical Society of Japan.* 1983. V. 52. P. 1394-1401.
- [6] *Сорокин А.А., Макогонов С.В., Королев С.П.* Информационная инфраструктура для коллективной работы ученых Дальнего Востока России // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2017. № 12. С. 14-16.

---

Минькова Александра Вячеславовна,  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
1 курс магистратуры, Физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)647787,  
[minkovaav@stud.omsu.ru](mailto:minkovaav@stud.omsu.ru)

## Моделирование медленной динамики трехслойной магнитной структуры в низкотемпературной фазе

М. М. Михайловский

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. В. В. Прудников

**Аннотация.** В данной работе осуществлено моделирование методами Монте-Карло неравновесного поведения трехслойной магнитной наноструктуры с применением анизотропной модели Гейзенберга с анизотропией типа "легкая" ось в низкотемпературной фазе из высокотемпературного  $T > T_c$  и низкотемпературного  $T < T_c$  начального состояния с различными толщинами ферромагнитных пленок  $N$  в трехслойной структуре.

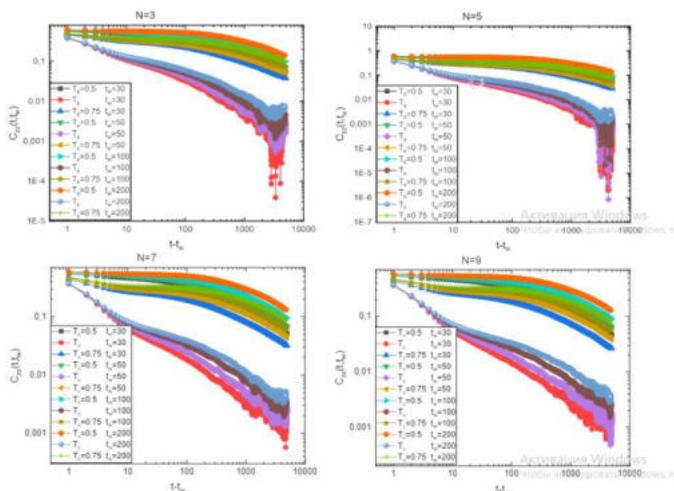
**Ключевые слова:** Эффекты старения, критическая динамика, анизотропия, методы Монте-Карло, модель Гейзенберга.

В последнее время изучение свойств тонких магнитных пленок вызывает большой интерес. Изучение свойств магнитных мультислойных структур [1] открывают возможности для разработки принципиально совершенных устройств, основанных не на электрическом заряде электрона, а на его спиновом моменте: высокочувствительные датчики магнитных полей [2], магнитные устройства хранения информации с произвольным доступом MRAM, и, в частности, уже поставляемой STT-MRAM и разрабатываемой SOT-MRAM и в считывающих головках жестких дисков, которые быстрее на чтение и запись, управляемые наногенераторы сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов и т.д. Ферромагнитные слои с антиферромагнитной обменной связью, они же синтетические антиферромагнетики (SAF), используются в технологически важных системах, в таких как устройства микро- и нанoeлектроники, спинтроники [3].

В данной работе проводилось исследование мультислойной структуры методом Метрополиса для одноосной Гейзенберговской модели. Величина  $L \times L$  задает количество спинов в каждом слое, а  $N$  является характеристикой числа слоев в тонкой ферромагнитной пленке. При изучении

неравновесного поведения очень важно учитывать его начальное состояние высокотемпературное  $|m_1| = 0$ ,  $|m_2| = 0$  и низкотемпературное  $|m_{stg}|$ . Поскольку добиться  $|m_1| = 0$ ,  $|m_2| = 0$  очень сложно и долго при хаотичном направлении спинов, за высокотемпературное было принято  $|m_1| < 0.0005$ ,  $m_2 < 0.0005$ ,  $|m_{stg}| < |m|$  задается как сонаправленность намагниченностей двух пленок в отличие от низкотемпературного состояния, в котором намагниченности антипараллельны.

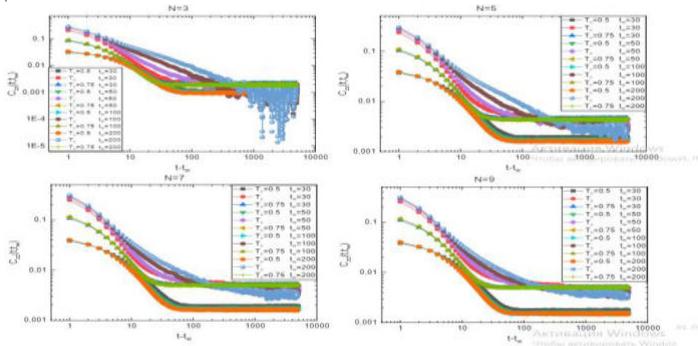
В данной работе исследования проводились для разных толщин пленок  $N = 3, 5, 7, 9$  ГЦК решетки с гранью (100) вдоль плоскости пленок при величине интеграла внутрислоевого обменного взаимодействия  $J_1 = 1.0$  и межслоевого  $-J_2 = 0.1$ .



**Рисунок 1.** Автокорреляционная функция при критической температуре  $T = T_c; 0.5T_c; 0.75T_c$  линейным размером  $L = 128$  с эволюцией из высокотемпературного начального состояния.

На графиках рис.1 представлены графики автокорреляционной функции из высокотемпературного начального состояния при фиксированных значениях  $N = 3, 5, 7, 9$  и различных временах ожидания  $t_w = 30, 50, 100, 200$  линейный размер  $L = 128$ . Можно видеть, что при  $T = T_c$  спад

автокорреляционной функции гораздо сильнее, чем при  $T = 0.5T_c$  и  $T = 0.75T_c$ . Это свидетельствует о том, что с уменьшением  $T_c$  наблюдается увеличение проявления эффектов старения. Так же можно заметить, что выбор начального состояния системы гораздо существеннее влияния времен ожидания  $t_w$ .

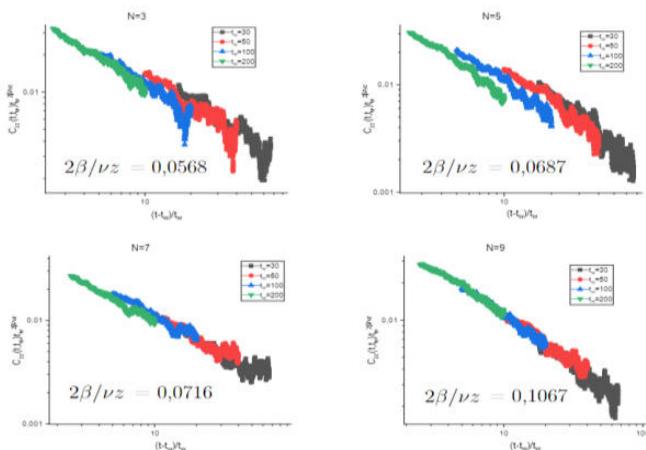


**Рисунок 2.** Автокорреляционная функция при критической температуре  $T = T_c$ ;  $0.5T_c$ ;  $0.75T_c$  линейным размером  $L = 128$  с эволюцией из низкотемпературного начального состояния.

На графиках рис. 2 представлены графики автокорреляционной функции из низкотемпературного начального состояния при фиксированных значениях  $N = 3, 5, 7, 9$  и различных временах ожидания  $t_w = 30, 50, 100, 200$ , линейный размер  $L = 128$ . Можно видеть, что при  $T = T_c$  значения автокорреляционной выше, чем  $T = 0.5T_c$  и  $T = 0.75T_c$  однако данные значения надо рассматривать в пределах до 100 шагов Монте-Карло так как дальше система выходит на плато, а в  $T_c$  начинают проявляться сильные флуктуации.

Скейлинг, релаксации автокорреляционных функций в области долговременного режима при  $t \gg t_w$  при разных  $t_w$  должно происходить с показателем  $2\beta/vz$  каноническое старение  $C_{zz}(t, t_w) \sim t^{-2\beta/vz} F(t/t_w)$ . Так как уже при значениях  $t > 2000$  погрешность для  $N = 3, 5$  на рис. 3 сравнима по порядку со значениями автокорреляционной функции, то при дальнейшем анализе скейлинга автокорреляционной функции

по ранее рассчитанным показателям релаксации намагниченностей был взят интервал до  $t = 2000$ .



**Рисунок 3.** Скейлинговая функция при температуре замораживания  $T = T_c$ . Значение  $2\beta/\nu z$  при  $N(3) = 0,0568$ ,  $N(5) = 0,0687$ ,  $N(7) = 0,0716$ ,  $N(9) = 0,1067$

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Vaz C.A.F., Bland J.A.C., Lauhoff G.* Magnetism in ultrathin film structures. // Rep. Prog. Phys - 2008. - V. 71. - P. 056501-056578
- [2] *Svalov A.V., Aseguinolaza I.R., Garcia-Arribas A., Orue I., Barandiaran J. M., Alonso J., Fernandez-Gubieda M. L. and Kurlyandskaya G. V.*, "Structure and Magnetic Properties of Thin Permalloy Films Near the "Transcritical" State. // IEEE Trans. Magn. - 2010. - V. 46. - No 2. - P.333-336.
- [3] *Огнев А.В., Самардак А.С.*, Спинтроника: физические принципы, устройства, перспективы // Вестник ДВО РАН. - 2006. - Т. 4. - P. 70-80.

---

Михайловский Максим Максимович,  
 Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
 1-й курс магистратуры, физический факультет,  
 644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)647787,  
[maxmihailovski@mail.ru](mailto:maxmihailovski@mail.ru)

# Определение положения атомов при адсорбции фурфуроле на поверхности Pd (111) в водном растворе

Д. И. Поликовская

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Мамонова М.В.

**Аннотация.** В работе проведены вычисления количества молекул воды для того, чтобы произвести наложение молекулы воды на решетку фурфуrolа на палладиевой подложке.

**Ключевые слова:** фурфурол, VASP, концентрация молекул.

С увеличением потребления естественных топливных ресурсов, встал вопрос о сокращении его использования. Тогда и появилась идея синтезировать топлива искусственным путем. Для решения проблемы учёные стали искать такой материал, который при переработке в биотопливо сможет полностью или частично заменить естественное топливо. Помимо того, что нужен материал, который будет синтезироваться в биотопливо, нужно также предусмотреть чтобы его производные были экологически безопасными для окружающей среды.

В качестве такого материала был взят фурфурол. Фурфурол является продуктом переработки сельскохозяйственных отходов, что само по себе уже является экологически безопасны для окружающей среды [1]. При гидрировании выделяется углерод-углеродная связь, выделение углерода были минимальными, что является огромным плюсом для учёных.

Хоть переработка фурфуrolа является актуальной темой, но исследования в этой области не так и много. Это связано с тем, что материалы, которые используются в исследованиях являются дорогостоящими, что не дает полномасштабно проводить исследования в этой области [1].

В данной статье мы определим положение молекул воды на поверхности фурфуrolа находящейся на подложки из палладия. Для проведения эксперимента воспользуемся программной комплексом VASP [2].

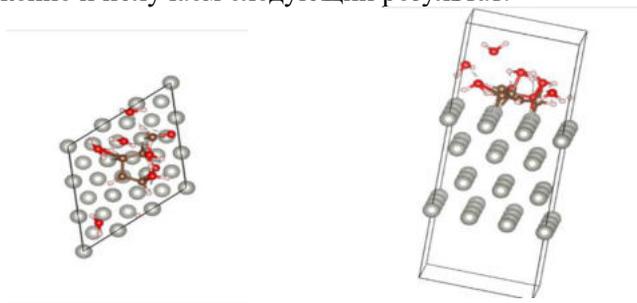
Для того чтобы воссоздать водный раствор нужно рассчитать сколько молекул воды приходится на свободный объем решетки в котором находится фурфурол на паллади. Для этого воспользуемся формулой нахождения концентрации молекул на объем:

$$N_{\text{кон.}} = \frac{\rho \times V}{M}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{кон}}$  – концентрация воды на единицу объема;  $\rho$  – плотность молекулы воды  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ ;  $V$  – объем решетки,  $V = 20,51 \times 10^{-24} \text{ см}^3$ ;  $M$  – молярная масса молекулы воды,  $M = 0,3 \times 10^{-23}$ ,

Подставляем все значения в уравнение (1) и получается, что количество молекул воды на свободный объем решетки равняется  $N_{\text{кон}} = 12$ . Так как водный раствор будем воссоздавать только на верхней части решетки, то получается, что количество молекул воды, которые нужно наложить на фурфурол на подложке из палладия, равняется  $N = 6$ .

Для того чтобы воспроизвести наложение молекул воды на решетку, воспользуемся скриптом (код), предназначенным для наложения одной молекулы на другую. В скрипте задаем следующие параметры, такие как максимальный и минимальный размер решетки, указываем вакуум и количество молекул воды. Также указываем команду, ответственную за случайный угол поворота молекулы воды. Затем проведем наложение и получаем следующий результат:



**Рисунок 1.** Фурфурол на паллади в водном растворе. Красные молекулы – кислород; белые – водород; коричневые – углерод; серые – палладий

Из рисунка можно сделать следующие выводы: молекулы воды находится слишком близко к фурфуролу, при этом образуя между собой связь. Следовательно, для того чтобы это исправить, нужно поднять молекулы воды выше над фурфуролом, чтобы не образовывались связи между фурфуролом и молекулами воды. Кроме того, можно увидеть, что молекулы распределились неравномерно по всей площади поверхности решетки. Для исправления этой ситуации нужно задать каждой молекуле определённую границу объёма, внутри которой она будет находиться и поворачиваться на случайный угол.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Chen S., Wojcieszak R., Dumeignil F., Marceau E., Royer S.* Chemical Reviews. 2018. V. 118. P. 11023-11117
- [2] *Прудников В.В., Прудников П.В., Мамонова М.В.* Омск, изд-во ОмГУ им. Ф.М. Достоевского. 2016. 145 с.

---

Поликовская Дарья Игоревна,  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
2 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)647787,  
[pdaria2000@yandex.ru](mailto:pdaria2000@yandex.ru)

## Исследование магнитной трехслойной системы Co/Cu/Co в рамках первопринципных расчетов

Р. А. Сухачев

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Мамонова М.В.

**Аннотация** Работа посвящена численному исследованию энергетических и магнитных свойств системы Co/Cu/Co с помощью программного комплекса VASP. Исследовалось влияние ориентации поверхностной грани на энергию магнитной анизотропии. Получена зависимость между толщиной магнитного слоя кобальта и величиной параметра магнитной анизотропии.

**Ключевые слова:** тонкие пленки, VASP, магнитная анизотропия.

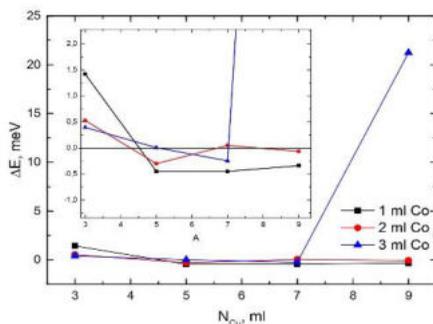
Магнетизм тонких пленок представляет собой активную область исследований, которая характеризуется важным влиянием на технологический прогресс. Пленки применяются в устройствах спинтроники и нанoeлектроники. А также для хранения и записи информации в запоминающих устройствах, что позволяет получить высокую плотность и скорость записи информации [1].

Система Co/Cu не обладает большой перпендикулярной магнитной анизотропией [2], в первую очередь из-за отсутствия сильной положительной поверхностной анизотропии, которая вызывала бы перпендикулярное направление намагниченности, и как следствие, магнитная анизотропия в Co/Cu менее широко изучена. Исследования, проведенные Колхипом [3] и Брудером [4], подтвердили, что система Co/Cu (111) демонстрирует слабую перпендикулярную анизотропию. Co характеризуется высокой температурой Кюри  $T_c = 1388$  К [5], что делает этот материал перспективным для применения при комнатной температуре, обладает большой одноионной анизотропией ( $E_{\text{ма}} = 655$   $\mu\text{V}/\text{atom}$ ) [6] и магнитным моментом  $\mu = 1,73$   $\mu\text{B}/\text{atom}$  [6]. Далее в работе мы исследуем магнетизм системы Co/Cu/Co при изменении различных параметров пленки, к примеру, толщины немагнитного слоя, так в работе [5] было показано, что при изменении толщины прослойки меди от 2 до 15 Å уменьшалась

намагниченность системы. Так же важными аспектами магнитных свойств, вызывающими наш интерес, являются расчет магнитных моментов структуры Co/Cu/Co и исследование магнитной анизотропии пленки.

Особенностью данной работы является использование первопринципных расчетов с применением программного комплекса VASP. С его помощью можно рассчитать структурные, магнитные и энергетические характеристики тонкопленочных систем.

В рамках исследования были рассчитаны значения полной энергии системы при количестве  $K_{\text{points}} = 48$  и  $E_{\text{ncut}} = 600$  эВ для кристаллической структуры Co/Cu/Co. Количество слоев немагнитной прослойки(медь) изменялось от 3-9, а магнитного материала(кобальт) 1-3. Вычисления проводились для двух конфигураций: ферромагнитной(ФМ), где магнитные моменты атомов сонаправлены и антиферромагнитной(АФМ), где они противоположно направлены.



**Рисунок 1.** Зависимость разности энергии АФМ и ФМ конфигураций от количества слоев подложки при разном количестве слоев магнитного материала.

Можно сделать вывод, что при достаточно большой толщине системы, когда количество слоев подложки достигает 9 монослоев, а количество монослоев магнитного материала становится равным 3, происходит смена энергетической выгоды с антиферромагнитной на ферромагнитную. Были проведены расчеты магнитного момента ФМ системы.

Полученные значения магнитного момента хорошо соотносятся с экспериментальными данными других исследователей.

**Таблица 1.** Рассчитанные значения среднего магнитного момента  $\mu_{\text{tot}}^1$ ,  $\mu_{\text{B.}}/\text{ат}$  в зависимости от  $N_{\text{Co}}$  количества монослоев Co, в сравнении со значениями  $\mu_{\text{tot}}^2$  полученными в других работах

Система	$N_{\text{Co}}$	$\mu_{\text{tot}}^1$ , $\mu_{\text{B.}}/\text{ат}$	$\mu_{\text{tot}}^2$ , $\mu_{\text{B.}}/\text{ат}$
Co/Cu/Co	1	1.8260	1.891 [7]
	2	1.691P	1.73 [2]
	3	1.7150	1.81 [8]

**Таблица 2.** Значение полной энергии и параметра магнитной анизотропии монослойной пленки Co в зависимости от ориентации поверхностной грани

Грань	$\perp$	$\parallel$	Тип аниз.	$\Delta_{\parallel} \cdot 10^{-4}$	$\Delta_{\perp} \cdot 10^{-4}$	$E_{\text{ма}}$ , meV
100	-22.716201	-22.717099	$\parallel$	0.395		0.8979
110	-21.663726	-21.663702	$\perp$		0.011	-0.0239
111	-23.281794	-23.282756	$\parallel$	0.413		0.961

**Таблица 3.** Значения полной энергии параметра магнитной анизотропии в зависимости от направления намагниченности и количества монослоев Co

$\text{Co}_{\text{ml}}$	$\perp$ , meV	$\parallel$ , meV	Тип аниз.	$\Delta_{\parallel} \cdot 10^{-4}$	$\Delta_{\perp} \cdot 10^{-4}$	$E_{\text{ма}}$ , meV
1	-22.716201	-22.717099	$\parallel$	0.395		0.8979
2	-36.996519	-36.996457	$\perp$		0.002	-0.0619
3	-50.900960	-50.902121	$\parallel$	0.228		0.0012
4	-64.986092	-64.987190	$\parallel$	0.169		0.0011
5	-79.009213	-79.010245	$\parallel$	0.131		0.001
6	-93.059374	-93.060899	$\parallel$	0.164		0.0015

В ходе работы был проведен расчет влияния ориентации поверхностной грани на параметр  $\Delta$  и энергию  $E_{\text{ма}} = E_{\perp} - E_{\parallel}$  магнитной анизотропии. Если  $E < E_{\perp}$ , то  $\Delta_{\parallel} = (E_{\parallel} - E_{\perp})/E_{\parallel}$ , а если  $E_{\parallel} > E_{\perp}$ , то  $\Delta_{\perp} = (E_{\perp} - E_{\parallel})/E_{\perp}$ , где  $E_{\parallel}$  и  $E_{\perp}$  это полные энергии системы с направлением магнитных моментов в плоскости пленки и перпендикулярно ей. Для грани 100 и 111 наиболее

энергетически выгодным является направление магнитных моментов параллельно плоскости пленки. Для грани 110 была обнаружена слабая перпендикулярная анизотропия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение 0741-2020-0002).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Heinrich B., Bland J.A.C.* Ultrathin Magnetic Structures IV. Berlin, Heidelberg: Springer. 2005. P. 258.
- [2] *Johnson M.T., Bloemen P.J.H., den Broeder F.J.A. and de Vries J.J.* Magnetic anisotropy in metallic multilayers. // Rep. Prog. Phys. 1996. V.59. P. 1409.
- [3] *Kohlhepp J., Elmers H.J., Gradmann U.* Oscillating indirect coupling of perpendicular magnetized Co (111)-monolayers through Cu (111) // J. Magn. Magn. Mater. 1992. V.111. P.231-234
- [4] *denBroeder F.J.A., Hoving W., Bloemen P.J.H.* J. Magnetic anisotropy of multilayers// J. Magn. Magn. Mater. 1991. V.93 P.562
- [5] *Mushailov E.S., Maltsev V.K., Turpanov I.A., Kim. P.D.* J. Magn. Magn.Mater. 1994. 138. P. 207.
- [6] *Stearns M.B., Wijn H.P.J.* Properties of Magnetic Materials. Berlin: Landolt-Bornstein, New Series. 1986. V.19a. P. 384.
- [7] *Shick A.B., Novikov D.L., Freeman A.J.* Relativistic spin-polarized theory of magnetoelastic coupling and magnetic anisotropy strain dependence: Application to Co/Cu(001)// Phys. Rev. B 1997. V. 56. P. 561-583.
- [8] *Kim M., Freeman A.J., Wu R.* Surface effects and structural dependence of magneto-optical spectra: Ultrathin Co films and CoPt<sub>n</sub> alloys and multilayers// Phys. Rev. B. 1999. V. 59. P. 9432-9436.

---

Сухачев Руслан Артурович,  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
1 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)647787,  
[sukhachevruslan@gmail.ru](mailto:sukhachevruslan@gmail.ru).

## Исследование влияние дефектов различных типов на эффекты гистерезиса в мультислойных наноструктурах

Р. С. Шакиров

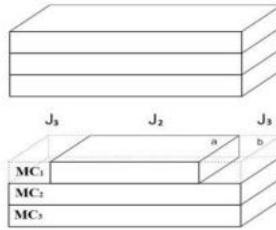
Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор П. В. Прудников

**Аннотация.** Осуществлено численное исследование методами Монте-Карло влияния точечных и линейных типов дефектов структур на эффекты гистерезиса в мультислойных наноструктурах.

**Ключевые слова:** гистерезис, метод Монте-Карло, мультислойные наноструктуры, гистерезис, дефекты структуры.

Исследование гистерезисных эффектов [1] в мультислойных наноструктурах [2], состоящих из свехтонких ферромагнитных пленок, которые разделены антиферромагнитным металлом, имеют высокую актуальность [3]. Подобные структуры называются синтетическим антиферромагнетиками и хорошо себя показывают в устройствах хранения информации. Одним из краеугольных камней в развитии нынешнего информационного века является магнитный гистерезис, проявляющийся в ферромагнитных материалах, который наблюдается как при квазистатическом, медленно протекающем во времени перемагничивании, так и при динамическом, «быстром» перемагничивании. Одним из важных факторов в определении свойств магнитного материала являются дефекты. За последние 40 лет исследований, индустрия магнитной записи научилась намеренно вводить тщательный беспорядок в магнитные структуры.

В данной работе осуществлено численное исследование методами Монте-Карло влияния точечных и линейных типов дефектов структур на эффекты гистерезиса в мультислойных наноструктурах, состоящих из двух симметричных ферромагнитных пленок с толщинами  $N = 3-6$  монослоя (МС) ферромагнитных кубических пленок. Значения интегралов внутрислойного взаимодействия принимают значения  $J_1/k_B T = 1$ , а межслоевого взаимодействия  $J_2/J_1 = -0.3$ . Температура  $T = 0.8$  системы измеряется в единицах обменного интеграла  $J_1/k_B$ .



**Рисунок 1.** Модель мультислойной структуры, в которой а) искусственно создан скол в виде «ступеньки» во второй пленке б) в первых и во вторых слоях обеих пленок были введены дефекты представляющие собой немагнитную примесь.

Гамильтониан для систем в общем виде:

$$\begin{aligned}
 H = & -J_1 \sum_{i,j} p_i p_j \left[ (1 - (\Delta N)) (S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) + S_i^z S_j^z \right] - \\
 & J_2 \sum_{\alpha \in N_1, \beta \in N_2} p_\alpha p_\beta \left[ (1 - (\Delta N)) (S_\alpha^x S_\beta^x + S_\beta^y S_\alpha^y) + S_\alpha^z S_\beta^z \right] - \\
 & J_3 \sum_{\mu \in N_1, \nu \in N_2} p_\mu p_\nu (1 - (\Delta N)) (S_\mu^x S_\nu^x + S_\nu^y S_\mu^y) + S_\mu^z S_\nu^z - \\
 & h \sum_{i \in N_1, N_2} S_i^z \Delta N - \text{анизотропия системы типа «легкая ось»}.
 \end{aligned}$$

В случае системы, где были введены дефекты представляющую собой немагнитную примесь вводится  $p_i$ . Для обеих пленок концентрация спинов а)  $p(MC1) = 0.75$   $p(MC2) = 0.90$ , б)  $p(MC1) = 0.50$   $p(MC2) = 0.25$ , в)  $p(MC1) = 0.35$   $p(MC2) = 0.60$ .

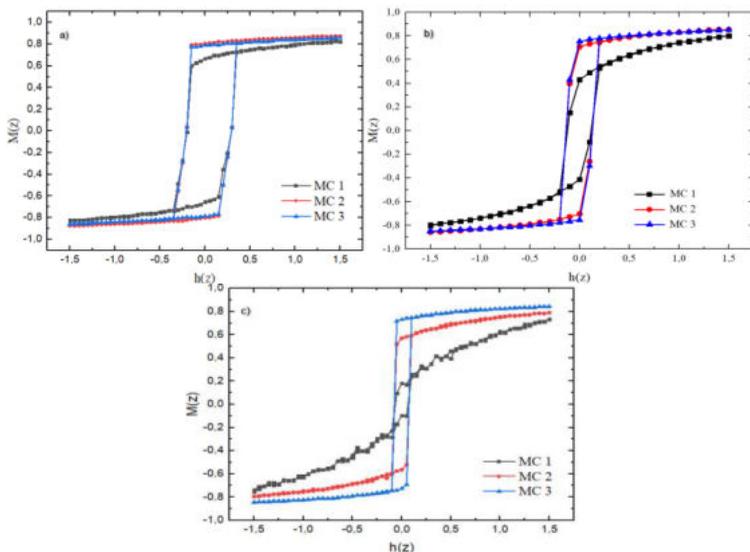
$J_3$  - обменный интеграл, характеризующий взаимодействие вторых слоев в обеих пленок.

На данных графиках (рис. 2) мы можем видеть, что при увеличении концентрации дефектов в модели, диапазон поля при котором перемагничивается система уменьшился, вследствие того, что спином, находящимся вблизи с дефектами легче изменить свое состояние.

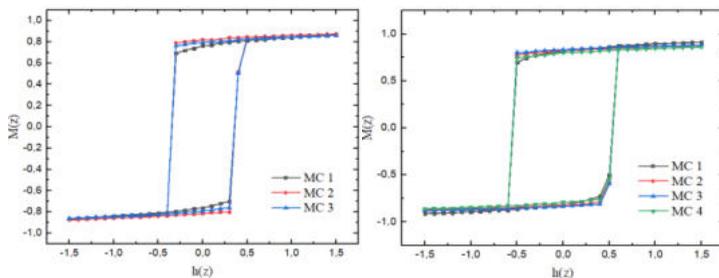
Это происходит за счет уменьшения соседей спинов, которые локализованы возле дефекта, вследствие этого вероятность переворота спина увеличивается. Отсутствие ступеньки при  $M = 0$ , свидетельствует нам о том, что при введении дефектов коэрцитивная сила уменьшается, вследствие этого задержки при перемагничивании пленок не возникает.

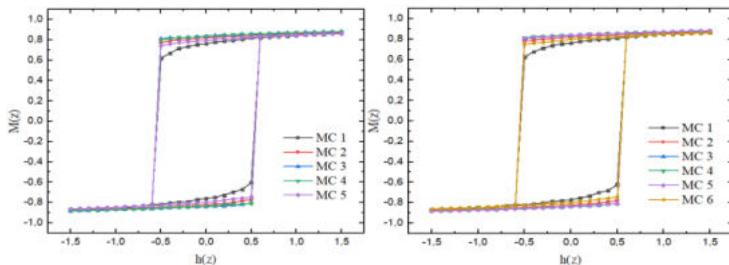
На данных графиках (рис. 3) мы наблюдаем мгновенное перемагничивание обеих пленок, что говорит нам о том, что при

наличии дефектов хотя бы в одной пленке, задержки при перемагничивании пленок не возникает. Добавленное взаимодействие, которое возникает между вторыми слоями в пленках, не приводит к существенному изменению поведения петли гистерезиса.



**Рисунок 2.** Результаты моделирования системы с точечными дефектами при значениях спиновой концентрации а)  $p(MC1) = 0.75$   $p(MC2) = 0.90$ , б)  $p(MC1) = 0.50$   $p(MC1) = 0.25$ , в)  $p(MC1) = 0.35$   $p(MC1) = 0.60$  при толщине пленок равным  $N = 3$  МС и при значении обменного интеграла межпленочного взаимодействия равного  $J2/J1 = -0.3$ .





**Рисунок 3.** Результаты моделирования системы с линейными дефектами при значении  $J_2/J_1 = -0.3$  и при  $J_3/J_1 = -0.1$  при толщине пленок а)  $N = 3$  МС, б)  $N = 4$  МС, в)  $N = 5$  МС, д)  $N = 6$  МС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-32-70189, Минобрнауки РФ (соглашение 0741-2020-0002)

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Bersweiler M., Lacour D., Dumesnil K., Montaigne F., Hehn S.* Phase diagram in exchange-coupled CoTb/[Co/Pt] multilayer-based magnetic tunnel junctions// *Phys. Rev. B* 2015. V. 92. pp. 224431.
- [2] *Grunberg P., Schreider R., Pang Y., Brodsky M.B., Sowers H.* Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers across Cr Interlayers// *Phys. Rev. Lett* 1986. V. 57. pp. 2242-2445.
- [3] *Barthelemy A., Fert A.,* Theory of the magnetoresistance in magnetic multilayers: Analytical expressions from a semiclassical approach // *Phys. Rev. B* 1991. V. 43. pp. 13124-13129.

---

Шакиров Роман Сергеевич,  
 Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
 1 курс магистратуры, Физический факультет,  
 644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812) 647787,  
[shakirovromanomsk@mail.ru](mailto:shakirovromanomsk@mail.ru).

## Секция

### «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА»

---

#### **Анализ усиленного массопереноса в объеме гетерогенных металлических систем при воздействии на их поверхность концентрированными потоками энергии**

А. А. Жаксалыков, Г. А. Вершинин

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доц. Г.А. Вершинин

**Аннотация:** Для интерпретации аномального переноса вещества в металлических материалах, подвергаемых высокоэнергетическим воздействиям, в работе наряду с объемной учитывается диффузия по мигрирующим границам зерен, взаимодействующим с примесью.

**Ключевые слова:** гетерогенные металлические системы, импульсные воздействия, массоперенос, моделирование.

При воздействии концентрированными потоками энергии (КПЭ) - импульсными сильноточными электронными и ионными пучками, лазерными пучками средней и высокой интенсивности ( $\geq 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) - в приповерхностной области металлов и сплавов происходят существенные структурно-фазовые превращения, в результате чего формируются упрочненные слои толщиной порядка 150 - 200 мкм, а также наблюдается усиленный перенос легирующей примеси и различных дефектов структуры вглубь исследуемых материалов [1]. При многократных импульсных воздействиях указанные явления усиливаются и концентрационные профили становятся неоднородными вблизи поверхности, а на больших глубинах изменяются незначительно.

Цель работы - анализ усиленного массопереноса с установлением возможных механизмов наблюдаемой миграции атомов при воздействиях КПЭ на поверхность гетерогенных металлических систем. При этом будем исходить из следующих соображений. На первоначальном этапе (до начала плавления образца), когда плотность протяженных дефектов мала, а

мигрирующие границы зерен можно считать независимыми, примесные атомы диффундируют по мало дефектному объему материала под действием градиентов концентрации, давления и температуры (объемная диффузия и диффузия по изолированным границам зерен) [2, 3]. Для описания этих процессов введем два коэффициента диффузии:  $D$  – коэффициент объемной и  $D_1$  – межзеренной диффузии (причем  $D_1 \gg D$ ). Концентрационный профиль примесных атомов в зерне определим суммой их удельных вкладов. С течением времени в облучаемом пучком заряженных частиц материале с увеличением плотности дефектов растет число точек закрепления последних, и они становятся практически неподвижными. При этом поля объемной диффузии начинают перекрываться от соседних границ зерен (и отдельных дислокаций), поэтому их уже нельзя рассматривать как независимые. Для описания массопереноса в этом случае введем эффективный коэффициент диффузии  $D_{ef} = s \cdot D_1 + (1 - s) \cdot D$ ,

где  $s$  – доля диффундирующего элемента, находящегося в границах зерен (или дислокациях). Таким образом, концентрационный профиль  $C(x, t)$  диффундирующих атомов вдоль оси  $x$ , перпендикулярной к облучаемой поверхности, можно представить в виде:

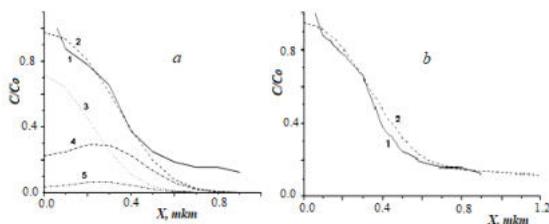
$$C(x, t) = k_1 \cdot c_p(x, t, D) + k_3 \cdot c(x, t, D, D_1) + k_2 \cdot c_d(x, t, D_{ef}),$$

где  $c_p(x, t, D)$  и  $c_d(x, t, D_{ef})$  – соответствуют вкладам диффузии с облучаемой поверхности по бездефектному объёму материала с коэффициентом диффузии  $D$  и по сильно дефектному  $D_{ef}$ , соответственно;  $c(x, t, D, D_1)$  – вклад межзеренной диффузии по мигрирующим со скоростью  $V$  границам (вкладом диффузии по неподвижным изолированным границам можно пренебречь [3]). Множители  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  определяют долю вкладов всех перечисленных выше механизмов диффузии. Кроме того, при импульсном воздействии КПЭ облучаемый материал может плавиться. Учтем миграцию в жидкой фазе с коэффициентом  $D_l$  в течение соответствующего отрезка времени. После окончания воздействия образец остывает с очень высокой скоростью (порядка  $10^8$  К/с), поэтому дефекты не успевают отжечься и

после затвердевания материала диффузия примесных атомов в нем идет в сильно дефектном материале с коэффициентом  $D_{ef}$ .

Перераспределение атомов в результате прямой объемной диффузии в нашей работе описывается одномерным уравнением, содержащим градиенты концентрации, температуры и давления, которое решается методом параметрикса [4]. Алгоритм решения уравнений массопереноса с учетом диффузии по неподвижным и мигрирующим границам зерен приведен в работах [2, 3].

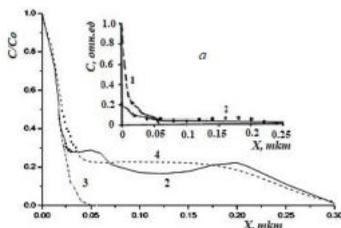
На рис.1а экспериментальный [1] концентрационный профиль (кривая 1) атомов серебра в меди после облучения Ag-пленки толщиной 0.1 мкм на Cu-подложке одним импульсом пучка ионов углерода с энергией 0.5 МэВ, длительностью импульса 200 нс и плотностью тока 40 А/см<sup>2</sup> сравнивается с модельной кривой 2 объемной диффузии, обусловленной вкладами градиента концентрации (3), давления (4) и температуры (5). При таком режиме облучения образец плавится до глубины, примерно, 1 мкм, температура кипения не достигается. Совпадение теории с экспериментом наблюдается лишь в тонком поверхностном слое. Дополнительный учет диффузии по сильно дефектному материалу и по мигрирующим границам зерен (итоговая кривая 2 на рис.1б) приводит к лучшему согласию теоретической и экспериментальной кривых и на больших глубинах. Значения модельных параметров:  $D = 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $D_1 = 3000D$ ,  $D_l = 50D$ ,  $D_{ef} = 20D$ ,  $V = 4.8 \cdot 10^2 \text{ (см/сек)}$ ,  $k_1 = 78$ ,  $k_2 = 10$ ,  $k_3 = 12$ .



**Рисунок 1.** Концентрационные профили серебра в системе Ag/Cu.

На основном рисунке (в увеличенном масштабе) модельные кривые сравниваются с наблюдаемой (2): (3) – результат объемной диффузии по бездефектному материалу; (4)

- дополнительный учет диффузии по сильно дефектному материалу с коэффициентом  $D_{ef}=1.6 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с и диффузии по подвижным границам зерен с параметрами  $k_1=71$ ,  $k_2=6$ ,  $k_3=23$ .



**Рисунок 2.** Концентрационные профили атомов титана в сплаве WC-Co.

Таким образом, перенос примесных атомов на большие глубины в гетерогенных материалах при интенсивных импульсных воздействиях протекает, по-видимому, за счет увеличения их подвижности по мигрирующим границам зерен, дислокациям и другим протяженным дефектам.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Блейхер Г.А. Тепломассоперенос в твердом теле под действием мощных пучков заряженных частиц / Г.А. Блейхер, В.П. Кривобоков, О.В. Пашенко. Новосиб: Наука, 1999. 176 с.
- [2] Вершинин Г.А., Вахний Т.В. Влияние миграции границ зерен на формирование концентрационных профилей имплантированной примеси // Поверхность. 2003. № 5. С.18—21.
- [3] Каур И. Диффузия по границам зерен и фаз /И. Каур, В. Густ. М.: Машиностроение, 1991. 448 с.
- [4] Фридман А. Уравнения с частными производными параболического типа // А. Фридман.М.: Мир, 1968. 427 с.

---

Жаксалыков Азамат Амангельдыевич,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
2 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812) 647787,  
[kazmyinigaz@inbox.ru](mailto:kazmyinigaz@inbox.ru)

## **Зависимость морфологии поверхности пленок нитрида алюминия, полученных методом магнетронного распыления, от толщины пленок**

С. В. Жилина

Научный руководитель: к.т.н., доц. Л.В. Баранова

**Аннотация.** Показана зависимость морфологии поверхности пленок нитрида алюминия, полученных методом магнетронного распыления, от толщины пленок. Приведена и проанализирована зависимость средней и среднеквадратичной шероховатости поверхности пленок нитрида алюминия от их толщины.

**Ключевые слова:** морфология поверхности, толщина пленки, магнетронное распыление, атомно-силовая микроскопия, шероховатость поверхности.

Нитрид алюминия ( $\text{AlN}$ ) – это перспективный полупроводниковый материал, обладающий высокой теплопроводностью, хорошими диэлектрическими свойствами, механической прочностью и химической инертностью. Он находит широкое применение в изделиях электронной техники, в том числе при изготовлении холодных катодов, буферных, диэлектрических, пассивирующих и пьезоэлектрических слоев, при создании газовых сенсоров, УФ-светодиодов, фотодетекторов и тонкопленочных акустических резонаторов. Развитие технологий нанoeлектроники предъявляет все более возрастающие требования к точности контроля толщины и структуры выращиваемых слоев в наногетероструктурах [1]. Среди методов синтеза пленок  $\text{AlN}$  можно выделить химическое плазмохимическое осаждение из газовой фазы, молекулярно-лучевая эпитаксия, а также магнетронное распыление [2]. Магнетронное распыление является одним из самых эффективных и чаще всего используемых методов получения тонких пленок нитрида алюминия. Преимуществами данного метода являются универсальность процесса, высокая скорость осаждения и возможность ее регулирования, а также высокая чистота получаемых пленок, сохранение соотношения основных

компонентов при распылении и высокая равномерность элементного состава осаждаемой пленки по толщине. Однако при использовании данного метода проявляются такие проблемы как механические напряжения в пленках и большая шероховатость поверхности получаемых пленок [3].

Шероховатость участка поверхности пленки оценивают по неровностям профиля, который получается с помощью метода сечения реальной поверхности геометрической плоскостью. Шероховатость поверхности исследуемой пленки определяет ее важнейшие эксплуатационные свойства. Поэтому при изготовлении радиоэлектронных устройств возникает проблема получения пленок нитрида алюминия с гладкой поверхностью, с минимальными выступами и впадинами на поверхности. Для ее устранения необходимо исследовать зависимость морфологии поверхности пленок AlN, полученных методом магнетронного распыления, от различных параметров, таких, как режимы получения, время напыления, а также толщина пленок [4].

Шероховатостью поверхности называется совокупность микронеровностей, образующих рельеф поверхности, и рассматриваемых в пределах участка, длина которого равна базовой длине. Шероховатость участка поверхности оценивают по неровностям профиля, получаемого методом сечения реальной поверхности геометрической плоскостью. Количественно шероховатость поверхности пленки удобно оценивать по величине среднеквадратичного отклонения ( $S_q$ ) выступов и впадин. Большое значение среднеквадратичного отклонения ( $S_q$ ) показывает большой разброс в значениях выступов и впадин на поверхности пленки алюминия по сравнению со средней величиной; малое значение ( $S_q$ ), соответственно, показывает, что величины выступов и впадин на поверхности пленки сгруппированы вокруг среднего значения [5].

Существует несколько различных способов измерения шероховатости поверхности, например, методы светового сечения, теневой проекции, интерференционный, растровый. В данной работе, при исследовании полученных образцов, использовался метод атомно-силовой микроскопии (АСМ). Атомно-силовая микроскопия является прямым методом

исследования морфологии и локальных свойств поверхности, позволяющим получить рельеф поверхности и рассчитать ее статистические и физико-химические характеристики, что позволяет при производстве оптических элементов осуществлять неразрушающий контроль оптических деталей.

В основе работы атомно-силовой микроскопии лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики. Они представляют собой упругую консоль - кантилевер с острым зондом на конце. Один конец кантилевера жестко закреплен на кремниевом основании – держателе, на другом конце консоли располагается сам зонд в виде острой иглы. Радиус закругления современных АСМ зондов составляет  $1 \div 50$  нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления. Сила, которая действует на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Когда происходит регистрация величины изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью [5].

Существует несколько методов получения пленок AlN: термовакuumное испарение, электронно-лучевое испарение, лазерное испарение вакуумно-дуговое испарение, магнетронное распыление. В данной работе пленки нитрида алюминия получались с помощью метода магнетронного распыления.

Преимуществами метода магнетронного распыления являются:

1. Универсальность процесса, которая позволяет получать пленки металлов, различных сплавов, полупроводников и диэлектриков.
2. Высокая скорость осаждения и возможность ее регулирования.
3. Сохраняются соотношения основных компонентов при распылении сложных веществ.
4. Высокая чистота полученных пленок.
5. Возможность изменения структуры и свойств пленок за счет потенциала смещения на подложке, а также за счет давления, состава газовой среды и одновременного распыления нескольких мишеней.

6. Низкая пористость пленок даже при малых толщинах.

7. Возможность проведения процесса в реактивной среде разреженного газа; это позволяет получать пленки нитридов, карбидов, оксидов и многих других соединений.

8. Высокая равномерность элементного состава осаждаемой пленки по толщине [6].

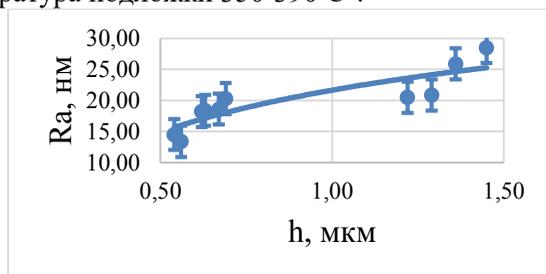
Формирование пленок нитрида алюминия проводилось методом магнетронного распыления на постоянном токе в атмосфере азота и аргона на установке нанесения многокомпонентных покрытий STEMS116-01. Измерения шероховатости поверхности полученных пленок проводились в Аналитико-технологическом инновационном центре «Высокие технологии и новые материалы» (АТИЦ ВТиНМ) НГУ на микроскопе НТ-МДТ СолверНекст.

**Таблица 1.** Шероховатость поверхности пленок AlN в зависимости от толщины пленки

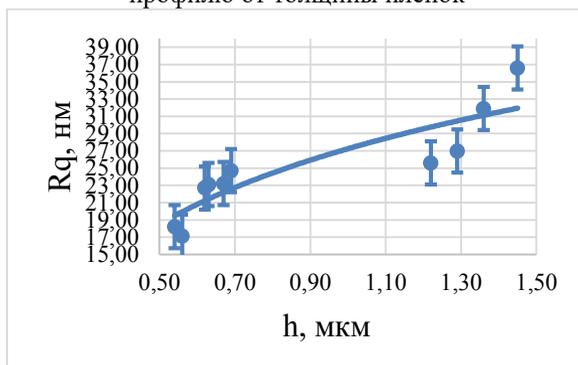
№ пленки	T, C°	Время напыления, мин	Мощность, Вт	Толщина пленки, мкм	Ra, нм	Rq, нм
1	350	79	700	0,62	8,2	22,7
2	350	83	700	0,63	8,4	23,1
3	350	85	700	0,54	4,5	18,2
4	350	87	700	0,56	3,4	17,1
5	350	95	700	0,67	8,6	23,2
6	350	100	700	0,69	0,3	24,7
7	390	114	700	1,22	0,5	25,6
8	390	118	700	1,29	20,87	26,97
9	390	120	700	1,36	25,9	31,9
10	390	125	700	1,45	28,5	36,6

Были определены значения Ra - средней шероховатости по профилю (по линии) и Rq - среднеквадратичной шероховатости по профилю (по линии) для различных областей

поверхностей пленок и найдена их зависимость от толщины пленки. В таблице 1 и на рис. 1 и 2 представлены результаты измерений. Мощность, подаваемая на мишень, составляла 700 Вт. Температура подложки 350-390 °С.



**Рисунок 1.** Диаграмма зависимости средней шероховатости по профилю от толщины пленок



**Рисунок 2.** Диаграмма зависимости  $R_q$  - среднеквадратичной шероховатости по профилю от толщины пленок

Из приведенных выше диаграмм видно, что с увеличением толщины пленок нитрида алюминия шероховатость поверхности постепенно увеличивается. Начиная со значения толщины пленки 1,3 мкм значения шероховатости начинают выравниваться, и их рост замедляется.

Методом АСМ определены значения  $R_a$  - средней шероховатости по профилю (по линии) и  $R_q$  - среднеквадратичной шероховатости по профилю (по линии) для различных областей поверхностей пленок. Построена

зависимость шероховатости поверхности пленок от их толщины и проведен анализ полученных диаграмм.

Исходя из процесса исследования морфологии поверхности пленок нитрида алюминия становится ясно, что увеличение значений шероховатости сопряжено с ростом кристалличности структуры. С увеличением толщины пленок нитрида алюминия степень кристалличности, шероховатость поверхности и размеры кристаллитов увеличиваются.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] *Амбарцумов М.Г.* Влияние условий плазмоактивированного атомно-слоевого осаждения на микроструктуру, состав и свойства пленок нитрида алюминия: диссертация кандидата технических наук: 05.27.06, Москва, 2020.

[2] Изготовление тонких пленок нитрида алюминия объемного акустического резонатора / Han Dong, Huo Caihong, Deng Jianguo // *Bandaotijishu = Semicond. Technol.* - 2012. - 37, № 8. - С. 627-629. - Кит.; рез. англ.

[3] *Баранова Л. В.* Сглаживание шероховатости поверхности пленок нитрида алюминия, полученных методом магнетронного распыления // *Динамика систем, механизмов и машин.* – 2020. – Т. 8. – № 4. – С. 7-11. – DOI 10.25206/2310-9793-8-4-7-11.

[4] *Мионов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии // *Российская Академия Наук, Институт физики микроструктур, г. Нижний Новгород, 2004 г.*

[5] *Мажитов К. К.* Исследование шероховатости поверхности покрытий из молибдена, полученных методом магнетронного распыления // *Актуальные проблемы современной науки: Материалы V региональной научно-практической конференции с международным участием, Омск, 15 апреля 2016 года Омск, 2016. – С. 29-33.*

[6] Low-thickness high-quality aluminum nitride films for super high frequency solidly mounted resonators / Iborra E., Clement M., Capilla J., Olivares J., Felmetsger V. // *Thin Solid Films.* - 2012. - 520, № 7. - С. 3060—3063. - Англ.

---

Жилина Софья Васильевна,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
1 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск, пр. Мира 55-А, 89963944595,  
sofiya.rudenko.2013@mail.ru

## Экспериментальное исследование влияния градиентной неоднородности кристалла системы $\text{Bi}_{100-\text{C}}\text{-Sb}_{\text{C}}$ в интервале $7\text{ат.}\% < \text{C} < 11\text{ат.}\%$ на эффект Пельтье при температуре около $100\text{K}$

Н. А. Мельников, Л. Н. Никифорова, И. А. Пешкова

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор В.И. Бочегов

**Анотация.** В статье изложены результаты исследования влияния градиентной неоднородности состава и температуры, направленной вдоль плоскости спайности кристаллов системы  $\text{Bi}_{100-\text{C}}\text{-Sb}_{\text{C}}$  на эффект Пельтье в интервале состава, соответствующего полупроводниковой области интервала  $7\text{ат}\% < \text{C} < 11\text{ат}\%$ .

**Ключевые слова:** Пельтье-эффект, градиентная неоднородность, кристалл  $\text{Bi-Sb}$ .

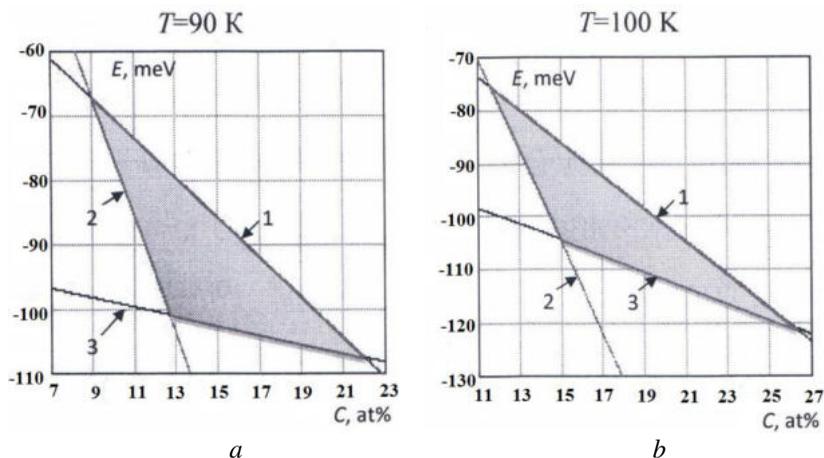
Целью исследования является прямое измерение Пельтье-эффекта на Пельтье-паре, в которой n-ветвью является кристалл  $\text{Bi-Sb}$  с кристаллографической ориентацией плоскости спайности направленной вдоль вектора плотности тока и направления градиента концентрации сурьмы  $\text{VS}$ , также сориентированного вдоль вектора плотности тока. В качестве p-ветви пары используется медная фольга. Образец кристалла  $\text{Bi-Sb}$  представляет собой прямоугольный параллелепипед с размерами  $8 \times 2,6 \times 1,3 \text{ мм}^3$ . Размер p-ветви по длине и ширине соответствует длине кристаллического образца, а толщину имеет  $0,05 \text{ мм}$ . Данная геометрия p-ветви соответствует оптимальному значению интегральной электропроводности и теплопроводности для тех параметров в исследуемом кристалле.

Измерение Пельтье-эффекта осуществлялось с помощью вакуумированного криостата-держателя, погруженного в кипящий азот. Используемая конструкция измерительной системы имела автоматическое термостатирование основания Пельтье-пары. Температура основания Пельтье-пары и охлаждаемого контакта Пельтье измерялась с помощью медь-константовых термопар.

Электропитание Пельтье-пары осуществлялось прецизионным стабилизатором регулируемого тока, величина которого контролируется с помощью амперметра.

Интервал значений концентрации сурьмы в кристалле, используемом в эксперименте, и который указан выше, соответствует полупроводниковой области состава системы  $\text{Bi-Sb}$ . При этом направление градиента ширины запрещенной зоны,  $\overline{\nabla E_g}$  в этом интервале концентраций совпадает по направлению с градиентом концентрации сурьмы  $\overline{\nabla C}$  (см. рисунок 1) при температуре термостата  $\sim 100\text{K}$  [1].

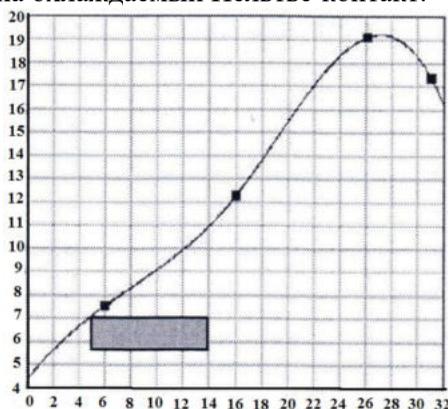
Данный кристалл вырезан из монокристаллического длинномерного слитка, полученного путем направленной кристаллизации от затравки [2], и имеет продольную зависимость состава, указанную на рисунке 2. Область, из которой вырезан образец для  $n$  – ветви Пельтье-пары, так же указан на рисунке 3 прямоугольником с заливкой.



**Рисунок 1.** Изменение зонного спектра в системе  $\text{Bi}_{100-C}\text{-Sb}_C$  относительно уровня хим. потенциала чистого висмута с изменением параметра  $C$  (запрещенная зона обозначена заливкой) [1]

Первая позиция монтажа Пельтье-пары соответствует тому, что торец имеющий 7ат.% находится на термостате, а торец с 11ат.% находится на охлаждаемом Пельтье-контакте.

Вторая позиция монтажа соответствует тому, что на термостат ставится торец образца имеющий 11 ат.%, а противоположный торец с 7 ат.% на охлаждаемый Пельтье-контакт.



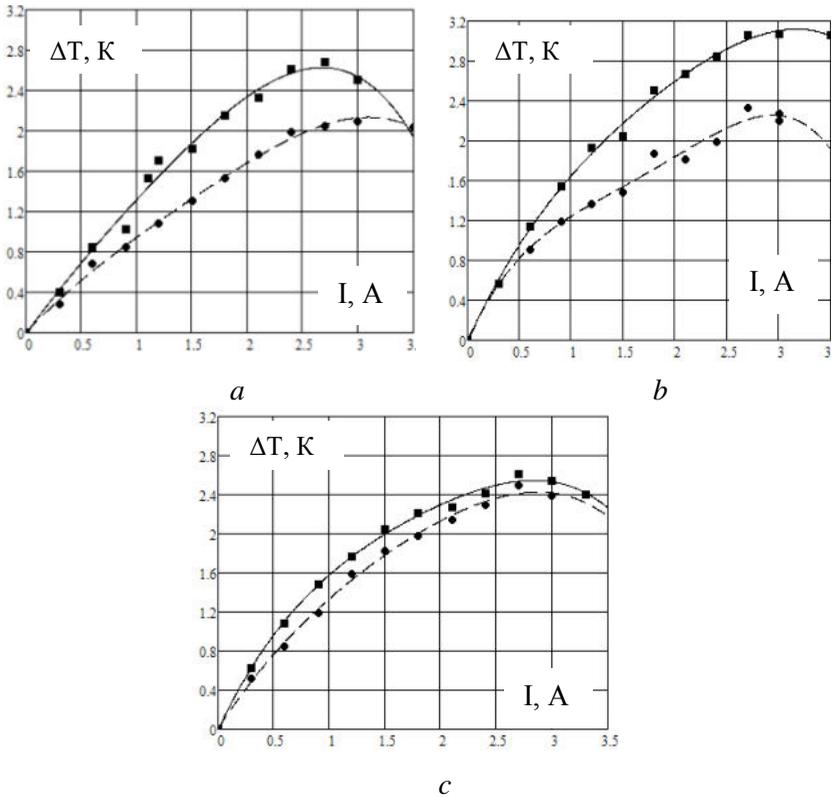
**Рисунок 2.** Зависимость концентрации сурьмы  $C$  в монокристаллическом слитке твердого раствора бинарной системы  $Bi-Sb$  от координаты вдоль длины слитка  $x$ . Прямоугольником с заливкой отмечена область, из которой вырезана  $n$ -ветвь.

На рисунке 3 даны зависимости перепада температуры  $\Delta T$  между охлаждаемым Пельтье-контактом и термостатом от величины тока через термоэлемент Пельтье.

Рисунок 3а соответствует отсутствию магнитного поля. Рисунок 3б соответствует наличию поперечного магнитного поля величиной  $B=20$  мТл, направленного вдоль плоскости спайности-ветви, а рисунок 3с соответствует наличию поперечного магнитного поля величиной  $B=40$  мТл. Кривые на всех графиках, экспериментальные точки которых отмечены квадратиками, соответствуют сопараллельным направлениям векторов градиентов температуры и ширины запрещенной зоны, а кривые, точки которых отмечены кружочками, соответствуют антипараллельным направлениям векторов градиентов температуры и ширины запрещенной зоны.

Из графиков рисунка 3 видно, что максимальный перепад температуры при оптимальном токе после смены взаимного направления градиентов температуры и ширины запрещенной

зоны изменяется примерно на 20% для случая отсутствия магнитного поля.



**Рисунок 3.** Графики зависимости величины Пельтье-охлаждения  $\Delta T$  от величины тока через термоэлемент  $I$ , а – без магнитного поля ( $B=0$ ); б - поперечное магнитное поле  $B=20$  мТл; с - поперечное магнитное поле  $B=40$  мТл. На всех графиках экспериментальные точки отмеченные квадратиками(■) соответствуют сонаправленным векторам градиентов ширины запрещенной зоны и температуры, а отмеченные кружочками(●) соответствуют противонаправленным векторам градиентов ширины запрещенной зоны и температуры

При наличии слабого поперечного по отношению к току магнитного поля величиной  $B=20$  мТл (рисунок 3б) после смены взаимного направления этих градиентов изменение перепада

температуры при оптимальном токе составляет примерно 30%, при этом перепад температуры, соответствующий оптимальным током при совпадающих направлениях градиентов температуры и запрещенной зоны, увеличивается под действием этого поля более чем на 20% по отношению к ситуации без поля. При увеличении поперечного магнитного поля до 40 мТл (рисунок 3с) эффект полярности нивелируется, а эффективность Пельтье-охлаждения уменьшается.

Из проведенного прямого измерения Пельтье-эффекта следует, что для градиентно-неоднородного образца в данном интервале концентрации сурьмы величина Пельтье-охлаждения при оптимальном токе существенно больше сонаправленных градиентов  $\vec{VT}$  и  $\vec{VE}_g$ , чем в случае, когда  $\vec{VT}$  и  $\vec{VE}_g$  противоположны, это означает что явно проявляется эффект полярности явления Пельтье.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Бочегов В.И.* Влияние градиентной неоднородности на физические свойства и явления переноса в кристаллической бинарной системе Bi-Sb. дис. ... д-ра физ.-мат.наук. Санкт-Петербург 2017.
- [2] *Бочегов В.И., Грабов В.М., Комаров В.А., Парахин А.С.* Сегрегация при направленной кристаллизации бинарных систем типа Bi-Sb, расчет и экспериментальная проверка. //Расплавы. 2014. №3. С. 85–92.

---

Мельников Николай Александрович,

Соискатель

Никифорова Лидия Николаевна,

2 курс аспирантуры, КГУ,

Пешкова Ирина Александровна

Соискатель

Курганский государственный университет,

640020, г. Курган, ул. Советская, 63 стр.4, (3522) 65-49-32,

nik\_lidia@mail.ru

# Исследование влияния частоты импульсов лазерного излучения на качество поверхности напыляемой плёнки

Д. С. Сидоренко

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доц. Г. М. Серопян

**Аннотация.** Производилось напыление тонких плёнок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  методом лазерной абляции. Сравнивались образцы, полученные при различных частотах следования лазерных импульсов. Выявлено, что уменьшение частоты импульсов улучшает качество поверхности плёнки.

**Ключевые слова:** лазерное напыление, морфология поверхности, высокотемпературная сверхпроводимость.

## Введение

Лазерные технологии имеют широкое применение в различных областях науки и техники, таких как компьютерные технологии, медицина, обработка материалов и многих других [1, 2]. Одним из наиболее важных процессов, происходящих при облучении материала, является абляция. Помимо значимости для микрообработки, это явление используется для напыления тонких плёнок [3].

В данной работе рассматриваются плёнки из высокотемпературной сверхпроводящей керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (YBCO). Качество поверхности такой плёнки влияет не только на её технологические свойства, но и на такие важные параметры как температура и ширина критического перехода [4, 5].

Целью данной работы являлось исследование влияния частоты импульсов лазерного излучения на качество поверхности плёнки, напыляемой методом лазерной абляции.

## Условия напыления пленок

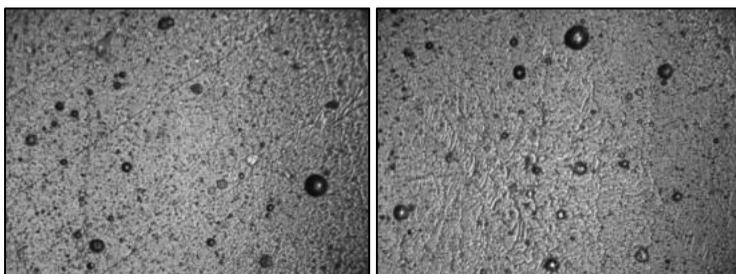
Напыление плёнок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  производилось с помощью твердотельного импульсного Nd:YAG лазера с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм, длительностью импульса  $\tau = 16$  нс, энергией

импульса  $E_{\text{имп}} = 0,12$  Дж и частотами следования импульсов  $f = 1$  и  $10$  Гц.

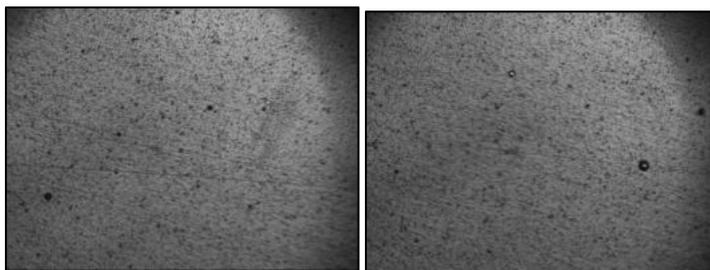
Давление в напылительной камере составляло  $100$  Па, расстояние от мишени до подложки –  $2\div 3$  см. В качестве подложки использовался  $\text{SrTiO}_3$  с ориентацией  $(100)$ , температура подложки при напылении –  $820^\circ\text{C}$  [6].

### Результаты исследования

С помощью оптического микроскопа МИИ – 4 с цифровой камерой были сделаны фотографии поверхности плёнок, некоторые из которых представлены на рисунках 1 и 2. Размеры каждой области  $310 \times 230$  мкм.



**Рисунок 1.** Поверхности пленки, напылённой при частоте  $10$  Гц.



**Рисунок 2.** Поверхности пленки, напылённой при частоте  $1$  Гц.

На основании полученных данных были составлены гистограммы распределения капель по диаметру (рисунок 3).

Анализ полученных данных показал, что с уменьшением частоты импульсов уменьшается концентрация капель: для

частоты 10 Гц она составила  $7,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ , а для частоты 1 Гц –  $1,9 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ .

Также уменьшается средний размер частиц: для частоты 10 Гц он составил 5,2 мкм, а для частоты 1 Гц – 4,3 мкм.

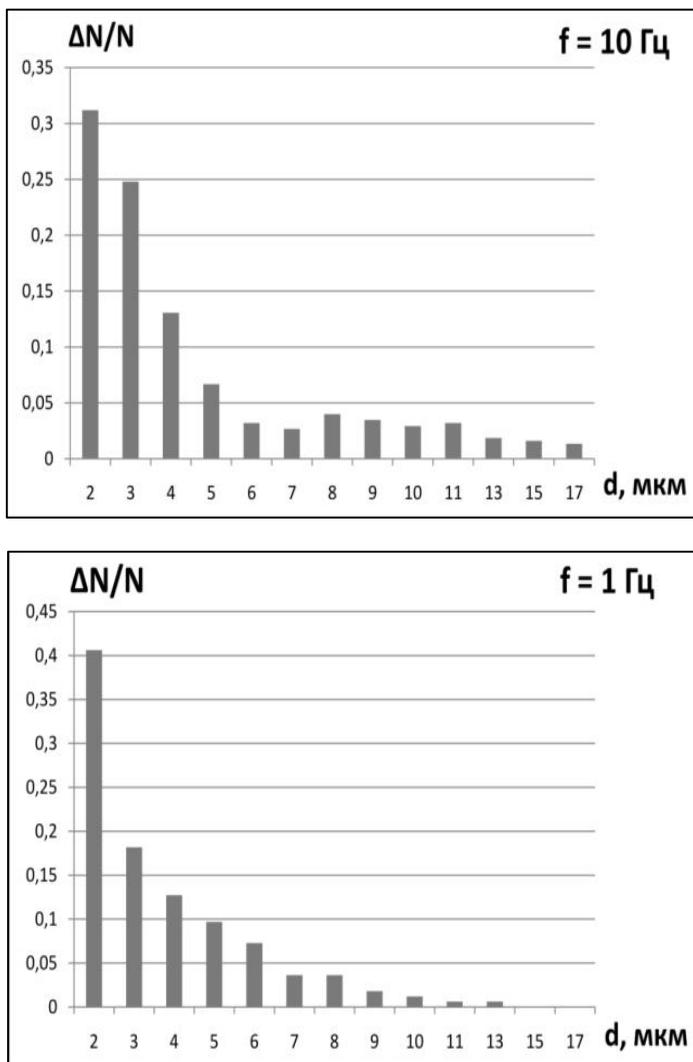


Рисунок 3. Распределение капель для частот 10 и 1 Гц.

## Заключение

По результатам исследований можно сделать вывод, что качество поверхности плёнки улучшается при снижении частоты импульсов за счет уменьшения количества и размеров крупных капель.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Вейко В. П.* Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии» / В. П. Вейко, А. А. Петров. СПб.: СПбГУ ИТМО. 2009. 143 с.
- [2] *Парфенов В. А.* Лазерная микрообработка материалов: Учеб. пособие. / В. А. Парфенов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. 59 с.
- [3] *Предтеченский М. Р.* Метод лазерного напыления в синтезе ВТСП / М. Р. Предтеченский. Автореф. дис. Рос. академия наук. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики. Новосибирск. 1993.
- [4] *Ильин А. И.* Связь морфологии поверхности тонких плёнок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , полученных импульсным лазерным напылением, с температурой окончания сверхпроводящего перехода / А. И. Ильин, О. В. Трофимов, А. А. Иванов. Физика твёрдого тела. 2020. Т. 62. № 9 (91347). С. 1555–1561.
- [5] *Красносвободцев С. И.* Влияние параметров YBCO плёнок на свойства ВТСП ПТ сквидов / С. И. Красносвободцев, А. Г. Маресов, А. Н. Образцов, В. Г. Пирогов, О. В. Снигирев. Журнал технической физики. 1995. Т. 65. № 2. С. 87–94.
- [6] *Позыгун И. С.* Выращивание YBCO пленок методом лазерной абляции: лабораторный практикум по курсу «Лазерная физика» для студентов физического факультета / И. С. Позыгун, Г. М. Серопян, С. А. Сычёв. Омск, 2019. 20 с.

---

Сидоренко Денис Сергеевич,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
1 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)363958,  
dazxcqs@gmail.com

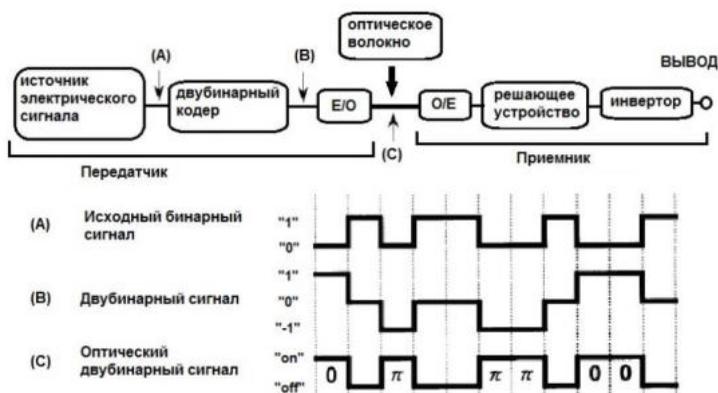
## Применение бинарных и двубинарных сигналов в волоконно-оптических системах связи

Я. О. Демочко

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Т. К. Бolečкая

**Аннотация.** Исследовано, как переход от бинарного кодирования к двубинарному уменьшает влияние хроматической дисперсии оптического волокна на качество передачи сигнала по волоконно-оптической системе связи.

**Ключевые слова:** бинарное кодирование, двубинарное кодирование, глазковая диаграмма.



**Рисунок 1.** Принципиальная схема оптической системы связи, использующей двубинарные сигналы.

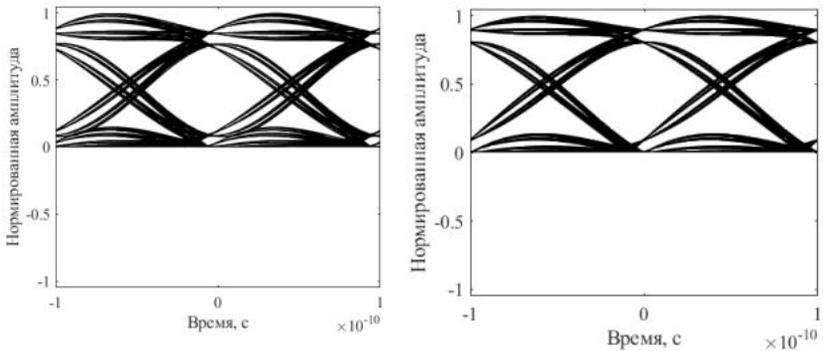
На рис. 1 приведена принципиальная схема оптической системы связи, использующей двубинарные сигналы. Если убрать двубинарный кодер, эта система превращается систему связи, использующую бинарные сигналы. Между оптико-электрическим преобразователем O/E и решающим устройством помещается фильтр низких частот приемника. В качестве него использовался фильтр Бесселя 5-го порядка с частотой среза  $0.75\pi / T$ . Перед

электро-оптическим преобразователем помещался фильтр низких частот передатчика.

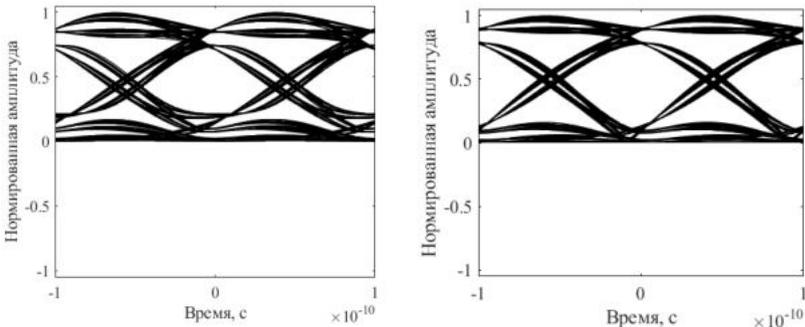
Действие оптического волокна на сигнал моделировалось с помощью введения передаточной функции оптического волокна

$$H(f) = e^{-i\alpha f^2}, \quad (1)$$

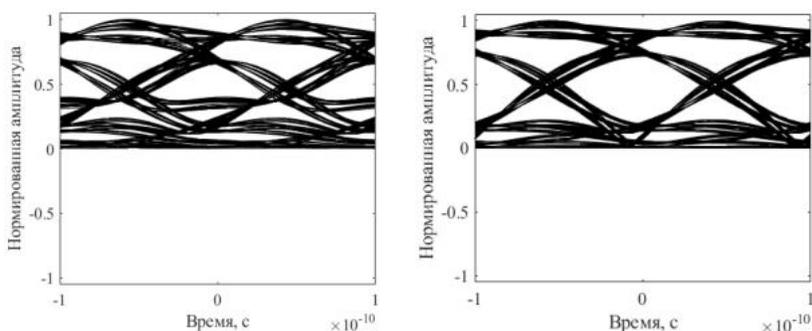
где  $\alpha = \pi D(\lambda) \frac{\lambda^2}{c} L$ ,  $D(\lambda)$  – дисперсионный волноводный параметр.



**Рисунок 2.** Глазковые диаграммы бинарного сигнала (слева) и двубинарного сигнала (справа) на расстоянии 0 км от передатчика.



**Рисунок 3.** Глазковые диаграммы бинарного сигнала (слева) и двубинарного сигнала (справа) на расстоянии 50 км от передатчика.



**Рисунок 4.** Глазковые диаграммы бинарного сигнала (слева) и двубинарного сигнала (справа) на расстоянии 100 км от передатчика.

На рис. 2-4 приведены глазковые бинарного и двубинарного сигналов на расстояниях 0, 50 и 100 км от передатчика в случае, если фильтр передатчика – фильтр Баттерворта 5-го порядка с частотой среза  $\pi/T$  ( $T$  – продолжительность бита). Искажения значительные на расстоянии 0 км, что связано с зависимостью групповой задержки фильтра Баттерворта от частоты. Но при увеличении расстояния глазковая диаграмма меняется мало, что связано с гладкостью АЧХ фильтра. Раскрытие глаза больше для двубинарных сигналов, чем для бинарных. Таким образом, видно преимущество двубинарных сигналов перед бинарными. Это связано с меньшей шириной спектра двубинарного сигнала по сравнению с шириной спектра сигнала бинарного и, вследствие этого, меньшим влиянием на двубинарный сигнал хроматической дисперсии оптического волокна.

Количественный критерий качества глазковой диаграммы (раскрытия глаза) называется штрафом или пенальти и определяется по формуле (2)

$$Penalty = -10 \lg \left( \frac{B}{A} \right) \text{ в дБ}, \quad (2)$$

где  $A$  – величина открытия глаза опорной диаграммы,  $B$  – величина открытия глаза данной диаграммы. За опорную принималась диаграмма на нулевом расстоянии от передатчика.

Результаты расчетов, представленные на рис. 5, подтверждают преимущество двубинарных сигналов перед бинарными.

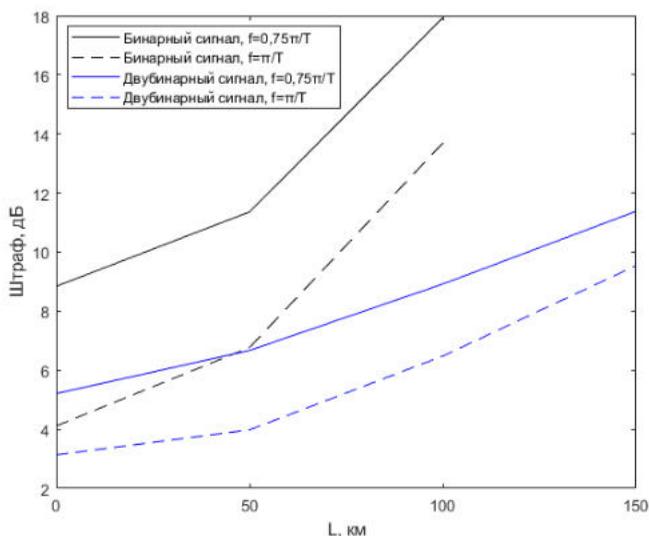


Рисунок 5. Штраф вследствие хроматической дисперсии.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. / М., 1978. 424 с.
- [2] Yonenaga K., Kuwano S. Dispersion-Tolerant Optical Transmission System Using Duobinary Transmitter and Binary Receiver. / JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, V. 15, P. 1530-1537.

---

Демочко Ярослав Олегович,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
2 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)644238,  
yarilo1998@mail.ru

# Характеристики интерферометра Маха-Цендера как оптического фильтра и ответвителя

А. С. Калита

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доц. Т.К. Болецкая

**Аннотация.** Рассчитаны коэффициенты пропускания портов интерферометра Маха-Цендера и условия, при которых эффективный коэффициент связи принимает оптимальное значение.

**Ключевые слова:** интерферометр Маха-Цендера, оптический фильтр, ответвитель.

Для осуществления волоконно-оптической связи требуются устройства для обработки оптических сигналов. В состав многих таких устройств входит интерферометр Маха-Цендера. Цель настоящей работы изучение характеристик этого прибора.

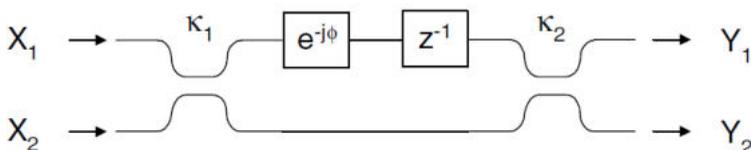


Рисунок 1. Схема интерферометра Маха-Цендера.

Схема интерферометра показана на рис. 1. Он состоит из двух смесителей с коэффициентами связи  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ . Входы  $X_1(z)$ ,  $X_2(z)$  и выходы  $Y_1(z)$ ,  $Y_2(z)$  интерферометра связывают передаточные функции  $H_{11}(z)$ ,  $H_{12}(z)$ ,  $H_{21}(z)$ ,  $H_{22}(z)$ , выражающиеся через  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$

$$\begin{pmatrix} Y_1(z) \\ Y_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11}(z) & H_{12}(z) \\ H_{21}(z) & H_{22}(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1(z) \\ X_2(z) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

$z^{-1} = e^{-j\omega'}$ , где  $\omega'$  – безразмерная нормированная частота.

Передаточные функции  $H_{11}$  и  $H_{22}$  описывают сквозные порты или bag-порты. Передаточные функции  $H_{12}$  и  $H_{21}$  описывают перекрестные порты или cross-порты. На рис. 2 приведены коэффициенты передачи (квадраты модулей передаточных функций).

Интерферометр Маха-Цендера с одинаковой длиной плеч называется симметричным и может быть использован для создания ответвителя с любым коэффициентом связи с помощью изменения разности фаз волн, распространяющихся в плечах. Для симметричного интерферометра без потерь Для симметричного интерферометра без потерь  $z^{-1} = 1$ . Полагаем в уравнении (1)  $X_1 = 1$  и  $X_2 = 0$ , используем формулы для передаточных функций, полагая в них  $z^{-1} = 1$ . Тогда для  $|Y_1|^2$  и  $|Y_2|^2$  получаем

$$|Y_1|^2 = 1 - (\kappa_1 + \kappa_2) + 2\kappa_1\kappa_2 - 2\sqrt{\kappa_1\kappa_2(1-\kappa_1)(1-\kappa_2)} \cos \varphi, \quad (2)$$

$$|Y_2|^2 = \kappa_1 + \kappa_2 - 2\kappa_1\kappa_2 + 2\sqrt{\kappa_1\kappa_2(1-\kappa_1)(1-\kappa_2)} \cos \varphi. \quad (3)$$

Эффективный коэффициент связи определяется формулой

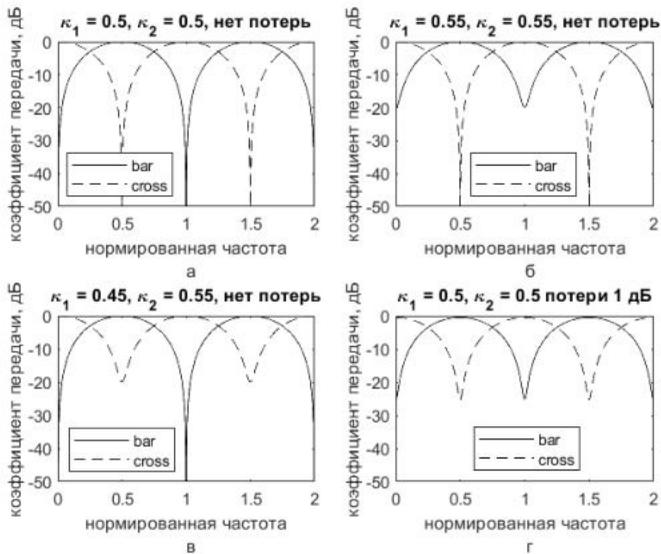
$$k_{MZI} = |Y_2|^2 / (|Y_1|^2 + |Y_2|^2) = |Y_2|^2. \quad (4)$$

Наилучшие характеристики достигаются при

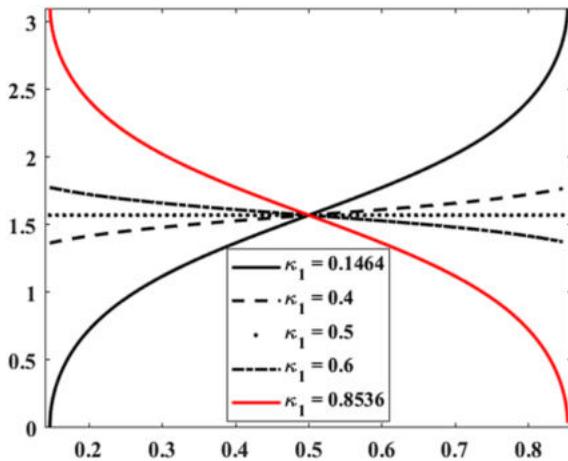
$|Y_1|^2 = |Y_2|^2 = 0.5$  и  $k_{MZI} = 0.5$ . Значение фазы  $\varphi$ , при котором коэффициент связи равен 0.5, находятся из соотношения

$$\cos \varphi = \frac{0,5 - \kappa_1 - \kappa_2 + 2\kappa_1\kappa_2}{2\sqrt{\kappa_1\kappa_2(1-\kappa_1)(1-\kappa_2)}}. \quad (5)$$

График зависимости  $\varphi$  от  $\kappa_2$  для нескольких значений  $\kappa_1$  показан на рис. 3.



**Рисунок 2.** Графики коэффициентов пропускания портов интерферометра Маха-Цендера.



**Рисунок 3.** Зависимость разности фаз  $\varphi$ , которая требуется для того, чтобы  $k_{MZI} = 0.5$ , от  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Christi K. Madsen, Jianh. Zhao.* Optical Filter Design and Analysis. A Signal Processing Approach. New York.: JOHN WILEY & SONS, INC., 1999.
- [2] *Chris G. H. Roeloffzen, Leimeng Zhuang, Caterina Taddei, Arne Leinse, Rene G. Heideman, Paulus W. L. van Dijk, Ruud M. Oldenbeuving, David A. I. Marpaung, Maurizio Burla, and Klaus -J. Boller.* Silicon nitride microwave photonic circuits//OPTICS EXPRESS. 2013. V. 21. №19. P. 22937-22961.
- [3] *Иванов А.Б.* Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.
- [4] *Хаспенджер Р.* Интегральная оптика: Теория и технология. М.: Мир, 1985.

---

Калита Александр Сергеевич,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
1 курс магистратуры, ФМИТ,  
644077, Омск, Пригородная 9/1, Kalita-1997@bk.ru

# **Зависимость пьезоэлектрического коэффициента $d_{33}$ пленок AlN от мощности магнетронного напыления на ситалловых и кремниевых подложках**

А. Н. Байдаков, В. И. Струнин

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. В. И. Струнин

**Аннотация.** Были исследованы пленки нитрида алюминия (AlN), полученные методом магнетронного напыления на кремниевых и ситалловых подложках. Показаны данные измерения  $d_{33}$  с помощью СМП. Была получена и рассмотрена зависимость пьезокоэффициента от мощности напыления.

**Ключевые слова:** силовая микроскопия пьезоотклика, нитрид алюминия, пьезоэффект.

**Введение.** Резонаторы на акустических волнах различных типов являются одними из важнейших компонентов электроники. Чем больше пьезокоэффициент  $d_{33}$ , тем больше коэффициент электромеханической связи (КЭМС), который определяет, сколько механической энергии преобразуется в электрическую, и, следовательно, как эффективно работает резонатор.

Целью этой работы является исследование зависимости продольного пьезоэлектрического коэффициента  $d_{33}$  от одного из параметров напыления – мощности напыления. Актуальность этой работы состоит в том, что мы стремимся получить наиболее эффективную плёнку AlN для ПАВ-резонаторов путём подбора наиболее оптимальных параметров магнетронного напыления.

**Результаты и обсуждение.** Образцы были получены методом магнетронного напыления на постоянном токе на установке нанесения многокомпонентных покрытий STEMS116-01. Применялись магнетроны MeIVac 6"MAKSPUTTERSOURCE. Вакуум создавался турбомолекулярным насосом STPA1303C. Шибер – плоский затворный клапан ДУ200.

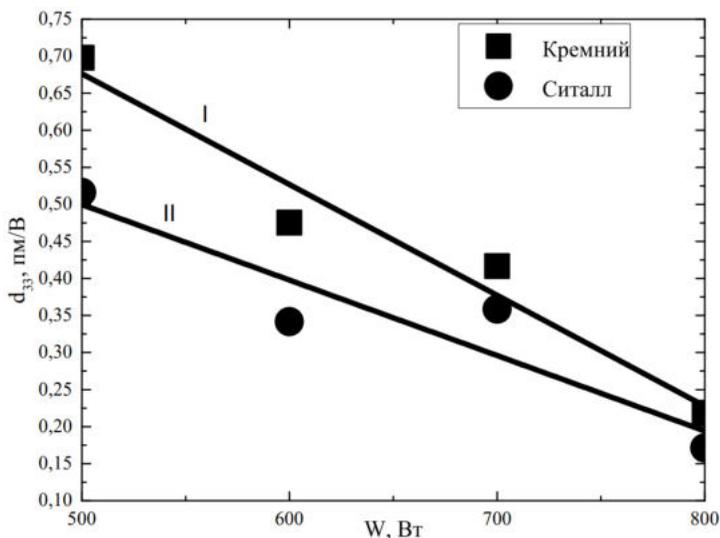
Сравнивались пьезокоэффициенты  $d_{33}$  для пленок AlN на подложках из кремния и ситалла при следующих параметрах:

давление – 0,1 Па, температура подложки – 390 °С, поток аргона Ar – 4 сссм, поток азота N<sub>2</sub> – 10 сссм. Данные полученных измерений приведены в таблице. Данные обрабатывались в программных пакетах MicrosoftExcel 2016 и OriginPro 2015.

**Таблица.** Измерения продольного пьезокоэффициента для пленок нитрида алюминия на кремниевых и ситалловых подложках

<i>Пленка</i>	<i>W, Вт</i>	<i>&lt;d<sub>33</sub>&gt; для подложки Si, пм/В</i>	<i>&lt;d<sub>33</sub>&gt; для ситалловой подложки, пм/В</i>
<i>№ 1</i>	<i>500</i>	<i>0,698</i>	<i>0,516</i>
<i>№ 2</i>	<i>600</i>	<i>0,475</i>	<i>0,342</i>
<i>№ 3</i>	<i>700</i>	<i>0,417</i>	<i>0,359</i>
<i>№ 4</i>	<i>800</i>	<i>0,219</i>	<i>0,171</i>

Для полученных измерений был построен график зависимости пьезокоэффициента  $d_{33}$  от мощности напыления  $W$ . График изображен на рисунке.



**Рисунок.** График зависимости  $d_{33}$  от  $W$  для пленок AlN на кремниевых и ситалловых подложках.

На рисунке изображены зависимости пьезокоэффициента для пленок на кремниевых (квадраты) и ситалловых (кружочки) подложках. Полученные данные говорят о том, что на кремниевой подложке пьезоэлектрический эффект выше, чем на ситалловой подложке. Разница значения пьезомодуля на разных подложках может быть связана с несоответствием кристаллических решёток и коэффициентов теплового расширения подложек и плёнки [1].

В полученных измерениях наблюдается линейное уменьшение  $d_{33}$  с ростом  $W$  для образцов как на кремниевых подложках, так и на ситалловых подложках. Из литературных источников, посвящённых исследованию пьезокоэффициент  $d_{33}$  известно, пьезокоэффициент  $d_{33}$  что спонтанная поляризация вюрцитной решётки, которой и обладает нитрид алюминия, происходит по оси  $c$  [2], поэтому главные параметры, влияющие на пьезокоэффициент – это степень кристалличности и (002)-ориентация кристаллической решётки.

В работе [3] было получено, что увеличение мощности напыления увеличивает количество и энергию атомов Al, но при мощностях выше 600 Вт происходит уменьшение энергий атомов Al в следствие увеличения частоты столкновений. Также, с ростом мощности напыления растёт и подвижность атомов Al на поверхности подложки, что приводит к ухудшению степени кристалличности полученной пленки. В работе [4] было отмечено, что увеличение энергии атомов позволяет сформировать высокоэнергетическую плоскость (002), однако, если атомы обладают достаточной подвижностью, они начинают перегруппировываться и формировать низкоэнергетические плоскости (100), (101) и (110). Ухудшение степени кристалличности так же отмечено и в работе [1].

Можно предположить, что и в нашем случае уменьшение пьезоэффекта связано с уменьшением степени кристалличности полученной пленки и доли плоскости (002).

**Заключение.** Была получена и рассмотрена зависимость пьезокоэффициента от мощности напыления для пленок нитрида алюминия на кремниевых и ситалловых подложках. Полученные исследования подтверждают сделанные ранее выводы о большем пьезокоэффициенте на кремниевых

подложках. Что же касается мощности напыления, то исходя из полученных данных можно сделать вывод, что  $d_{33}$  зависит линейно и убывает с увеличением мощности. Данная зависимость, по нашему предположению, связана с уменьшением степени кристалличности полученной пленки и доли плоскости (002).

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 121121700062-3).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Iqbal A., Faisal Mohd-Yasin.* Reactive Sputtering of Aluminum Nitride (002) Thin Films for Piezoelectric Applications: A Review. // *Sensors* (Basel, Switzerland). 2018. Vol. 18(6), 1797. DOI:10.3390/s18061797
- [2] *Nguyen, T., Adjeroud, N., Glinsek, S., Fleming, Y., Guillot, J., Grysan, P., & Polesel-Maris, J.* A film-texture driven piezoelectricity of AlN thin films grown at low temperatures by plasma-enhanced atomic layer deposition. // *APL Materials*. 2020. 8(7), 071101. DOI:10.1063/5.0011331
- [3] *Takeuchi, H., Ohtsuka, M., Fukuyama, H.* Effect of sputtering power on surface characteristics and crystal quality of AlN films deposited by pulsed DC reactive sputtering. // *Physica Status Solidi* (b). 2015. 252(5), 1163–1171. DOI:10.1002/pssb.201451599
- [4] *Fang L, Jiang Y, Zhu S, et al.* Substrate Temperature Dependent Properties of Sputtered AlN:Er Thin Film for In-Situ Luminescence Sensing of Al/AlN Multilayer Coating Health. *Materials* (Basel). 2018;11(11):2196. Published 2018 Nov 6. doi:10.3390/ma11112196

---

Байдаков Алексей Николаевич,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
2 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, +79963961875,  
fbaetc@yandex.ru

## Секция

### «ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ»

---

#### Оценка концентрации катионов некоторых металлов в пробах круп, приобретенных в городе Омске (Россия)

В. А. Зуева

Научный руководитель: д.г.-м.н., проф. О. А. Голованова

**Аннотация.** В образцах круп, приобретенных в городе Омске (Россия) методом АЭС ИСП были определены такие ионы металлов, как Fe, Mn, Zn, Cr, Ni и Co. По результатам исследования было установлено, что концентрация ионов металлов в мг/кг в выбранных образцах круп находится в пределах: Fe (1,1-70,1), Mn (1,9-18,0), Zn (22,6-37,9), Cr (0.06-0.7), Ni (1,5-3,0). Ионы кобальта не были обнаружены ни в одном из видов круп. Средние концентрации ионов металлов в крупах, приобретенных в городе Омске, уменьшаются в последовательности Fe > Zn > Mn > Ni > Cr > Co. Уровни содержания металлов, определенные в проанализированных образцах круп, оказались ниже допустимых пределов, установленных ВОЗ, следовательно, все эти крупы безопасны для потребления в пищу человеком.

**Ключевые слова:** крупы, металлы, АЭС ИСП, железо, марганец, никель, хром, кобальт, цинк.

Крупы являются наиболее важными продуктами для употребления в пищу, а продукты на их основе являются основным источником энергии, белка, витаминов группы В и минералов для населения всего мира. Как правило, крупы дешевы в производстве, легко хранятся, транспортируются и не портятся, если их хранить в сухом виде. Проблемы безопасности пищевых продуктов и потенциальные риски для здоровья являются одной из наиболее серьезных экологических проблем [4]. Металлы относятся к числу основных загрязнителей пищевых продуктов и могут рассматриваться как основная проблема для окружающей среды. Металлам в пищевых продуктах уделяется особое внимание во всем мире из-за их токсического воздействия даже при очень низких

концентрациях [5]. Подобные исследования в последние годы активно проводились в образцах риса [1], какао [6], сывороточных протеинах [2], луковицах чеснока [8] и косметологических продуктах [7].

Содержание металлов в пробах определяли при помощи метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICPE-9820 фирмы Shimadzu с вакуумируемым спектральным блоком и при помощи метода атомно-абсорбционной спектроскопии на двухлучевом спектрометре AA-7000 фирмы Shimadzu.

Для каждого образца использовали две параллельные навески  $1,00 \pm 0,01$  г предварительно измельченной и гомогенизированной пробы, добавляли 8 см<sup>3</sup> концентрированной азотной кислоты. Помещали закрытые стаканы вентилируемого типа в микроволновую печь и проводили разложение образцов. После разложения стаканы количественно переносили в мерные колбы вместимостью 25 см<sup>3</sup>, промывая стаканы водой для лабораторного анализа. Затем доводили растворы до метки водой и перемешивали.

Средние концентрации металлов в выбранных образцах круп, приобретенных в Омске, приведены в таблице. Результаты представлены как средние значения параллелей.

Самая высокая концентрация железа была обнаружена в чечевице (70,1 мг/кг), минимальная – в рисовой крупе (1,1 мг/кг). Предел ВОЗ по содержанию ионов железа в продуктах питания составляет 425 мг/кг [3]. Результаты, полученные в данном исследовании, ниже установленного уровня. Уровень содержания ионов железа в крупах повышается в порядке: рисовая, манная, кукурузная, пшено, ячневая, гречневая, овсяная, гороховая, чечевица.

Максимальная концентрация марганца была обнаружена в чечевице из Челябинской области (18,0 мг/кг), минимальная - в манной крупе с Алтайского края (1,9 мг/кг). Содержание ионов марганца в крупах повышается в порядке: манная, кукурузная, пшено, овсяная, рисовая, гороховая, ячневая, гречневая.

Как видно из таблицы, уровни содержания ионов цинка находятся в пределах 2,6-32,4 мг/кг. Самое высокое содержание обнаружено в чечевице, самое низкое – в манной крупе.

Содержание ионов цинка, определенное в данных крупах, во всех образцах не превышает уровня ВОЗ [3].

Исследование показало, что содержание ионов никеля в отдельных крупах находится в диапазоне от 1,45 до 3 мг/кг, что меньше допустимого предела для зерновых культур (67 мг/кг) [3]. Содержание катионов никеля в овсяной, рисовой, кукурузной, манной и ячневой крупах находится в диапазоне менее 0,05 мг/кг.

Концентрация ионов хрома в чечевице и гречневой крупе составила 0,7 и 0,09 мг/кг соответственно. Эти значения ниже максимально допустимого предела в 2,3 мг/кг, установленного ВОЗ [3].

Как видно из таблицы, концентрация ионов кобальта в выбранных образцах круп находится в диапазоне до 0,04 мг/кг.

В целом, результаты показывают, что концентрации ионов металлов в образцах зерновых в порядке убывания располагаются в последовательности:  $Fe > Zn > Mn > Ni > Cr > Co$ . Полученные значения концентраций сравнивались с допустимыми пределами ФАО/ВОЗ (2001), было установлено, что все значения находились в пределах допустимого (таблица).

Поскольку употребление злаков, которые являются основным источником пищи для человека, непосредственно влияет на здоровье человека, следует периодически проводить мониторинг микроэлементов в крупах. Применение удобрений, пестицидов и использование загрязненных водных ресурсов при выращивании зерновых культур может влиять на накопление этих металлов. Потребление злаков, загрязненных тяжелыми металлами, оказывает различное вредное воздействие на здоровье человека; поэтому необходим мониторинг загрязнения продуктов тяжелыми металлами. Результаты этого исследования показали, что различные концентрации металлов Fe, Zn, Mn, Cr, Co, Ni в крупах, продаваемых в городе Омске (Россия), уменьшаются в последовательности  $Fe > Zn > Mn > Ni > Cr > Co$ . Уровни содержания ионов металлов, определенные во всех выбранных крупах, находятся в пределах допустимого диапазона и не представляют опасности для здоровья их потребителей в городе Омске.

**Таблица.** Средние концентрации определенных ионов металлов в мг/кг. Буква в скобках указывает на место производства крупы (А – Алтайский край, К- Краснодарский край, Л – Ленинградская область, Н – Новосибирская область, Т – Тюменская область, Ч – Челябинская область)

Образцы круп	Ионы					
	Fe	Mn	Zn	Cr	Ni	Co
<b>Гороховая</b>	25.70 (А), 19.40 (Н), 20.65 (Т), 45.69 (Ч)	3.20 (А), 3.55 (Н), 3.62 (Т), 7.81 (Ч)	29.10 (А), 19.90 (Н), 32.00 (Т), 31.19 (Ч)	<	1.45 (Ч)	<
<b>Рисовая</b>	1.75 (А), 1.98 (К), 1.10 (Л), 2.00 (Н), 1.25(Т), 2.22 (Ч)	7.12 (А), 7.12 (К), 6.80 (Л), 6.50 (Н), 5.49(Т), 6.35 (Ч)	13.34 (А), 12.90 (К), 11.71 (Л), 13.10 (Н), 12.82 (Т), 12.55 (Ч)	<	<	<
<b>Гречневая</b>	25.40 (Н), 35.70 (Ч)	16.00 (Н), 11.70 (Ч)	20.00 (Н), 24.33 (Ч)	0.063 (Н), 0.088 (Ч)	2.43 (Н), 3.00 (Ч)	<
<b>Овсяная</b>	33.25 (Т)	5.70 (Т)	28.25 (Т)	<	2.23 (Т)	<
<b>Пшено</b>	20.15 (Н)	4.44 (Н)	18.40 (Н)	<	<	<
<b>Кукурузная</b>	10.33 (Н)	2.39 (Н)	8.72 (Н)	<	<	<
<b>Манная</b>	3.03 (А)	1.86 (А)	2.56 (А)	<	<	<
<b>Ячневая</b>	25.70 (Н)	12.00 (Н)	21.20 (Н)	<	<	<
<b>Чечевица</b>	62.80 (А), 59.05 (А), 48.65 (А), 66.00 (К), 50.17 (Н), 70.05 (Ч)	15.10 (А), 10.90 (А), 7.49 (А), 11.30 (К), 8.33(Н), 17.99 (Ч)	37.90 (А), 21.90 (А), 31.30 (А), 25.20 (К), 24.00 (Н), 32.39 (Ч)	0.72 (Ч)	2.88 (Ч)	<
<b>Предел ВОЗ [3]</b>	425.5	500	99.4	2.3	67	50

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ebrahimi-Najafabadi H.* Determination of toxic heavy metals in rice samples using ultrasound assisted emulsification microextraction combined with inductively coupled plasma optical emission spectroscopy. / Ebrahimi-Najafabadi H., Pasdaran A, Bezenjani RR, Bozorgzadeh E. Food chemistry. 2019. vol 289. 26-32 p.
- [2] *Elgammal S.* Determination of heavy metal content in whey protein samples from markets in Giza, Egypt, using inductively coupled plasma optical emission spectrometry and graphite furnace atomic absorption spectrometry: A probabilistic risk assessment study. / Elgammal S., Khorshed M., Ismail E. H. Journal of Food Composition and Analysis. 2019. vol 84.
- [3] FAO/WHO, Codex Alimentarius Commission. Food additives and contaminants. Joint FAO/WHO food standards programme, ALINORM 01/12A. 2001. 1-289 p.
- [4] *Gebregziabher B.* Assessment of levels of lead, cadmium, copper and zinc contamination in selected edible vegetables./ Gebregziabher B., Tesfaye S. Int. J. Innov. Appl. Stud. 2014. 78-86 p.
- [5] *Haware DJ.* Determination of specific heavy metals in fruit juices using atomic absorption spectroscopy (AAS). / Haware DJ, Pramod HP. Int. J. Res. Chem. Environ. 2014. vol 4. 163-168 p.
- [6] *Mohamed R.* Method validation and determination of heavy metals in cocoa beans and cocoa products by microwave assisted digestion technique with inductively coupled plasma mass spectrometry. / Mohamed R., Zainudin B.H., Yaakob A.S. Food Chemistry. 2020. vol 303.
- [7] *Tan X.* Метод определения свинца и кадмия в продуктах косметологии с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. / Tan X., Wang Z. Журнал прикладной спектроскопии. 2018. 85, №4. 606-611 с.
- [8] *Tan X.* Определение содержания микроэлементов в луковицах чеснока (*Allium sativum L.*): различие сортов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой./ Tan X., Wang Z., Liu M., He K. Журнал прикладной спектроскопии. 2020. 87, №1. 176 с.

---

Зуева Валерия Анатольевна,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
2 курс магистратуры, химический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)644238,  
[balaganoff@mail.ru](mailto:balaganoff@mail.ru)

## Синтез и свойства полимерных композитов на основе модифицированных гидроксиапатитов

А. И. Никитина

Научный руководитель: д.г.-м.н., проф. О. А. Голованова

**Аннотация.** Осуществлен синтез композитов Sr-ГА, SeO<sub>3</sub>-ГА в присутствии хитозана. Изучены физико-химические исследования свойств полученных образцов. Приведены результаты определения фазовых, спектроскопических, термических характеристик синтезируемых композитов. Проведена оценка растворимости порошков в изотоническом растворе для изучения кинетики.

**Ключевые слова:** композит, гидроксиапатит, хитозан, легирующий ион.

Фосфаты кальция широко распространены в природе, особенно в костных тканях позвоночных. Составными строительными блоками кости являются композиты биологического апатита и молекулы коллагена [1].

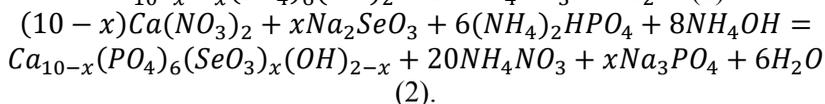
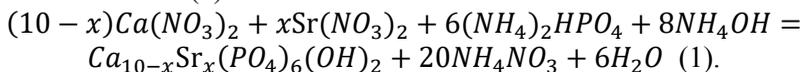
Для создания биосовместимых кальций-фосфатных материалов с хорошей биорезорбируемостью используют гидроксилapatит. Растворимость синтетического ГА является слишком низкой для использования его в чистом виде в качестве имплантируемого материала [2], то проводят модифицирование апатита различными биологически активными ионами, находящиеся в составе природной костной ткани, что позволяет управлять свойством растворимости материалов на его основе [3].

Известно, что селен является важным элементом для правильного функционирования костной ткани с сильными антиоксидантными свойствами. Поэтому введение иона селена в структуру синтетического гидроксиапатита будет хорошо влиять на его биосовместимость с костной тканью, а также улучшит свойство растворимости материала. Наиболее хорошей биосовместимостью обладают природные биополимеры (хитозан, хитин, целлюлоза и др.).

Целью данной работы является получение и изучение физико-химических свойств композитов и гранул на основе ГА/хитозан в присутствии иона стронция и селенит иона.

### Экспериментальная часть

Проведен синтез композитов Sr-ГА и SeO<sub>3</sub>-ГА в присутствии хитозана методом осаждения из водных растворов. В основе синтеза с ионом стронция лежит реакция (1), с селенит-ионом (2).



Тем самым было 6 проб, в которых варьировалась концентрация легирующего иона: три колбы с ионом стронция: 0,3г/л; 0,6г/л; 0,9г/л; и три колбы с селенит ионом: 0,15%; 0,30%; 0,50%. Далее во все 6 колб добавили 10 мл 25%-ного водного раствора NH<sub>4</sub>OH, довели pH системы до 12±0,05 (с ионом стронция) и 10,5 (с селенит-ионом).

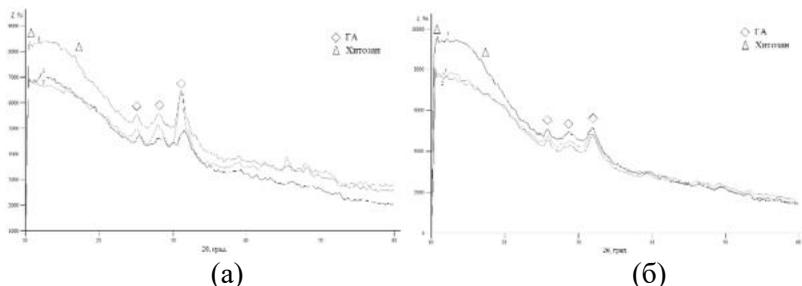
Характеристику образцов проводили методами РФА и ИК-Фурье-спектроскопии. Морфологию твердых фаз проводили с помощью микроскопа серии «XSP-140». Содержание воды в образцах и температуру деструкции композитов определяли на основании термогравиметрического анализа. Для растворения в изотоническом растворе отбирали пробы образца массой 0.2000 ± 0.0002 г помещали в 100 мл 0,9%-ного раствора NaCl. Определение концентрации ионов кальция проводили по методу прямой потенциометрии на иономере «И-160МИ».

### Результаты и обсуждения

Все осадки, полученные после трех суток кристаллизации, представлены в виде основной компоненты – гидроксиапатит/хитозан (рис. 1).

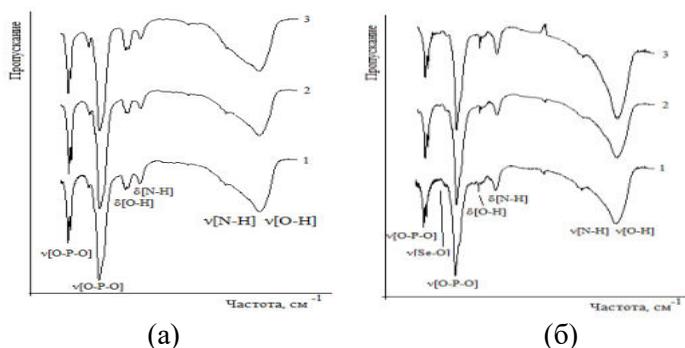
С использованием формулы Дебая-Шерра по данным РФА были рассчитаны размеры кристаллита. С увеличением концентрации селенит-ионов в исходном растворе размеры

кристаллитов увеличиваются, а с увеличением концентрации иона стронция размеры кристаллитов уменьшаются.



**Рис 1.** Дифрактограммы композитов (а) - Sr-ГА/хитозан (1-0,3; 2-0,6; 3-0,9 г/л) и (б) - SeO<sub>3</sub>-ГА/хитозан (1-0,15; 2-0,30; 3-0,50 %)

По результатам метода ИК-Фурье-спектроскопии (рис. 2) все синтезированные композиты содержат весь набор полос, характерных для фосфатных групп. Присутствуют характерные полосы для хитозана. У образцов с селенит-ионом зарегистрированы две полосы при 820 и 890 см<sup>-1</sup>, интенсивность которых увеличивалась с ростом концентрации ионов селенита в исходном растворе.



**Рис.2.** ИК-спектры композитов (а) - Sr-ГА/хитозан (1-0,3; 2-0,6; 3-0,9 г/л) и (б) - SeO<sub>3</sub>-ГА/хитозан (1-0,15; 2-0,30; 3-0,50 %)

Исследование образцов методом оптической микроскопии при увеличении 10x10 показало, что образцы Sr-ГА/хитозан и

SeO<sub>3</sub>-ГА/хитозан имеют одинаковую пластинчатую, удлиненную форму.

С целью изучения термических свойств продуктов кристаллизации проведен термогравиметрический анализ композитов. Наибольшее уменьшение массы наблюдается для композита с максимальным содержанием легирующего иона: ион стронция – 0,9г/л (70,27%), селенит-ион – 0,50% (54,98%). Это доказывает, что образцы с селенит-ионом термически менее устойчивы по сравнению с образцами Sr-ГА/хитозан.

На основании полученных зависимостей растворения образцов в изотоническом растворе были рассчитаны начальные значения скоростей выделения ионов кальция в раствор. Сравнение скоростей растворения композитов фосфатов кальция, полученных на основе иона стронция и селенит-иона в присутствии хитозана, показало, что большую скорость растворения в физиологическом растворе, имеют композиты, синтезированные в присутствии селенит-иона.

Таким образом, в работе представлены результаты по синтезу и изучению свойств и характеристик замещенного гидроксиапатита ионами стронция  $Ca_{10-x}Sr_x(PO_4)_6(OH)_2$  (Sr-ГА) и селенит ионами  $Ca_{10-x}(PO_4)_6(SeO_3)_x(OH)_{2-x}$  (Se-ГА) в органической матрице хитозана.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Fratzl P, Gupta H, Paschalis E, Roschger P.* Structure and mechanical quality of the collagen–mineral nano-composite in bone. *J Mater Chem* 2004, 14, P. 2115-23.
- [2] *Chen Z.-F.* Hydroxyapatite solubility in simple inorganic solutions / Z.-F. Chena, B.W. Darvell, V.W.-H. Leung // *Archives of oral biology.* 2004. Vol. 49. – P. 359– 367.
- [3] *Supova M.* Substituted hydroxyapatites for biomedical applications: A review / M. Supova // *Ceram. Int.* 2015. Vol. 41. – P. 9203–9231.

---

Никитина Анастасия Ивановна,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
2 курс магистратуры, химический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55-А, (3812)644238,  
anastacia98@mail.ru

## Секция

### «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЗОВАНИЯ»

---

#### Диагностика мотивации учебной деятельности в процессе обучения

В. М. Демидович

Научный руководитель: д.п.н., доц. М.П. Ланкина

**Аннотация.** В статье поднимается проблема отсутствия мотивации учения. Рассматривается наличие учебной мотивации как приоритета во ФГОС для основного общего образования. Описывается методика диагностики мотивации, выбранная для исследования. Приводятся результаты констатирующего и поискового этапов дидактического эксперимента.

**Ключевые слова:** мотивация, познавательный интерес, диагностика.

В наше время, когда почти у каждого ребенка есть телефон как источник быстрых развлечений, отсутствие мотивации к учебе является распространенной проблемой среди школьников всех возрастов. Кроме того, не все преподаватели уделяют этому вопросу должное внимание, что также негативно сказывается на заинтересованности учеников в процессе. Нет универсальной рекомендации, рассказывающей, как повышать мотивацию к обучению.

При ознакомлении с ФГОС ООО было замечено, что стандарт устанавливает требования к личностным и метапредметным результатам освоения обучающимися основной образовательной программы основного общего образования, включающим сформированность их мотивации к обучению и целенаправленной познавательной деятельности[2].

Изучение мотивационной составляющей деятельности учащихся позволяет получить информацию о качестве образовательного процесса. Именно мотивационная составляющая определяет способность школьника ставить и успешно решать учебные задачи. Результаты диагностики

позволяют наметить пути решения выявленных проблем, направить внимание педагогов на способы повышения учебной мотивации у учащихся определенного возраста.

Для диагностики уровня мотивации обучающихся к получению знаний на констатирующем этапе нашего дидактического эксперимента используется анкетирование (тестирование) выборки школьников из одной возрастной группы с дальнейшим анализом результатов. Виды тестов разнообразны, встречаются как задания закрытого типа (множественный выбор, альтернативный выбор, установление соответствия), так и открытого (свободное изложение, дополнение).

Нами была выбрана методика диагностики типа школьной мотивации по Лепешовой Е.М. Школьная мотивация дифференцирована на множество разных типов, и суть данной методики в том, чтобы выявить преобладающий тип мотивации учащегося — то есть тот мотивационный механизм, который является доминирующим именно для него в его учебной деятельности. Опросник используется для выявления школьной мотивации у школьников 7-9 классов [1].

В нашем исследовании приняли участие 58 учеников 8 классов. Исходя из результатов был сделан вывод, что сильнее всего на обучающихся влияет осознание социальной необходимости хорошей учебы в школе для собственного успешного будущего (89%). Познавательный интерес, изучение повышения которого и заложено в основу нашей научной деятельности, проявляется среди восьмиклассников на 21% слабее (68%), он занимает второе место среди преобладающих типов мотивации. Процентный показатель говорит о том, насколько значимым является тот или иной тип мотивации в школьной деятельности участников опроса.

Для выявления зависимости между типом урока и мотивацией к познанию на поисковом этапе нашего дидактического эксперимента был составлен опросник, представляющий собой систему вопросов с возможностью множественного выбора ответов. У учеников была возможность выбрать наиболее интересные для них виды уроков для каждого из четырёх типов уроков по ФГОС, перечисленные в таблице.

Для обеспечения наилучшего понимания учениками поставленных вопросов были приведены поясняющие комментарии, например: «Как провести урок, на котором предстоит изучить новую тему? 1) Проблемный урок (перед вами возникает вопрос или задача, которую вы не можете решить сразу. Нужно разобраться в теме, чтобы прийти к ответу); 2) Игра (соревнование на очки, баллы, основанное на изучении нового материала)» и т.п. Со всеми перечисленными в опросе видами уроков дети знакомы.

**Таблица.** Виды уроков для каждого типа урока по ФГОС

Тип урока по ФГОС	Виды уроков
Урок открытия нового знания	Лекция, «путешествие», проблемный урок, беседа, конференция, мультимедиа-урок, игра, уроки смешанного типа.
Урок рефлексии	Сочинение, практикум, диалог, ролевая игра, деловая игра, комбинированный урок.
Урок общеметодологической направленности	Конкурс, конференция, консультация, урок-игра, диспут, обсуждение, обзорная лекция, беседа.
Урок развивающего контроля	Письменные работы, устные опросы, викторина, смотр знаний, творческий отчет, защита проектов, рефератов, тестирование, конкурсы.

По результатам опроса мы увидели, что среди опрошенной группы учеников наибольший интерес вызывают те уроки, которые связаны с активным взаимодействием учителя и учеников (диалог, беседа, обсуждение). Наименьший энтузиазм

вызывает подготовка проектов, докладов, рефератов. Многие проявляют интерес во время проведения на уроках игр и конкурсов, а также при использовании мультимедиа и компьютерных технологий.

Продолжением поискового эксперимента станет поиск средств и методических материалов, способствующих повышению уровня положительной мотивации (задачи, демонстрации, жизненные ситуации и т.д.), для их интеграции в наиболее мотивирующие к учебной деятельности виды уроков.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Журнал «Школьный психолог» [Электронный ресурс] №09 (391), 2007-05-07 / Издательский дом «Первое сентября» (1sept.ru): [web-сайт]. Режим доступа: <https://psy.1sept.ru/article.php?ID=200700918> (дата обращения 11.06.2022)

[2] Приказ Минобрнауки России от 17.12.2010 N 1897 (ред. от 11.12.2020) "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта основного общего образования" (Зарегистрировано в Минюсте России 01.02.2011 N 19644)

---

Демидович Вероника Максимовна,  
Омский государственный университет им. Ф.М.  
Достоевского,  
2 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, г. Омск-77, пр. Мира, 55-А, (3812)647787,  
demidovich\_v@vk.com

## Контекстное обучение физике в условиях сетевого взаимодействия «предприятие – СПО – школа»

А. А. Зенова

Научный руководитель: д.п.н., доцент М. П. Ланкина

**Аннотация.** Статья посвящена реализации контекстного обучения физике в условиях сетевого взаимодействия «предприятие - СПО - школа». В ней показывается необходимость контекстного подхода к подготовке кадров в системе профессионального образования. Рассматриваются профессионально-ориентированные контекстные задачи как средство формирования профессиональных компетенций.

**Ключевые слова:** контекстное обучение, сетевое взаимодействие «предприятие-СПО-школа», профессионально-ориентированная задача, профессиональные компетенции.

В современной практике профессионального образования широко распространено дуальное образование, когда теоретическое обучение студенты проходят на базе образовательной организации, а практическое - на базе предприятия-стейкхолдера [1].

В Омске реализуется сетевое взаимодействие предприятия-стейкхолдера АО «ОНИИП», БПОУ «Омский авиационный колледж имени Н.Е. Жуковского» и БОУ «Гимназия №76», целью которого является подготовка группы будущих монтажников радиоэлектронной аппаратуры и приборов (далее – РЭА и П)[4]. Федеральные государственные образовательные стандарты профессионального образования разработаны с позиции компетентностного подхода.

На данный момент условиям реализации компетентностного подхода в образовании в большей мере соответствуют теория и технологии контекстного обучения [2].

Контекстное обучение дает возможность приблизить учебный процесс к будущей профессиональной деятельности, создавать с помощью учебных моделей, заданий и задач предметный и социальный контексты деятельности, молодому

специалисту в будущем быстро адаптироваться на рабочем месте.

По своему содержанию и форме обучения, по деятельности, которую выполняет студент, образование является искусственной моделью реальной жизни и профессиональной деятельности. В этом и состоит основное противоречие профессионального образования: овладение профессиональной деятельностью должно быть обеспечено в рамках всемирной по качеству деятельности – учебной [3].

На наш взгляд, формирование профессиональных компетенций будущих монтажников РЭА и П можно моделировать не только в процессе изучения специальных технических дисциплин, но и общеобразовательных дисциплин, например, физики.

Одним из способов применять полученные знания на практике и в дальнейшей профессиональной деятельности является внедрение в учебный процесс по физике технологии контекстного обучения.

В сборниках задач по физике конкретные физические задачи чаще всего не учитывают будущую профессиональную деятельность. Исходя из этого, формирование базы контекстных задач является важной задачей учителя физики, но её достижение требует огромных затрат различных ресурсов. Однако, можно создать интересную контекстную задачу из уже готовой, лишь наполнив ее условиями, максимально приближенными к будущей профессии. В этом может помочь контент-анализ профессионального и образовательного стандартов, анализ трудовых функций монтажников РЭА и П, а также анализ рабочей программы по физике.

В структуре профессиональных компетенций можно выделить элементы как общего характера, необходимые всем людям, независимо от профессии, так и узко специальные, более глубокие, необходимые для получения профессии монтажника РЭА и П.

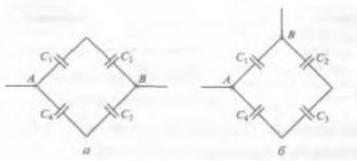
Приведём пример задачи, требующей практического применения знаний по теме «Электрический ток» и направленной на формирование элементов профессиональных компетенций общего характера:

«В нашем кабинете была произведена замена ламп накаливания на светодиодные лампы. Это экономичные энергосберегающие лампы с хорошей светимостью. Давайте попробуем разобраться, действительно ли они экономят электроэнергию?». Данная контекстная задача мотивирует обучающихся применять знания физических закономерностей в контексте реальной жизненной ситуации. Для решения этой задачи нужно сравнить мощности, развиваемые электрическим током на лампах накаливания и светодиодных лампах, при одинаковом времени работы.

Контент-анализ ФГОС СПО по профессии «Монтажник РЭА и П» и рабочей программы по физике позволяет установить связь формируемых у студентов профессиональных компетенций с учебно-познавательными и практическими заданиями по физике. Например, темы «Разность потенциалов», «Проводники в электрическом поле», «Конденсаторы» можно сопоставить с элементами профессиональной компетенции ПК 1.1. «...производить монтаж больших групп сложных радиоустройств и приборов радиоэлектронной аппаратуры» [5].

Далее приведём пример задачи, направленной на формирование узко специальных элементов профессиональных компетенций:

«Определите емкость системы конденсаторов, соединенных по схеме (рис. а, б). Емкость каждого конденсатора  $C = 3$  мкФ.»



В этом случае контекстная задача направлена прямо на будущую профессию. Студент должен уметь распознавать обозначение конденсаторов на схеме, последовательное и параллельное соединение элементов электрической схемы и уметь рассчитывать ёмкость систем конденсаторов.

В заключение можем сказать, что контекстное обучение при организации занятий решения задач является очень важным, так как обеспечивает высокий уровень полноты знаний, понимание связи явлений и роли научных знаний в

практической деятельности человека, способствует развитию профессиональных компетенций.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] *Semrad J., Skrabal M.* Polytechnic education today and the dual system //International Journal of Teaching and Education, 2017. Vol. V(1), pp. 54-66.

[2] *Вербицкий А.А., Дубовицкая Т.Д.* Контексты содержания образования // М. : РИЦ МГОПУ им. М. А. Шолохова, 2003. – 80 с.

[3] *Вербицкий А.А.* Контекстное обучение в компетентностном подходе // Высшее образование в России. 2006. № 1. С. 39–46

[4] *Ланкина М.П., Кривальцевич С.В., Холкина Е.В., Зенова А.А.* Сетевое взаимодействие «предприятие – СПО – школа» как условие формирования профессиональных компетенций у будущих монтажников радиоэлектронной аппаратуры и приборов // Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти. ТУСУР. 2022. С.80–83

[5] Об утверждении Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по профессии 210401.02 Монтажник радиоэлектронной аппаратуры и приборов: приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 02.08.2013 г. № 882. (ред. от 09.04.2015) Зарегистрировано в Минюсте России 20 августа 2013 г. N 29596 URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-210401-02-montazhnik-radioelektronnoy-apparatury-i-priborov-882> (дата обращения 07.06.2022).

---

Зенова Александра Анатольевна,  
Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского,  
1 курс магистратуры, Физический факультет,  
644077, Омск, пр. Мира 55-А, +79236941647,  
[zenovaa0499@mail.ru](mailto:zenovaa0499@mail.ru)

## Корреляция творческого потенциала и успеваемости студентов при обучении физике

Е. А. Лапенко

Научный руководитель: д.п.н., доц. М.П. Ланкина

**Аннотация.** В работе изучен вопрос о корреляции показателей творческого потенциала и средним баллом успеваемости по общей физике студентов первого курса физического факультета.

**Ключевые слова:** творческий потенциал, успеваемость, корреляция.

Радикальные изменения в научно-технической, экономической, культурной и социальной сферах жизни общества актуализировали потребность в профессионалах, ориентированных на инновационную созидательную деятельность, на саморазвитие и самосовершенствование. Поэтому одной из актуальных задач высшей школы является развитие творческих способностей студента. Человек с высокоразвитыми творческими способностями успешен не только в своей учебной деятельности, но и в реализации намеченных профессиональных задач, продуктивном взаимодействии с окружающими его людьми. Одним из ключевых понятий психологии творчества является «творческий потенциал».

Творческий потенциал проявляется в процессе профессиональной подготовки на практических занятиях, как отказ от абсолютизации истины, догматизма и стереотипизации, осознание невозможности «завершенного» знания; способность человека целенаправленно управлять своей умственной деятельностью, овладевать способами грамотного анализа ситуаций, стремление продолжать образование на последующей ступени, желание студента развивать в себе способности к самообразованию, самопознанию и самоопределению, к осмысленной самооценке обучающегося и самоанализу эффективности своего саморазвития.

Федеральные государственные образовательные стандарты по физическим направлениям требуют формирования

у обучающихся системного и критического мышления; умения осуществлять межкультурное взаимодействие; способностей к самоорганизации и саморазвитию; креативности как совокупности творческих способностей. Поскольку творческие способности развиваются на основе интеллектуальных, то можно предположить, что наличие творческих способностей может положительно влиять на умение понимать физические явления, фундаментальные законы, объясняющие эти явления, на умение мыслить, и, следовательно, на успеваемость обучающихся при изучении физики.

Целью нашего исследования является анализ творческого потенциала и его влияние на успеваемость студентов 1 курса ОмГУ по физике.

В нашем исследовании принимали участие две группы испытуемых, студенты 1 курса бакалавриата физического факультета ОмГУ. Группу «А» составили студенты групп ФФБ-101-О-01, ФРБ-101-О-01, ФПБ-101-О-01 в суммарной численности 10 человек. Группу «В» составили 17 студентов группы ФББ-101-О-0.

По данным методик «Диагностика личностной креативности» Туник Е.Е. [4] и «Оценка уровня творческого потенциала самоизменений личности» авторов Манукяна В.Р., Муртазиной И.Р., Гришиной Н.В. [2] студенты групп «А» и «В» имеют в среднем одинаковый уровень творческого потенциала. Вычисления проводились с использованием углового преобразования Фишера [3].

Качественно проанализировав ключевые факторы двух упомянутых выше методик с помощью Т-критерия Стьюдента [3] мы пришли к следующим результатам:

1. Выраженность признака «склонность к риску» в группе «В» значимо выше по сравнению с группой «А» ( $T=-0,781$ , при  $p \leq 0,05$ );
2. Студенты группы «В» более любознательны, чем студенты группы «А» ( $T=-0,381$ , при  $p \leq 0,05$ );
3. Студенты группы «В» в большей степени способны к решению сложных задач, чем студенты группы «А» ( $T=-0,257$ , при  $p \leq 0,05$ );
4. Выраженность признака «потребность в самоизменениях» в группе «А» значимо выше, чем в группе «В» ( $T=0,14$ , при

$p \leq 0,05$ ); 5. Выраженность признака «способность к осозанным самоизменениям» в группе «А» значимо выше, чем в группе «В» ( $T=0,23$ , при  $p \leq 0,05$ ); 6. У студентов группы «А» показатель «возможность к самоизменениям» значимо выше, чем у студентов группы «В» ( $T=0,951$ , при  $p \leq 0,05$ ).

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что показатель личностной креативности выше у студентов группы «В», а показатель потенциала самоизменений выше у студентов группы «А».

Взаимодействие между творческим потенциалом студентов и успеваемостью, средней отметкой обучающихся по механике (за I семестр) и молекулярной физике (за II семестр) мы исследовали с помощью коэффициента корреляции Пирсона.[1]. Полученное значение коэффициента корреляции  $R = -0,17$  свидетельствует о наличии линейной отрицательной связи, мы можем полагать, что чем выше показатель творческого потенциала студента-физика, тем ниже его успеваемость. Эта гипотеза подтверждена с помощью коэффициента Спирмена в программе «SPSS», прямой связи между творческим потенциалом и успеваемостью студентов при обучении физике не обнаружено.

При этом можно утверждать, что успеваемость студентов I курса, обучающихся на физическом факультете, коррелирует с баллами вступительных испытаний, полученными на ЕГЭ по предметам (математика, русский язык, физика/информатика/биология). Сумма баллов ЕГЭ является одним из значимых признаков, влияющих на средний балл успеваемости студентов I курса в вузе. Коэффициент корреляции суммы баллов ЕГЭ и успеваемости студентов  $R=0,2$ . Между переменными существует связь. Наблюдается слабая корреляция, переменные коррелируют положительно. Слабую корреляцию можно характеризовать не учтенными (случайными) факторами, например, такими как социально-бытовые факторы, трудовая занятость студентов в период обучения, зависимость успеваемости от стилей организации процесса обучения.

Отсутствие корреляции между творческим потенциалом студентов и успеваемостью по общей физике можно объяснить.

Высокая успеваемость по физике достигается при верном понимании физической сущности рассматриваемых явлений и закономерностей, законов и теорий; правильном определении физических величин, их единиц и способов измерения; правильном построении графиков, умении применять полученные знания при выполнении практических заданий, способности установить связи между изучаемым и ранее изученным материалом по курсу физики, а также при сформированности универсальных учебных действий. Для получения высокой отметки студенту достаточно усвоить материал на алгоритмическом, частично на эвристическом уровне.

Следует предположить, что творческий потенциал у студентов-физиков будет иметь влияние на проектную деятельность студентов, научно-исследовательскую работу, написание и представление в виде презентации результатов курсовых работ. Но в данном исследовании эти закономерности не изучались.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Выбор метода вычисления коэффициента корреляции [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://statpsy.ru/correlation/analyse/> (дата обращения: 01.06.2022)
- [2] Манукян В.Р., Муртазина И.Р., Гришина Н.В. Опросник для диагностики самоизменений личности// Консультативная психология и психотерапия. Санкт-Петербург, 2020. с. 35-58.
- [3] Сидоренко Е.В. Методы математической обработки в психологии – СПб.: Речь, 1996. 349 с.
- [4] Туник Е.Е. Диагностика креативности. Тест Е. Торренса. Адаптированный вариант / Е.Е. Туник. Санкт-Петербург, 2006. 176 с.

---

Лапенко Екатерина Александровна,  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
2 курс магистратуры, физический факультет,  
644077, Омск-77, пр. Мира 55 А, (3812)647787,  
[lapenkoea@mail.ru](mailto:lapenkoea@mail.ru)

Издается в соответствии с оригиналом,  
предоставленным организационным комитетом  
конференции.

Дата выпуска: 01.07.2022  
Тираж 13 копий. Объем 4,5 Мб.

*Издательство  
Омского государственного университета  
им. Ф.М. Достоевского  
644077, г. Омск, пр. Мира, 55а  
тел.: 8 (3812) 67-32-55, 64-30-61, 64-13-07*