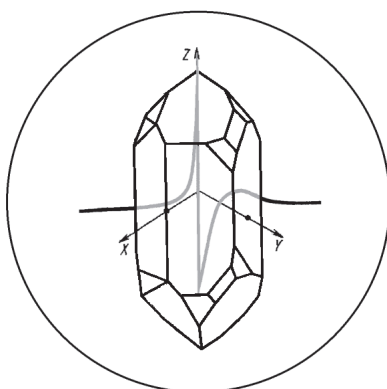


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Материалы Международной научно-технической
конференции «INTERMATIC – 2013»
2 – 6 декабря 2013 г., Москва

Под редакцией
академика РАН А.С. Сизова

Часть 1

Москва – 2013

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Материалы Международной научно-технической
конференции «INTERMATIC – 2013»
2–6 декабря 2013 г., Москва

Под редакцией
академика РАН А.С. Сизова

Часть 1

**FUNDAMENTAL PROBLEMS
OF RADIOENGINEERING AND DEVICE
CONSTRUCTION**

Proceedings of the International Scientific and
Technical Conference «INTERMATIC – 2013»
December 2–6, 2013, Moscow

Edited by A. Sigov

Part 1

Москва - 2013

УДК 539.1: 621.315.5: 621.382:

Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC–2013», 2–6 декабря 2013 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2013, часть 1. – 232 с.

ISBN 978-5-2830-3350-1

В настоящий сборник включены материалы Международной НТК «INTERMATIC–2013», отражающие новые результаты научных и инженерных исследований в области прикладной физики твердого тела, наноструктур и физической электроники.

Сборник рассчитан на специалистов в области физической радиоэлектроники. Он также может быть использован преподавателями, аспирантами и студентами при изучении соответствующих курсов.

В настоящий сборник также включены соответствующие теме материалы V Всероссийской научно-технической школы-конференции молодых ученых «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения – 2013», 3–6 декабря 2013 г., Москва.

Выполнено при финансовой поддержке РФФИ

Редакционная коллегия:

Ю.В. Гуляев (председатель), А.С. Аджемов, К.А. Воротилов,
П.А. Лучников, И.В. Соловьев, С.А. Никитов, В.Г. Орлов,
А.С. Сигов (ответственный редактор)

Научное издание

Редактор – *А.П. Лучников*
Компьютерная верстка – *Д.С. Серегин*

ОАО издательство «Энергоатомиздат», 107031, Москва, ул. Рождественка, 5/7

Подписано в печать с оригинал-макета 26.11.2013 г.
Формат 84x108/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 26,80. Уч.изд. л. 25,52.
Тираж 150 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Галлея-Принт»

ISBN 978-5-2830-3350-1

© Энергоатомиздат,
МГТУ МИРЭА,
ИРЭ РАН,
2013

⋮

,

⋮

• •

«

»

«

»

«

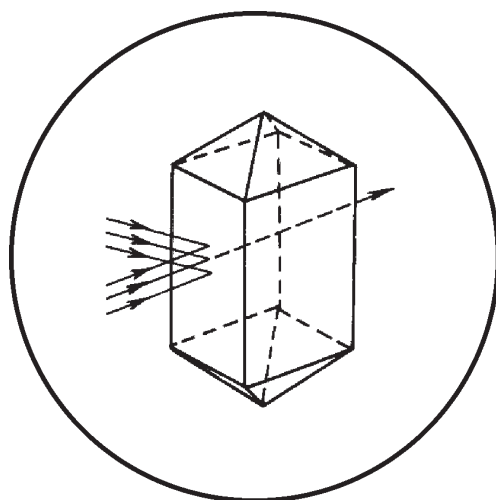
»

О Р Г К О М И Т Е Т

Гуляев Ю.В.	- (Россия) - председатель
Сигов А.С.	- (Россия) - зам. председателя
Аджемов А.С.	- (Россия) - зам. председателя
Лучников П.А.	- (Россия) - ученый секретарь
Балыхин Г.А.	- (Россия)
Бержанский В.Н.	- (Украина)
Ибраев Н.Х.	- (Казахстан)
Камильджанов Б.И.	- (Узбекистан)
Кудж С.А.	- (Россия)
Перно Ф.	- (Франция)
Рогачев А.В.	- (Беларусь)
Скотт Дж.	- (Великобритания)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Никитов С.А.	— председатель,
Орлов В.Г.	— ученый секретарь,
Безруков В.Н.,	Воротилов К.А.,
Есаулов Н.П.,	Мальцев П.П.,
Крашенинников А.И.,	Лось В.П.,
Морозов А.И.,	Нефедов В.И.,
Ивашов Е.Н.,	Пронин И.П.,
Резниченко Л.А.,	Санников В.Г.,
Сидорин В.В.,	Соколов В.В.,
Соловьев И.В.,	Суржииков А.П.,
Фетисов Ю.К.,	Шаврин С.С.



Прикладная физика и наноструктуры

СОДЕРЖАНИЕ

Прикладная физика и наноструктуры	5
1. Алтунин К.К. Усиленное оптическое пропускание в композитных слоях из металл-полимерных наноматериалов	7
2. Чепкасов И.В., Гафнер Ю.Я. Анализ процессов объединения кластеров меди при синтезе методом конденсации	11
3. Овчинников Е.В., Чекан Н.М., Акула И.П., Эйсымонт Е.И. Наноконпозиционные покрытия, формируемые на базе соединений AlTiN	15
4. Пронин И.П., Сырников П.П., Зайцева Н.В., Каптелов Е.Ю., Сенкевич С.В., Кастро Р., Леманов В.В. Структура и физические свойства монокристаллов твердых растворов $\text{Na}_{1/2}\text{V}_{1/2}\text{TiO}_3\text{-KTaO}_3$	19
5. Масальский Н.В. Не масштабируемые характеристики КНИ КМОП нанотранзисторов с высокой диэлектрической проницаемостью подзатворного окисла	24
6. Завгородняя М.И., Лавров И.В. Влияние текстуры и случайности формы на оптические характеристики композитов с серебряными включениями	28
7. Таргонский А.В., Благоев А.Е., Писаревский Ю.В., Просеков П.А., Элиович Я.А., Ковальчук М.В. Рентгеноакустическая дифрактометрия для контроля электронных компонент и материалов	32
8. Гамалеев В.А., Гусев Е.Ю., Михно А.С., Ерошина Ю.Ю. Синтез и характеристика нанокристаллических пленок ZnO, полученных методом реактивного магнетронного распыления	36
9. Лебо И.Г., Симаков А.И. Решение двумерного уравнения конвекции-диффузии применительно к задаче о теплообмене вблизи электронных устройств	40
10. Лавров И.В. Произвольно ориентированный диэлектрический эллипсоид в анизотропной среде: метод неортогонального преобразования пространства	44
11. Овчинников Е.В., Лиопо В.А. Некристаллические эпитаксиальные пленки	48
12. Башкатов И.П., Киселев Г.Л. Возбуждение колебаний электромагнитных полей	54
13. Апарин Ю.Я., Гринь Ю.И., Липатов В.Н., Пустовит Б.И., Сорокин Ю.В. Экспериментальные эффекты, сопровождающие разрушение льда мощным лазерным излучением волоконного лазера	58
14. Сорокин Ю.В. Элементы волоконного лазера на фотонных кристаллах	62
15. Алтунин К.К. Эффект ближнего поля в композитных наноструктурных плёнках в поле оптического излучения	65

16. Алтунин К.К. Огибание светом поверхностей наноструктурных метаматериалов с квазиединичными, квазиулевыми и нулевыми показателями преломления	71
17. Алтунин К.К. Гигантское усиление света в атомных кластерах и нанокластерах во внешнем поле лазерного излучения	75
18. Осадчий А.В., Рыбковский Д.В. Исследование электронных свойств нанополос графена, окруженных одностенными углеродными нанотрубками	82
19. Гафнер Ю.Я., Головенько Ж.В., Гафнер С.Л. Применение метода МД при изучении структурообразования нанокластеров золота	85
20. Замулин И.С., Гафнер С.Л., Редель Л.В., Гафнер Ю.Я. Влияние водорода на величину теплоёмкости в наноструктурированном палладии	88
21. Байдышев В.С., Гафнер Ю.Я. Исследование структурных особенностей малых кластеров алюминия методом молекулярной динамики	92
22. Гареев К.Г., Кононова И.Е., Мошников В.А. Синтез и исследование коллоидных растворов наночастиц магнетита	95
23. Лученко А.И., Мельниченко Н.Н., Свеженцова К.В. Морфология поверхности и химический состав пленок наноструктурированного кремния	100
24. Перевозчикова Ю.А., Чупина А.О., Ашрафзянов И.Ф., Бунтов Е.А., Зацепин А.Ф. Ультразвуковые исследования упругих характеристик нанокерамики на основе Al_2O_3	104
25. Рычков А.А., Иванов В.А., Кузнецов А.Е. Полимерные электретные материалы с наноразмерными модифицирующими добавками на поверхности	107
26. Логинов В.В. Спектрально-энергетические характеристики излучения импульсного разряда в парах калия, рубидия и цезия	111
27. Зубреева А.А. Комплексное исследование формирования нано- и микроразмерных структур в кристалле ниобата лития $LiNbO_3$ и физическая модель «термооптического» эффекта	115
28. Комаров Н.В., Сергеева О.Н., Богомолов А.А., Пронин И.П. Электрический отклик структуры Pt/AlN/SiC/Si на воздействие светового потока прямоугольной формы	117
29. Найданова В.А., Удодов В.Н. Математическое моделирование одномерной диффузии в рамках теории перколяции	121
30. Клюев А.В. Источники низкочастотных шумов в наноразмерных светоизлучающих структурах на основе GaAs	124
31. Антонов А.В. Модель спин-поляризованного транспорта в гетероструктурах $CdIn_2S_4/HgCr_2Se_4$ и $CdIn_2S_4/CdCr_2Se_4$	128
32. Соколов Д.Н., Сдобняков Н.Ю., Колосов А.Ю., Новожилов Н.В. О проблеме технологического использования наночастиц металлов при изменении температуры	131

33. Ермилов А.И., Ивашов Е.Н. Моделирование процессов формирования наномасштабных объектов	136
34. Крутов В.В., Сигоев А.С., Щука А.А., Косинов А.А. Технологические параметры формирования сегнетоэлектрических микро- и нанодоменных структур акустоинтерференционным методом	139
35. Миловидова С.Д., Рогазинская О.В., Сидоркин А.С., Нгуен Хоай Тхыонг, Максимова Е.И., Воротников Е.В. Свойства композитов на основе наноцеллюлозы с триглицидсульфатом	143
36. Барabanов А.В., Попов Р.А. Самоорганизующиеся системы и нанотехнологии	146
37. Никифоров Д.К., Коржавый А.П., Никифоров К.Г. Моделирование катодного распыления нанослоев оксида бериллия в условиях газового разряда	151
38. Абрашова Е.В., Мошников В.А. Исследование влияния введения соединений Си на свойства прозрачных проводящих пленок на основе ZnO-SnO ₂ -SiO ₂ , полученных методом золь-гель	154
39. Рындин Е.А., Исаева А.С. Показатель эффективности реконструкции изображений дефектов	156
40. Сергеев Д.М., Шункеев К.Ш. Динамический хаос в джозефсоновских контактах с ангармонической ток-фазовой зависимостью	159
41. Аванесян В.Т., Водкайло Е.Г., Потачев С.А. Перенос заряда в тонкопленочных полимерных структурах на основе комплекса Си(II) с азометиновым основанием	163
42. Шабунина Е.В., Шабунин М.Е., Удодов В.Н. Стабильность фаз одномерного изинговского наномангнетика	166
43. Вальднер В.О., Гамов Н.А., Зверев М.М., Кудрявцев А.С., Студенов В.Б. Импульсный плазменный источник электронов для накачки полупроводниковых лазеров	169
44. Лебо А.И., Лебо И.Г. О возможности диагностики спонтанных магнитных полей в турбулентной лазерной плазме	173
45. Лебо А.И. «LP – лазерная плазма» - программа для определения параметров плазмы	177
46. Каменщиков М.В., Солнышкин А.В., Богомолов А.А., Пронин И.П. Влияние условий формирования перовскитовой фазы на электрофизические свойства тонкопленочных гетероструктур Pt/PZT/Pt/TiO ₂ /SiO ₂ /Si	181
47. Жигалина В.Г., Жигалина О.М., Майорова Н.А., Хазова О.А., Хмеленин Д.Н. Электронно-микроскопическое исследование формирования структур типа «ядро-оболочка» для каталитических систем	185
48. Шайхутдинова М.Ш. Анализ способов определения границы раздела жидкостей нефть-вода в резервуарах сырой и товарной нефти	189

49. Щаврук Н.В. Сравнение микроэлектромеханических переключателей для коммутации СВЧ сигнала	191
50. Щаврук Н.В. Узкополосный СВЧ переключатель на подложке GaAs для частотного диапазона 10-12 ГГц на основе микроэлектромеханических систем ...	198
51. Войцеховский А.В., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Несмелов С.Н. Инфракрасные детекторы с квантовыми точками Ge/Si	204
52. Войцеховский А.В., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Несмелов С.Н. Неохлаждаемые микроболометры на основе поликристаллического SiGe для инфракрасного диапазона	212
53. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Коханенко А.П., Коротяев А.Г., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А. Влияние облучения на характеристики HgCdTe ИК фотодетекторов	222



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2013 г. А.И. ЕРМИЛОВ, Е.Н.ИВАШОВ

Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ
e-mail: Ploskogubez@rambler.ru

Наномасштабные объекты (НМО), а также структуры на их основе, обладают свойствами, существенно отличающимися от свойств объемных материалов той же структуры и состава. Эти частицы до сих пор остаются «молодым» объектом исследования, и их широкие перспективы использования очевидны. Их применяют во многих отраслях, где широко применяются современные полупроводники (в сфере изготовления солнечных батарей высокой производительности, фотодетекторов и тд.). На данный момент существует несколько способов производства НМО, имеющих свои преимущества и недостатки.

Математическая модель НМО

Через I обозначим множество методов формирования наномасштабных объектов. Через J – множество характеристик этих методов.

Таблицу, содержащую результаты измерений различных характеристик рассматриваемых методов обозначим $X_{IJ} = \{x_{ij}; i \in I; j \in J\}$, где x_{ij} - измерение i -й характеристики на элементе $i \in I$. Все измерения проводятся в одной и той же системе единиц. Через \bar{x}_j обозначим среднее значение характеристики i на элементах множества I , а через σ_i^2 – дисперсию этой характеристики на I . Указанные величины образуют векторы $\bar{x}_j = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_{|J|})$ и $\sigma_j = (\sigma_1, \dots, \sigma_{|J|})$.

Обозначим через $N_j(I)$ облако центрированных нормированных значений:

$$N_j(I) = \{i \in J; X_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_i; m_i = 1 / |I|\},$$

а через $N_j^*(I)$ – облако исходных данных:

$$N_j^*(I) = \{i \in I; x_{ij}; m_i = 1 / |I|\}.$$

В качестве расстояния рассмотрим обычное евклидово расстояние – в облаке $N_j(I)$:

$$d_{*j}^2(i, i') = \|i - i'\|^2 = \sum_{i \in J} (X_{ij} - X_{i'j})^2 = \sum_{i \in J} (x_{ij} - x_{i'j})^2 / \sigma_i^2.$$

и с использованием диагональной матричной нормы – в облаке $N_j^*(I)$:

$$d_{*j}^2(i, i') = \|i - i'\|_{\sigma_j}^2 = \sum_{i \in J} (x_{ij} - x_{i'j})^2 / \sigma_i^2$$

Центры тяжести облаков $N_j(I)$ и $N_j^*(I)$ выражаются формулами:

$$G(N_j(I)) = 0_j, \quad G(N_j^*(I)) = \bar{x}_j.$$

Момент инерции облаков $N_j(I)$ и $N_j^*(I)$ задается равенствами

$$M^2(N_j(I)) = \sum_{i \in I} m_i \|i - g\|^2 = \sum_{i \in I} m_i X_{ij}^2 = M^2(N_j^*(I)) = T_r(\Sigma) = |J|,$$

где Σ - матрица корреляций между переменными.

Для разбиения Q с классами q численности n_q и центрами тяжести $X_{qj} = \{X_{qj}\}$, где

$$X_{qj} = \frac{1}{n_q} \sum_{i \in q} (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_j = \frac{1}{n_q} \sum_{i \in q} \frac{x_{ij}}{\sigma_j} - \frac{x_j}{\sigma_j} = (x_{qj} - x_j) / \sigma_j.$$

справедливы равенства:

$$g(N_J(Q)) = 0_j = g(N_J(I)), \quad \rho^2(q) = \|q - g(I)\|^2 = \sum_{i \in J} X_{qi}^2;$$

$$M^2(N_J(Q)) = \sum_q m_q \|q - g(I)\|^2 = \sum_{q \in Q} \frac{n_q}{|I|} \sum_{i \in J} X_{qi}^2.$$

Сформируем теперь величины вкладов. Наибольший интерес представляют величины $\rho^2(q)$ и $X_{qj}^2 \operatorname{sgn}(X_{qj})$. Чтобы понять, является ли центральным вновь полученный класс q , следует сравнить величины $\rho^2(q)$, $q \in C(I)$, а чтобы узнать, является ли вклад признака j в расстояние от класса q до центра тяжести всего облака сильным или слабым, рассматривается величина X_{qj}^2 , а также знак разности $x_{qj} - \bar{x}_j$. Если величина $n_q X_{qj}^2$ большая, а знак $x_{qj} - \bar{x}_j$ положителен, то класс q дает сильный вклад в $M^2(N_J(I))$ из-за "ненормально" высокого уровня X_{qj} (или, при отрицательном знаке, из-за "ненормально" низкого уровня X_{qj}). Практически удобно рассматривать две таблицы: в одной записаны величины $X_{qj}^2 \operatorname{sgn}(x_{qj} - \bar{x}_j)$ для каждого узла q и каждого признака j , вторая содержит их относительные значения $X_{qj}^2 \operatorname{sgn}(x_{qj} - \bar{x}_j) / \rho^2(q)$ для каждого узла q и каждого признака j , вторая содержит их относительные значения $X_{qj}^2 \operatorname{sgn}(x_{qj} - \bar{x}_j) / \rho^2(q)$.

Как и при анализе соответствий, сначала вычисления производятся на основе использования центрального момента второго порядка разбиения σ_{mot} , но применение именно этого критерия вовсе не обязательно при вычислении вкладов. Для σ_{mot}

$$v(n) = m_a m_b / m_n \|a - b\|^2 = M^2\{a, b\},$$

$$M^2(N_J(I)) = \sum \{v(n); n \in N(C(I))\}.$$

Отсюда можно вычислить долю инерции узла n :

$$t(n) = v(n) / M^2(N_J(I)),$$

и долю инерции, учитываемую разбиением Q_n на уровне узла n :

$$t(Q_n) = M^2(N_J(Q_n)) / M^2(N_J(I)) = (v_{n+1} + \dots + v_{2|j|-1}) / M^2(N_J(I)).$$

Термодинамическая модель НМО

Данная модель позволяет предсказать ряд необычных свойств НМО.

Состояние НМО, которые образуются путём нуклеации в порах вещества (или в твердотельных реакциях), определяется свободной энергией $G = f(\alpha, \mu, R)$. Разность свободных энергий НМО в жидком и твердом состояниях составляет

$$\Delta G = 4\pi R^2 \Delta\alpha + \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \Delta\mu \quad (1)$$

где $\Delta\alpha = (\alpha_1 - \alpha_3)$ – разность поверхностных энергий, $\Delta\mu = (\Delta\mu_1 - \Delta\mu_3)$ – разность химических потенциалов для жидкого и твердого состояний НМО. При плавлении $\Delta\alpha < 0$, а $\Delta\mu > 0$.

Критический размер НМО, отвечающий переходу из твердого состояния в жидкое определяется по формуле:

$$R_{\text{cr}} = \frac{3\Delta\alpha}{\rho\Delta\mu} \quad (2)$$

При $R < R_{\text{cr}}$ НМО находится в жидком состоянии. Из уравнения (2) следует, что переходное состояние твердое тело – жидкость не может реализоваться для отдельных атомов в матрице (при $\Delta\alpha = 0$), когда кластер еще не образовался. В то же время величина $\Delta\alpha$ должна быть максимальной для свободного кластера. Любые межкла-

стерные взаимодействия будут приводить к уменьшению этой величины, а следовательно, и величины R_{cr} , определяющей область возможных флуктуаций твердого и жидкого состояний.

Стабильность НМО можно характеризовать соответствующим данной разности химического потенциала $\Delta\mu = f(p, T)$ изменением давления $\sigma p = p_0 - p$ или температуры $\sigma T = T_0 - T$, которое приводит фазы в равновесие при заданном размере НМО (p_0 - давление в среде и температура плавления массивного тела).

Если заменить функцию $\Delta\mu = f(p, T)$ ее разложением в ряд по σp в точке p_0 , то с учетом того, что $\partial\mu_1 / \partial p = V_1$, $\partial\mu_3 / \partial p = V_3$ (V_1 и V_3 - молекулярные объемы кластера в жидком и твердом состояниях) получим

$$\Delta\mu \approx - (V_1 - V_3) \sigma p \quad (3)$$

Воспользовавшись формулой Клапейрона – Клаузиуса

$$\frac{\partial p}{\partial T} = \frac{q}{T_0} \cdot (V_1 - V_3), \quad (4)$$

где q – скрытая теплота фазового перехода, получаем

$$\Delta\mu \approx -q \frac{\sigma T}{T_0} \quad (5)$$

Подстановка уравнения (5) в уравнение (2) дает гиперболическую зависимость изменения температуры фазового перехода в кластере от его радиуса

$$\frac{\sigma T}{T_0} \approx - \frac{3\Delta\alpha}{p\Delta\mu} \quad (6)$$

Зависимость (6) свидетельствует о понижении температуры плавления при уменьшении размера НМО. В итоге при заданной температуре и давлении среды исходно стабильная структура НМО ($\Delta\mu > 0$) становится метастабильной по отношению к жидкой фазе при $R < R_{cr}$. Понижение температуры плавления вплоть до комнатной с уменьшением размера НМО наблюдалось для нанокластеров золота, олова и др.

Кроме того, посредством электронной микроскопии было обнаружено разделение точек плавления и замерзания НМО для пленок олова. Также было найдено особое состояние твердое тело – жидкость, где НМО обладают повышенной подвижностью в промежуточной области температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия: Пер. с фр. – М.: Финансы и статистика, 1988. ISBN 5-279 – 00058-2. 342 с.: ил. – (Математико-статистические методы за рубежом). – Пер. изд.: Франция, 1978
2. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с. (Синергетика: от прошлого к будущему.) ISBN 5-484-00243-5
3. Ю.Д. Первицкий. Расчет и конструирование точных механизмов. – Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и переработ. Л., “Машиностроение” (Ленингр. отд-ние), 1976.
4. Расчёт и конструирование деталей аппаратуры САУ: Учебник для техникумов/ В.П. Савостьянов, Г. А. Филатова, В. В. Филатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 328 с., ил.
5. Патент РФ на полезную модель № 100765. Опубликовано 27.12.2010 г. Заявка № 2010119549 от 17.05.2010 г.