



## Секция 1

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 548.12

*В.В. Бубжик*

## ТОЧЕЧНЫЕ ГРУППЫ НЕКРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ

Проведена классификация точечных групп пента-, окта-, дека- и додекагональной симметрии обобщенных кристаллических решеток в трехмерном евклидовом пространстве. Определены сингонии для этих симметрий.

Конечные подгруппы полной линейной группы  $GL_3(\mathbf{Z})$  широко используются в кристаллографии для описания точечной симметрии кристаллов. Всего насчитывается 32 геометрических класса точечных групп в трехмерном евклидовом пространстве [1]. Возможные порядки осей симметрии кристаллических решеток – 1, 2, 3, 4 и 6. Однако, в 1982 – 1984 гг. были открыты вещества, названные квазикристаллами, на дифрактограммах которых расположение рефлексов соответствует пентагональной симметрии [2]. Поэтому их структура не может быть описана вышеупомянутыми группами и возникает необходимость рассмотреть полные линейные группы над некоторыми расширениями множества целых чисел  $\mathbf{Z}$ .

Многочлены деления круга, определяющие пента-, дека-, окта- и додекагональную симметрию, имеют четвертую степень [3]:

$$\Phi_5(\lambda) = \lambda^4 + \lambda^3 + \lambda^2 + \lambda + 1, \quad \Phi_{10}(\lambda) = \lambda^4 - \lambda^3 + \lambda^2 - \lambda + 1,$$

$$\Phi_8(\lambda) = \lambda^4 + 1, \quad \Phi_{12}(\lambda) = \lambda^4 - \lambda^2 + 1.$$

Следовательно, обычные кристаллические решетки могут иметь такую симметрию только в евклидовых пространствах с размерностями

4 и выше. Однако данные многочлены раскладываются на множители над множествами чисел  $\mathbf{Z}[\tau]$ ,  $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$  или  $\mathbf{Z}[\sqrt{3}]$ , соответственно:

$$\begin{aligned}\Phi_5(\lambda) &= (\lambda^2 + \tau\lambda + 1)(\lambda^2 + (1-\tau)\lambda + 1), \\ \Phi_{10}(\lambda) &= (\lambda^2 - \tau\lambda + 1)(\lambda^2 + (\tau-1)\lambda + 1), \\ \Phi_8(\lambda) &= (\lambda^2 - \lambda\sqrt{2} + 1)(\lambda^2 + \lambda\sqrt{2} + 1), \\ \Phi_{12}(\lambda) &= (\lambda^2 - \lambda\sqrt{3} + 1)(\lambda^2 + \lambda\sqrt{3} + 1),\end{aligned}\quad (1)$$

здесь  $\tau = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$  – «золотое отношение». В связи с этим, мы обобщим

понятие кристаллографической решетки, так, чтобы координаты точек в кристаллографическом базисе являлись числами одного из множеств  $\mathbf{Z}[\tau]$ ,  $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$ ,  $\mathbf{Z}[\sqrt{3}]$ . Такие решетки могут иметь пента-, дека-, окта- или додекагональную симметрию уже в двумерном евклидовом пространстве. В частности, двумерные обобщенные решетки с пента- или декагональной симметрией известны как сетки Пенроуза [4].

Для «некристаллографической» симметрии трехмерных обобщенных решеток множители (1) следует умножить на  $\Phi_1(\lambda) = \lambda - 1$  или  $\Phi_2(\lambda) = \lambda + 1$ , чтобы степень многочленов оказалась равной размерности пространства. Матрицы Грама трехмерных обобщенных решеток с пента- и декагональной симметрией определяются формулами:

$$G(u, v) = \begin{pmatrix} 2u + v & (v - u) + u\tau & v - u\tau \\ (v - u) + u\tau & 2u + v & (v - u) + u\tau \\ v - u\tau & (v - u) + u\tau & 2u + v \end{pmatrix}, \quad u > 0, \quad v > 0, \quad (2)$$

$$G(u, v) = \begin{pmatrix} v & 0 & 0 \\ 0 & 2u & u(\tau - 1) \\ 0 & u(\tau - 1) & 2u \end{pmatrix}, \quad u > 0, \quad v > 0; \quad (3)$$

матрицы Грама трехмерных обобщенных решеток с октагональной симметрией определяются формулами:

$$G(u, v) = \begin{pmatrix} v & 0 & 0 \\ 0 & 2u & u\sqrt{2} \\ 0 & u\sqrt{2} & 2u \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$G(u, v) = \begin{pmatrix} v+2u & v+u\sqrt{2} & v \\ v+u\sqrt{2} & v+2u & v+u\sqrt{2} \\ v & v+u\sqrt{2} & v+2u \end{pmatrix}, u > 0, v > 0$$

матрицы Грама трехмерных обобщенных решеток с додекагональной симметрией определяются формулой:

$$G(u, v) = \begin{pmatrix} v & 0 & 0 \\ 0 & 2u & u\sqrt{3} \\ 0 & u\sqrt{3} & 2u \end{pmatrix}, u > 0, v > 0. \quad (5)$$

Каждая решетка с матрицей Грама вида (2) имеет группу точечной симметрии по крайней мере порядка 20. Эта группа определяет инверсионную ось 10-го порядка и проходящую через нее плоскость. Поэтому, следуя международной кристаллографической символике [1], обозначим ее символом  $\bar{5}m$ . Группа  $\bar{5}m$  содержит следующие «некристаллографические» подгруппы:  $\bar{5}m$ ,  $5m$ ,  $52$ ,  $\bar{5}$ ,  $5$ , которые будем относить к пентагональной сингонии. Кроме того, в рассматриваемом множестве существует в точности две неэквивалентные решетки с группой точечной симметрии порядка 120, их матрицы Грама получаются по формуле (2) при  $u = \frac{2+\tau}{5}$ ,  $v = \frac{6+8\tau}{5}$

и  $u = \frac{4+2\tau}{5}$ ,  $v = \frac{2+\tau}{5}$  соответственно:

$$\begin{pmatrix} 2+2\tau & 1+2\tau & 1+\tau \\ 1+2\tau & 2+2\tau & 1+2\tau \\ 1+\tau & 1+2\tau & 2+2\tau \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 2+\tau & \tau & -\tau \\ \tau & 2+\tau & \tau \\ -\tau & \tau & 2+\tau \end{pmatrix}.$$

Группу точечной симметрии этих решеток обозначим символом  $m\bar{5}m$ . Она является расширением группы  $\bar{5}m$  с индексом 6 и, кроме вышеперечисленных, содержит «некристаллографические» подгруппы  $m\bar{5}m$  и  $532$ , которые отнесем к икосаэдрической сингонии.

Группа точечной симметрии решеток с матрицами Грама вида (3) определяет ось 10-го порядка, а также проходящую и перпендикулярную плоскости по отношению к этой оси. Поэтому, обозначим ее символом  $10/mmm$ . Эта группа имеет порядок 40 и

содержит следующие «некристаллографические» подгруппы:  $10/mmm$ ,  $10mm$ ,  $10/m$ ,  $10.22$ ,  $\overline{10}m2$ ,  $\overline{10}$  и  $10$ , которые отнесем к декагональной сингонии. Решеток с более высокой симметрией в рассматриваемом множестве нет. Аналогично, решетки с матрицами Грама (4) имеют группу точечной симметрии  $8/mmm$ , а решетки с матрицами Грама вида (5) – группу точечной симметрии  $12/mmm$ .

#### *Список литературы*

1. Вайнштейн, Б.К. Современная кристаллография: в 4 т. / Б.К. Вайнштейн. – Том 1. Симметрия кристаллов. Методы структурной кристаллографии. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
2. Shechtman, D. Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry / D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, J.W. Cahn // Phys. Rev. Lett. – 1984. – Vol. 53. – № 12. – P. 1951-1953.
3. Ван дер Варден, Б.Л. Алгебра / Б.Л. Ван дер Варден; пер. с нем. А.А. Бельского; под ред. Ю.И. Мерзлякова. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 624 с.
4. Penrose, R. Role of aesthetics in pure and applied research / R. Penrose // Bull. Inst. Math. Appl. – 1974. – V. 10. – P. 266-271.

The point groups classification of generalized regular lattices with non crystallographic symmetry in three-dimensional Euclidean space is carried out. The singonizes of this symmetry for three-dimensional generalized lattices are determined.

*Бубжик Валерий Викторович*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [valera250587@mail.ru](mailto:valera250587@mail.ru).

Научный руководитель – *Сабуть Андрей Вацлавович*, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра теоретической физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [sabutz@grsu.by](mailto:sabutz@grsu.by).

УДК 530.1

*М.С. Букатин*

## **ФРАКТАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Фракталы находят все большее и большее применение в науке. Основная причина этого заключается в том, что они описывают реальный мир иногда даже лучше, чем традиционная физика или математика.

**Компьютерные системы.** Наиболее полезным использованием фракталов в компьютерной науке является фрактальное сжатие данных. В основе этого вида сжатия лежит тот факт, что реальный мир хорошо описывается фрактальной геометрией. При этом, картинки сжимаются гораздо лучше, чем это делается обычными методами (такими как jpeg или gif). Другое преимущество фрактального сжатия в том, что при увеличении картинки не наблюдается эффекта пикселизации (увеличения размеров точек до размеров, искажающих изображение). При фрактальном же сжатии, после увеличения, картинка часто выглядит даже лучше, чем до него.

**Механика жидкостей.** Изучение турбулентности в потоках очень хорошо подстраивается под фракталы. Турбулентные потоки хаотичны и поэтому их сложно точно смоделировать. И здесь помогает переход к фрактальному представлению, что сильно облегчает работу инженерам и физикам, позволяя им лучше понять динамику сложных

Изучение турбулентности в потоках очень хорошо подстраивается под фракталы. Турбулентные потоки хаотичны и поэтому их сложно точно смоделировать. И здесь помогает переход к фрактальному представлению, что сильно облегчает работу инженерам и физикам, позволяя им лучше понять динамику сложных потоков.

При помощи фракталов также можно смоделировать языки пламени.

Пористые материалы хорошо представляются в фрактальной форме в связи с тем, что они имеют очень сложную геометрию. Это используется в нефтяной науке.

**Телекоммуникации.** Для передачи данных на расстояния используются антенны, имеющие фрактальные формы, что сильно уменьшает их размеры и вес.

**Физика поверхностей.** Фракталы используются для описания кривизны поверхностей. Неровная поверхность характеризуется комбинацией из двух разных фракталов.

#### **Медицина.**

1. Биосенсорные взаимодействия.
2. Биения сердца.

**Биология.** Моделирование хаотических процессов, в частности при описании моделей популяций. «Фрактал – это множество точек, размерность Хаусдорфа-Безиковича которых не совпадает с их топологической размерностью» – это пробное определение фрактала,

данное основателем теории фракталов Мандельбротом, можете считать эпиграфом к данной модели, и не более.

Теория фракталов сегодня находит применение в физике, биологии, экономике, компьютерной графике. Методы теории фракталов позволяют генерировать разнообразные структуры, которые поразительным образом похожи на структуры, создаваемые природой. Исследуя свойства этих структур на модельных объектах, можно прогнозировать параметры реальных физических объектов.

**Решётка Серпинского.** Это один из фракталов, с которыми экспериментировал Мандельброт, когда разрабатывал концепции фрактальных размерностей и итераций. Треугольники, сформированные соединением средних точек большего треугольника, вырезаны из главного треугольника, образуя треугольник с большим количеством дырочек. В этом случае инициатор – большой треугольник, а шаблон – операция вырезания треугольников, подобных большому. Так же можно получить и трехмерную версию треугольника, используя обыкновенный тетраэдр и вырезая маленькие тетраэдры. Размерность такого фрактала  $\ln 3 / \ln 2 = 1.584962501$ .

Чтобы получить ковер Серпинского, возьмем квадрат, разделим его на девять квадратов, а средний вырежем. То же сделаем и с остальными, меньшими квадратами. В конце концов образуется плоская фрактальная сетка, не имеющая площади, но с бесконечными связями. В своей пространственной форме, губка Серпинского преобразуется в систему сквозных форм, в которой каждый сквозной элемент постоянно заменяется себе подобным. Эта структура очень похожа на разрез костной ткани. Когда-нибудь такие повторяющиеся структуры станут элементом строительных конструкций. Их статика и динамика, считает

Мандельброт, заслуживает пристального изучения.

**Ковер Серпинского.** Не надо путать этот фрактал с решеткой Серпинского. Это два абсолютно разных объекта. В этом фрактале, инициатор и генератор одинаковы. При каждой итерации, добавляется уменьшенная копия инициатора к каждому углу генератора и так далее. Если при создании этого фрактала произвести бесконечное

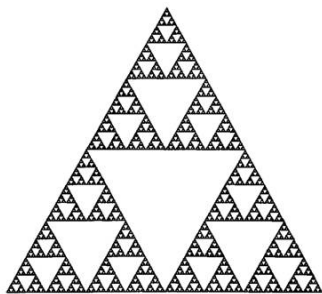


Рисунок 1 – Ковер Серпинского

число итераций, он бы занял всю плоскость, не оставив ни одной дырочки. Поэтому его фрактальная размерность  $\ln 9 / \ln 3 = 2.0$ .

**Кривая Коха.** Кривая Коха один из самых типичных детерминированных фракталов. Она была изобретена в девятнадцатом веке немецким математиком по имени Хельге фон Кох, который, изучая работы Георга Контора и Карла Вейерштрассе, натолкнулся на описания некоторых странных кривых с необычным поведением. Инициатор – прямая линия. Генератор – равносторонний треугольник, стороны которого равны трети длины большего отрезка. Эти треугольники добавляются к середине каждого сегмента снова и снова. В своем исследовании, Мандельброт много экспериментировал с кривыми Коха, и получил фигуры такие как Острова Коха, Кресты Коха, Снежинки Коха и даже трехмерные представления кривой Коха,

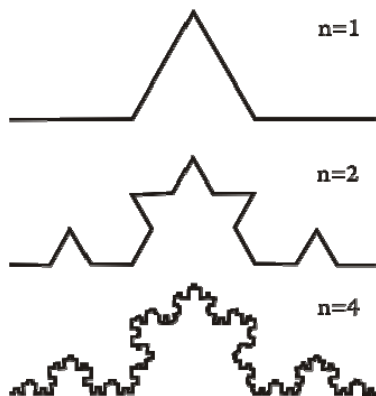


Рисунок 2 – Кривая Коха

используя тетраэдр и прибавляя меньшие по размерам тетраэдры к каждой его грани. Кривая Коха имеет размерность  $\ln 4 / \ln 3 = 1.261859507$ .

Различают геометрические, алгебраические и стохастические фракталы. В нашей модели мы рассмотрим геометрические и стохастические фракталы. Первые позволяют понять важнейшее свойство фрактальных объектов – самоподобие, а вторые – по способу генерации очень похожи на реальные физические объекты: деревья, кристаллы, природные

узоры. Чтобы понять суть теории фракталов надо обратиться к специальной литературе, мы же только скромно проиллюстрируем методы получения некоторых фрактальных структур.

На рис. 3 представлены геометрические структурные объекты. Мы можем дать им качественную характеристику: сложный, извилистый, распределенный, ветвистый и т.д. Если присмотреться, то такие же качественные характеристики применимы к структуре окружающих нас предметов. Можно ли каким-либо количественным параметром



охарактеризовать структуру этих объектов? Сначала рассмотрим, как такие объекты получаются.

Первый объект (кривая Коха) получен по следующим правилам. Отрезок  $(X_1Y_1)-(X_2Y_2)$  длиной  $l$  делится на три равные части ( $\delta = 1/3$ ). Центральная часть отрезка трансформируется в два отрезка поворотом на углы  $60^\circ$  и  $-60^\circ$  в точках деления отрезка. В результате получаем четыре новых отрезка, которые преобразуются аналогичным способом. И так до бесконечности.

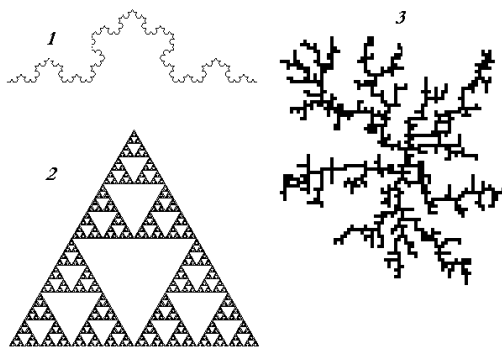


Рисунок 3 – Фракталы

Рассмотрим алгоритм построения второго объекта (ковер Серпинского). Стороны равностороннего треугольника делятся пополам и соединяются отрезками. Полученные 3 новых треугольника (центральный треугольник не рассматривается) преобразовываются аналогично. И так до бесконечности.

Третий объект построен по методу Виттена-Сандера. Рассматривается плоская сетка. В центральную ячейку помещается частица-затравка. Затем, на периферии области запускается другая частица, которая перемещается по ячейкам случайным образом – диффундирует. Если эта частица попадает в ячейку, имеющую общие грани с частицей-затравкой, то она к ней прилипает. Образовывается кластер. После этого запускается следующая частица и блуждает до тех пор, пока не прилипнет к кластеру. Подобные методы генерирования кластеров называются LDA-методы (Limited Diffusion Agregation – ограниченная диффузией агрегация).

*Список литературы*

1. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
2. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002.
3. Пайтген, Х.-О. Красота фракталов / Х.-О. Пайтген, П.Х. Рихтер. – М.: Мир, 1993.
4. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер – М: Мир, 1991.
5. Шредер, М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая / М. Шредер. – Ижевск: РХД, 2001.
6. Кроновер, Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории.
7. Фоменко А.Т. Наглядная геометрия и топология / А.Т. Фоменко. – М.: Изд-во МГУ, 1993.

Fractals find the increasing and the increasing application in a science. The principal cause of it consists that they describe the real world sometimes even better, than the traditional physics or mathematics.

*Букатин Михаил Сергеевич*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [bukish89@mail.ru](mailto:bukish89@mail.ru).

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой теоретической физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [nik@grsu.by](mailto:nik@grsu.by).

УДК 539.219.3

*В.А. Бурко*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФфуЗИИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ ПРИ ЭПИТАКСИИ И ТРАВЛЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ**

Показана возможность использования полученного ранее аналитического решения уравнения диффузии для расчета перераспределения ионно-имплантированной примеси при движении поверхности полупроводника в результате ее травления.

Одной из характерных черт современной микроэлектроники является использование различных слоистых структур типа  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Созданный полупроводниковый слой может быть легирован примесью либо в процессе эпитаксиального наращивания, либо методом ионной имплантации. Тогда в процессе наращивания очередного эпитаксиального слоя происходит диффузия примеси в этот растущий слой. Для моделирования этого процесса можно использовать уравнение диффузии примеси с постоянным коэффициентом диффузии  $D$  для новой функции  $\tilde{C}(x, t)$  в подвижной системе координат [1]

$$\tilde{C}_t = D\tilde{C}_{xx}'' \quad (1)$$

Аналитическое решение этого уравнения для случая перераспределения ионно-имплантированной примеси в процессе наращивания эпитаксиального слоя было получено в работе [2]. Полученное решение можно использовать и для моделирования процесса перераспределения ионно-имплантированной примеси при травлении поверхности полупроводника, если задать положительное направление скорости  $v_B$  движения этой поверхности.

Типичный пример расчета перераспределения примеси для большой скорости выращивания эпислоя представлен на рисунке 1. Пример расчета процесса перераспределения примеси при травлении поверхности кремния представлен на рис. 2.

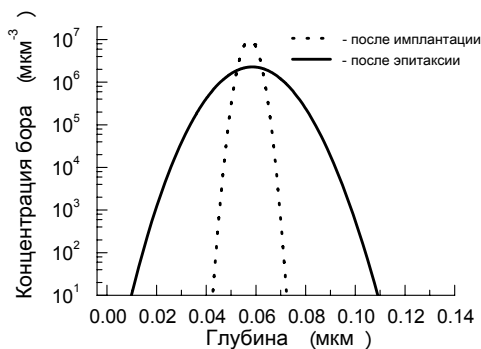
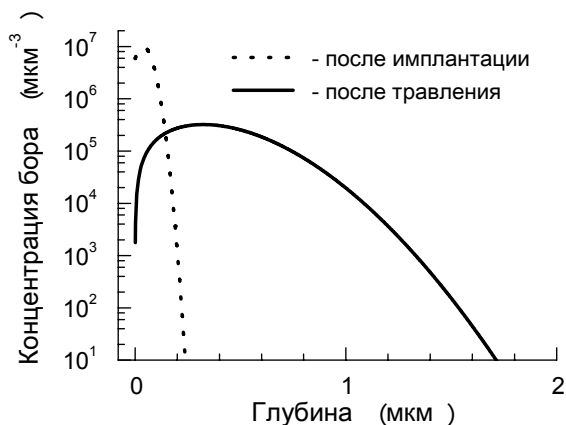


Рисунок 1 – Рассчитанный профиль имплантированного бора после эпитаксии с большой скоростью выращивания эпислоя

$$(v_B = -9 \cdot 10^{-5} \text{ мкс/с})$$



**Рисунок 2 – Рассчитанный профиль ионно-имплантируемого бора после травления со скоростью движения поверхности  $v_B = 1 \cdot 10^{-4}$  мкм / с**

Как видно из рис. 1, при большой скорости выращивания эпислой перераспределение ионно-имплантированного бора симметрично, то есть процесс эпитаксии предоставляет атомам бора возможность диффундировать влево в эпитаксиальную пленку за первоначальную границу полупроводниковой подложки.

Как известно, процесс плазменного травления сопровождается генерацией большого количества неравновесных точечных дефектов в приповерхностной области полупроводника. Поэтому, радиационно стимулированная диффузия примесных атомов, обусловленная этими неравновесными дефектами, может протекать при достаточно низких температурах подложки. Из рис. 2 видно, что имплантированный бором слой потерял существенную долю примеси в результате травления поверхности кремния и диффузии примесных атомов.

#### *Список литературы*

1. Бурко, В.А. Моделирование процессов диффузии примесных атомов при эпитаксиальном наращивании плёнки / В.А. Бурко // Физика конденсированного состояния: тез. докл. XIX респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 19-21 апреля 2011 г. / редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2011. – С.19-20.

2. Velichko, O.I. Modeling of ion-implanted atoms diffusion during the epitaxial growth of the layer / O.I. Velichko, V.A. Burko // Взаимодействие излучений с твердым телом. Interaction of Radiation with Solids: материалы 9-ой Междунар. конф., Минск, 20-22 сент. 2011 г. / редкол.: В.М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2011. – С. 291-293.

It has been shown that the analytical solution of the diffusion equation obtained in our previous paper can be used for simulation of ion-implanted impurity redistribution during the etching of the surface of a semiconductor.

*Бурко Вероника Андреевна*, студентка 3 курса факультета радиотехники и электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, veranika.burko@gmail.com.

Научный руководитель – *Величко Олег Иванович*, доктор физико-математических наук, доцент, кафедра физики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, velichkomail@gmail.com.

УДК 548.12

*С.В. Гордейчик*

## СЕТКИ ПЕНРОУЗА И ИХ АНАЛОГИ

Разработан алгоритм построения сеток Пенроуза и их аналогов с помощью отображения четырехмерных регулярных решеток на двумерную плоскость.

Кристаллические решетки в трехмерном евклидовом пространстве могут иметь элементы симметрии 1-го, 2-го, 3-го, 4-го и 6-го порядков. Однако в 1984 году были открыты вещества, названные квазикристаллами, структура которых обладает одновременно дальним упорядочением и пентагональной симметрией [1]. Поэтому, чтобы применить единый подход к описанию структуры как кристаллов, так и квазикристаллов, необходимо обобщить понятие кристаллической решетки.

В самом общем случае решеткой назовем аддитивную подгруппу, порожденную некоторым базисом векторного пространства над множеством чисел  $\mathbb{R}$ , замкнутым относительно операций сложения и умножения. Потребуем, чтобы решетка совмещалась сама с собой при повороте вокруг оси на угол  $72^\circ$ . Если  $N$  – матрица такого поворота,

то она порождает подгруппу 5-го порядка, т.е.  $N^5 = E$  – единичная матрица. Тогда характеристические числа матрицы  $N$  являются комплексными корнями 5-й степени из числа 1, а характеристический многочлен матрицы  $N$  должен иметь коэффициенты из множества  $\mathfrak{R}$ . Многочлены наименьшей степени, удовлетворяющие таким требованиям, следующие:  $\lambda^2 + (1 - \tau)\lambda + 1$  или  $\lambda^2 + \tau\lambda + 1$ , где

$$\tau = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \text{ – «золотое отношение»}. \text{ Степень этих многочленов равна 2, а}$$

коэффициенты имеют вид  $u + \tau v$ , где  $u$  и  $v$  – целые числа. Поэтому, уже в двумерном евклидовом пространстве можно построить структуры с дальним упорядочением и пентагональной симметрией. Такие структуры известны под названием сеток Пенроуза [2].

Фрагменты сеток Пенроуза можно получить отображением координатных сфер четырехмерной решетки корневых векторов  $A_4$  на двумерную плоскость. Алгоритм описан в предыдущей работе [3]. Здесь мы обобщим этот алгоритм, взяв вместо  $\tau$  другое иррациональное число  $\xi$ , являющееся корнем некоторого квадратного многочлена  $x^2 + \eta_1 x + \eta_2$  с целочисленными коэффициентами  $\eta_1$  и  $\eta_2$ . Тогда  $\mathfrak{R}$  – множество чисел вида  $u + \xi v$ , где  $u$  и  $v$  – произвольные целые.

Матрицу Грама базисных векторов двумерной обобщенной решетки запишем в виде  $G = F + \xi \cdot H$ , где  $F = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ ,  $H = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ . Тогда расстояние от узла  $(t_1, t_2)$  до начала координат определяется

квадратичной формой  $f(t_1, t_2) = \begin{pmatrix} t_1 & t_2 \end{pmatrix} \cdot G \cdot \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$ . Если

$f(t_1, t_2) = a + \xi \cdot b$ , где  $a, b$  – целые, то  $Z^T A Z = a$ ,  $Z^T B Z = b$ ; здесь обозначены матрицы  $Z = \begin{pmatrix} z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{pmatrix}^T$ , в которой  $t_1 = z_1 + \xi \cdot z_3$ ,

$$t_2 = z_2 + \xi \cdot z_4, \quad A = \begin{pmatrix} F & -\eta_2 H \\ -\eta_2 H & \eta_2 (\eta_1 H - F) \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} H & F - \eta_1 H \\ F - \eta_1 H & (\eta_1^2 - \eta_2) H - \eta_1 F \end{pmatrix}.$$

Матрица  $A$  – это матрица Грама четырехмерной целочисленной решетки. Координаты узлов этой решетки, находящиеся на координационной сфере радиуса  $R = \sqrt{a}$ , можно определить из уравнения  $Z^T A Z = a$  перебором в пределах  $|z_k| \leq \sqrt{\frac{a \cdot M_{kk}}{\det A}}$ ,  $k = \overline{1, 4}$ , где  $M_{kk}$  – минор соответствующего диагонального элемента матрицы  $A$ . Определим  $\xi$ -отображение четырехмерной решетки в двумерную обобщенную решетку: каждой точке  $(z_1, z_2, z_3, z_4)$  поставим в соответствие точку  $(t_1, t_2)$ , где  $t_1 = z_1 + \xi \cdot z_3$ ,  $t_2 = z_2 + \xi \cdot z_4$ . Будем последовательно строить на плоскости  $\xi$ -образы координационных сфер четырехмерной решетки, которые затем соединим отрезками и получим аналоги сеток Пенроуза. На рисунке изображен фрагмент сетки для  $\xi = \sqrt{2}$ . Эта сетка одновременно обладает дальней упорядоченностью и октагональной симметрией. Поскольку алгоритм построения сеток Пенроуза и их аналогов один и тот же, только использует различные иррациональные числа  $\xi$ , то мы можем сделать предположение о существовании квазикристаллов не только с пентагональной, но и октагональной симметрией.

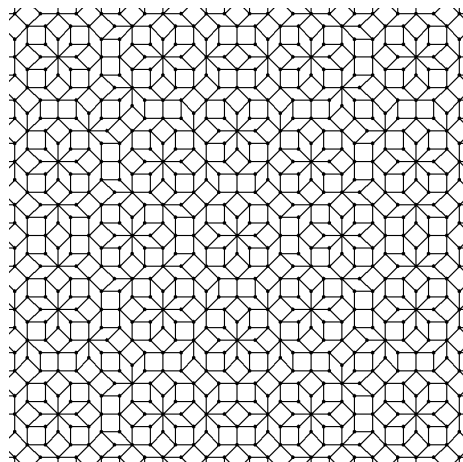


Рисунок – Аналог сетки Пенроуза, обладающий октагональной симметрией

*Список литературы*

1. Shechtman, D. Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry / D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, J.W. Cahn // Phys. Rev. Lett. – 1984. – Vol. 53. – № 12. – P. 1951-1953.
2. Penrose, R. Role of aesthetics in pure and applied research / R. Penrose // Bull. Inst. Math. Appl. – 1974. – V. 10. – P. 266-271.
3. Гордейчик, С.В. Алгоритм построения сеток Пенроуза // Физика конденсированного состояния: материалы XIX респ. науч. конф. аспирантов, магистров и студентов, Гродно, 19-20 апреля 2011 г.: / ГрГУ; ред.кол.: Е.А. Ровба [и др.]. – Гродно, 2011. – С. 26-28.

The algorithm of build-up of Penroses cells with the help of  $\tau$ -projections of four-dimension regular lattice of a  $A_4$ -system of rooted vectors designed.

*Гордейчик Сергей Валентинович*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, S\_G89@mail.ru.

Научный руководитель – *Сабуть Андрей Вацлавович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, sabutz@grsu.by.

УДК 530.1

*В.В. Гулецкий*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ «СЛУЧАЙНЫЕ БЛУЖДЕНИЯ»

Метод случайных блужданий находит широкое применение в задачах теоретической физики. Его приложения, базирующиеся исторически на броуновском движении, применимы для анализа широкого круга физических задач.

В 1825 году английский ботаник Р. Броун, рассматривая пыльцу некоторых растений в микроскоп, открыл **броуновское движение** – хаотическое движение микроскопических твердых частиц, взвешенных в жидкости. А в 1907 французский ученый Ж. Перрен был удостоен Нобелевской премии по физике за серию опытов по исследованию этого явления. В настоящее время с помощью школьного микроскопа можно наблюдать непрерывное движение частиц в жидкости. Часто хаотическое движение называют **случайными блужданиями**.



Будем считать, что частица движется в одной в плоскости, в которой зададим декартовую систему координат (рис. 1). Будем считать, что за малые (одинаковые) промежутки времени  $\Delta t$  частица смещается на одинаковое расстояние  $\lambda$ , но направление этого смещения каждый раз случайно изменяется, причем направление смещения равновероятно во всех направлениях. В этом приближении угол  $\phi$  между

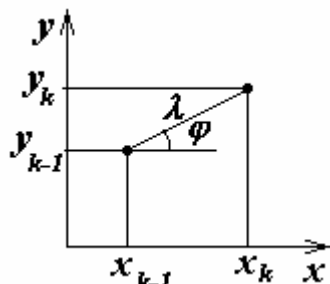


Рисунок 1 – Частица в декартовой системе координат

направлением очередного смещения и осью  $X$  следует рассматривать как случайную величину, равномерно распределенную в интервале  $[0, 2\pi]$ . Промоделировать значение этого угла можно с помощью генератора случайных чисел RND (обозначим значение случайной величины, равномерно распределенной в единичном интервале символом  $\xi$ ):

$$\phi = 2\pi\xi$$

Смещения частицы вдоль осей координат за один шаг определяются по формулам:

$$\Delta x = \lambda \cos \phi,$$

$$\Delta y = \lambda \sin \phi.$$

Выберем систему единиц, в которой  $\lambda = 1$ , кроме того, будем измерять время в единицах  $\Delta t$ . Будем считать, что в начальный момент времени частица находилась в начале системы координат. Теперь можно записать систему соотношений, описывающих случайное движение частицы в рамках сделанных приближений:

$$\phi_k = 2\pi\xi_k;$$

$$x_k = x_{k-1} + \cos \phi_k; \quad y_k = y_{k-1} + \sin \phi_k;$$

$$\text{при } t = 0 : x_0 = 0; \quad y_0 = 0,$$

где  $(x_k, y_k)$  – координаты частицы в момент времени  $t = k$ .

Строим траекторию, используя приведенные формулы. Получаем траектории, показанные на рис. 2. Найти в этих рисунках какую-нибудь закономерность невозможно просто потому, что ее там нет. Попытаемся найти закономерности, возникающие при рассмотрении движения множества частиц.

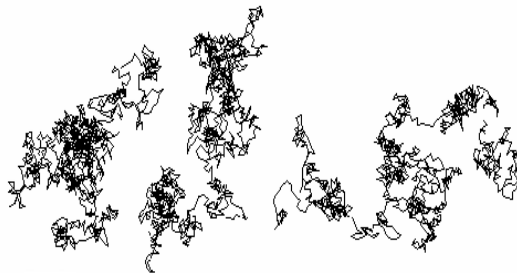


Рисунок 2 – Траектория движения частицы

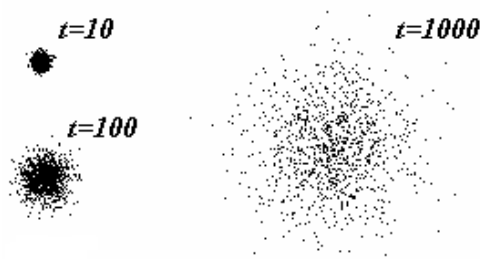


Рисунок 3 – Результат построения положений частиц

На рис. 3 показан результат такого построения положений частиц при  $N_{\max} = 2000$  для различных значений времени движения, при условии, что первоначально все частицы находились в начале координат и число шагов  $t = 10, 100, 1000$ . Полученный результат можно представить как результат диффузии  $N_{\max}$  частиц, первоначально находившихся в одной точке. Результат достаточно понятен – происходит распыление «облака» частиц. Рассмотрим закономерности, которым подчиняется размер области.

Мы видим, что размер области, занимаемой частицами, растет не пропорционально времени, а значительно медленнее. Поэтому в качестве характеристики размера области выберем квадрат смещения частицы.

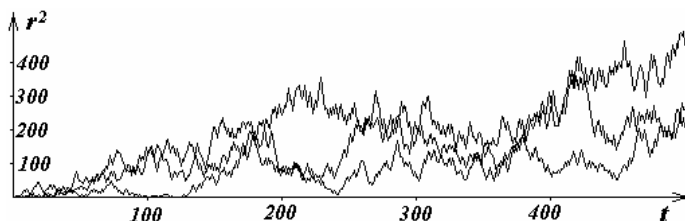


Рисунок 4 – Зависимость для трех реализаций случайного движения

Строгая закономерность в этих графиках не проявится – процесс то случайный.

Для усреднения удобно использовать рекуррентную формулу, для вычисления средних значений. Также имеет смысл рассмотреть дисперсии средних значений. Выпишем еще раз формулы для расчета средних и их дисперсий. После того как мы получили значения координат точки  $(x_{ki}, y_{ki})$  в момент времени  $t = k$  в  $i$ -й реализации необходимо:

- 1) произвести расчет квадрата смещения в данный момент времени

$$r_{ki}^2 = x_{ki}^2 + y_{ki}^2;$$

- 2) произвести пересчет значений средних и дисперсий:

$$\delta = r_{ki}^2 - Rm_k;$$

$$Rm_k := Rm_k + \frac{\delta}{i};$$

$$Sm_k := \frac{(i-1)}{i} \left( Sm_k + \frac{\delta^2}{i} \right);$$

где  $Rm_k$  – среднее значение квадрата перемещений в  $k$ -й момент времени;

- 3) после завершения всех  $N_{\max}$  реализаций пересчитать значения дисперсий на дисперсию среднего значения (напомним, что дисперсия среднего значения в  $\sqrt{N_{\max}}$  раз меньше дисперсии отдельных значений):

$$Sm_k := \frac{Sm_k}{\sqrt{N_{\max}}}$$

и построить график зависимости  $Rm_k$  от  $t_k$ . На этом графике разумно отразить полученную погрешность полученного значения среднего квадрата, которую можно положить равной удвоенному корню из соответствующей дисперсии. Полученные результаты для различного числа реализаций показаны на рис. 5.

Как показывают результаты моделирования, зависимость среднего квадрата смещения от времени является линейной, поэтому полученную зависимость можно обработать методом наименьших квадратов и найти коэффициенты зависимости

$$\langle r^2 \rangle = at + b.$$

На рис. 5 приведены значения рассчитанных коэффициентов. Мы можем наблюдать типичную картину: с увеличением числа реализаций полученная модельная зависимость становится все более строгой, приближаясь к функциональной при  $N_{\max} \rightarrow \infty$ . Таким образом, мы получили, что средний квадрат смещения частицы при случайных блужданиях пропорционален времени.

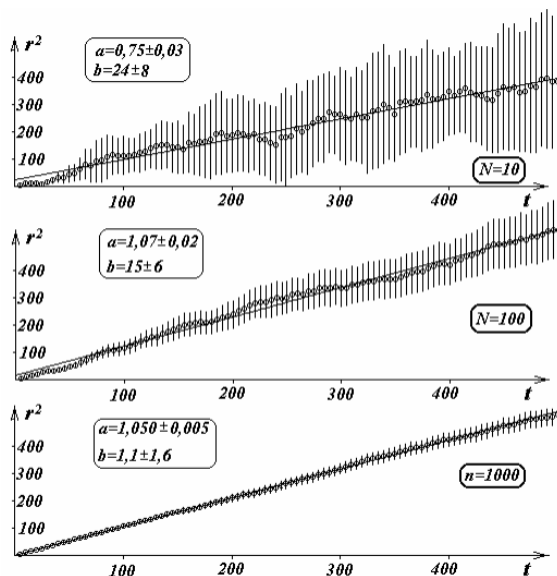


Рисунок 5 – Результаты для различного числа реализаций

Можно показать, что этот вывод справедлив и в других моделях, в частности, если смещение частицы на каждом шаге также является случайной величиной. Важно только, чтобы средние значения проекций смещения на оси координат были равны нулю.

Не будем кривить душой, мы заранее знали, что полученная зависимость будет линейной, что можно доказать и теоретически. Действительно, смещение частицы  $\vec{r}$  за  $t$  шагов можно представить в виде суммы

$$\vec{r} = \sum_{k=1}^t \Delta \vec{r}_k,$$

где  $\Delta \vec{r}_k$  – вектор смещения частицы на  $k$ -м шаге. Возведем эту величину в квадрат и усредним

$$\begin{aligned} \langle r^2 \rangle &= \left\langle \left( \sum_{k=1}^t \Delta \vec{r}_k \right)^2 \right\rangle = \left\langle \sum_{k=1}^t (\Delta \vec{r})^2 \right\rangle + \left\langle \sum_{k=1}^t \sum_{i \neq k} (\Delta \vec{r}_k) \cdot (\Delta \vec{r}_i) \right\rangle = \\ &= \sum_{k=1}^t \langle (\Delta \vec{r})^2 \rangle + \sum_{k=1}^t \sum_{i \neq k} \langle (\Delta \vec{r}_i) \cdot (\Delta \vec{r}_i) \rangle = t, \end{aligned}$$

где учтено, что на каждом шаге  $(\Delta \vec{r})^2 = 1$ , а среднее значение произведения векторов смещения на разных шагах  $\langle (\Delta \vec{r}_i) \cdot (\Delta \vec{r}_i) \rangle = 0$ , так направления смещений независимы и равновероятны во все стороны. Большая часть слагаемых в сумме обращается в нуль, при прямолинейном равномерном движении вторая двойная сумма значительно превосходит первую – в итоге квадрат смещения пропорционален квадрату времени. Проведенный компьютерный эксперимент полностью подтверждает результат теоретического усреднения. Незначительные отклонения найденных коэффициентов линейной зависимости от теоретических ( $a=1$ ,  $b=0$ ) объясняются малостью использованного числа реализаций, по которым проведено усреднение.

С течением времени положение частицы не становится все более определенным, совсем наоборот – чем больше времени прошло от начала движения, тем более случайным становятся координаты частицы, увеличивается неопределенность ее положения. В любой

момент времени координаты частицы являются случайными величинами, поэтому могут характеризоваться функциями распределения. Как мы неоднократно подчеркивали, полную информацию о случайной величине дает ее функция распределения. На рис. 6 показаны гистограммы распределения декартовых координат ( $x, y$ ) и расстояния до начала отсчета  $r$  частиц через время  $t$  после начала движения.

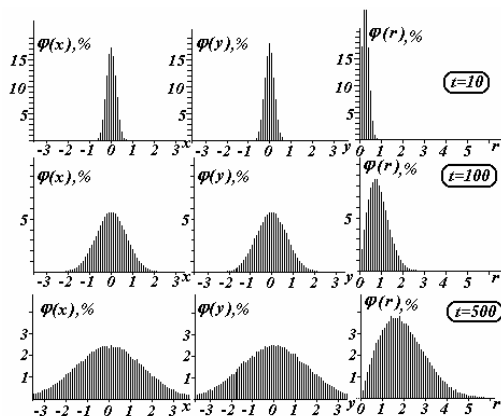


Рисунок 6 – Гистограммы распределения декартовых координат

Гистограммы построены по  $N = 10^5$  реализаций. Как всегда методы статистического моделирования требуют большого терпения – последние диаграммы рассчитывались более получаса. Приведенные диаграммы полностью подтверждают вывод о возрастании неопределенности положения частицы. Гистограммы распределения декартовых координат имеют вид уже знакомого вам гауссова «колокольчика». Распределения расстояний  $r$  явно несимметричны – не думайте, что все распределения симметричны.

Полученные результаты можно интерпретировать как распределение в пространстве числа диффундирующих частиц из одной точки. Действительно, при описании диффузии можно пренебречь взаимодействием (например, столкновениями) частиц. Поэтому нет никакой разницы – моделировать совместное, одновременное движение всех частиц, или движение каждой частицы по отдельности (что мы

фактически проделали). С этой точки зрения необходимо подчеркнуть, что гистограмма распределения расстояний до начала отсчета не совпадает с распределением концентраций частиц. Для получения распределения концентраций необходимо число частиц, попавших в область расстояний от  $g$  до  $g + \Delta g$  необходимо число частиц разделить на площадь этой области  $2\pi g \Delta g$ . В этом случае мы получим монотонно убывающую функцию, как и должно быть с точки зрения здравого смысла – диффузия не может привести к образованию кольца повышенной концентрации диффундирующих частиц.

Отметим, что в своих измерениях Ж. Перрен экспериментально исследовал зависимость среднего квадрата смещения броуновской частицы от времени. На основании усреднения более чем по 10000 наблюдениям он рассчитал коэффициент пропорциональности, на основании чего определил постоянную Авогадро.

#### *Список литературы*

1. Приезжев, В.Б. Аналитический метод в теории случайных блужданий без самопересечения / В.Б. Приезжаев. – ОИЯИ, Р17-9930, Дубна, 1976.
2. Приезжев, В.Б. К проблеме случайного блуждания без самопересечений / В.Б. Приезжаев. – ОИЯИ, Р17-9633, Дубна, 1976.
3. Гагунашвили, Н.Д., Метод моментов в теории случайных блужданий без самопересечения / Н.Д. Гагунашвили, В.Б. Приезжев. – ОИЯИ, Р17-11367, Дубна (1978).
4. Приезжев, В.Б. К проблеме случайного блуждания без самопересечений / В.Б. Приезжаев // – Международный симпозиум по избранным проблемам статистической механики, 1977, Дубна, Д. 17-10529. – С. 50.
5. Хуанг, К. Статистическая механика / К. Хуанг. – М.: 1966.64, Baxter r.j. Dimers on a rectangular lattice. j.Math. Phys., 1968. – vol. 9. – N 4 – P. 650-654.
6. Алхимов, В.И. Случайные блуждания без самопересечений / В.И. Алхимов // – Теор. и мат. физ., 1976. – т. 29. – 424 с.

*Гулецкий Василий Васильевич*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, v980m@tut.by.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой теоретической физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 621.383.5

*М.А. Данилюк*

## РЕЗИСТИВНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ОКСИДА ГАФНИЯ

В данной работе сформулирована тепловая модель переключения проводимости оксида гафния в электрическом поле. Рассчитана температура нанощнуров, образующихся в результате теплового пробоя.

В настоящее время наноструктуры на основе диэлектриков с высоким значением диэлектрической постоянной (так называемые «high – k» диэлектрики) перспективны для применения в качестве подзатворных диэлектриков в МОП- транзисторах и энергонезависимой резистивной памяти с произвольной выборкой (RRAM). Для исследования и развития RRAM необходимо четкое понимание механизма перехода из состояния с высокой проводимостью в состояние с низкой проводимостью. К одним из самых перспективных «high – k» диэлектриков исследователи относят оксид гафния. Он сочетает высокую диэлектрическую проницаемость и большую энергию запрещенной зоны [1]. Применение элементов RRAM с  $\text{HfO}_2$  сдерживается отсутствием понимания механизма переключения из высокоомного состояния (HRS) в низкоомное состояние (LRS) [2].

Согласно многочисленным экспериментальным данным ВАХ металл/диэлектрик/металл (кремний) структур с  $\text{HfO}_2$  характеризуется скачком тока при определенном потенциале,  $V_{\text{set}}$ . В работе [3] экспериментально установлено, что после электрической формовки в диоксиде гафния формируются проводящие нанощнуры диаметром  $30 \div 50$  нм. Это значит, что ВАХ таких нанощнуров включает S-образные или сверхлинейные участки, которые не проявляются при измерениях из-за того, что площадь диоксида гафния много больше площади нанощнура.

Нами предложена модель обратимого теплового пробоя нанощнура сформированного в оксиде гафния. Резкое изменение проводимости нанощнуров происходит в момент фазового перехода при достижении



определенной критической температуры за счет джоулева разогрева материала нанопровода.

Рассмотрим нанопровод в слое оксида гафния наноструктуры, расположенный перпендикулярно оси  $z$  от  $z = -L/2$  до  $z = +L/2$ . Тепловыделением и падением напряжения на контактах пренебрегаем и считаем, что теплопровод с внешних поверхностей контактов однороден и подчиняется закону Ньютона. Распределение температуры в диэлектрике описываем следующими уравнениями и граничными условиями [4]

$$\kappa_d \frac{d^2 T}{dz^2} + jF = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dz} \Big|_{z=0} = 0, \quad \kappa_d \frac{dT}{dz} \Big|_{z=L/2} = \frac{\lambda(T_b - T_0)}{1 + \lambda\delta / \kappa_c}, \quad (2)$$

где  $\kappa_c$  – теплопроводность материала контакта,  $\kappa_d$  – теплопроводность материала нанопровода,  $\lambda$  – коэффициент внешнего теплоотвода,  $\delta$  – толщина проводящих контактов,  $T_0, T_b$  – температура окружающей среды и на границе нанопровода и электрода. Плотность постоянного тока и падение потенциала на нанопрове в дрейфовом приближении

$$j = [\sigma_H + (\sigma_L - \sigma_H)\Theta(T - T_{ph})]F. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (2, 3) в явном виде, можно получить вольт-амперную характеристику, обусловленную джоулевым разогревом.

Для случая, когда электроды разные, положение максимума температуры  $z_m$  в нанопрове будет смещено относительно точки  $z = 0$ . Рассмотрим две области:  $z_m - L/2, -L/2 - z_m$ .

Интегрируя уравнение (1) по  $z$  при  $j = \text{const}$ , получим

$$\kappa_d \frac{dT}{dz} \Big|_{z=L/2} - \kappa_d \frac{dT}{dz} \Big|_{z=z_m} = -j \int_{z_m}^{L/2} E(z) dz = -jV_1, \quad (4)$$

где  $z_m$  – координата максимума температуры в нанопрове,  $V_1$  – падение потенциала в области от максимума температуры до границы с первым электродом (в области  $z_m - L/2$ ). Аналогично для области  $-L/2 - z_m$ .

Из (4) с учетом (1) получим выражение, связывающее температуру на границах диэлектрика и электродов  $T_b$  с плотностью тока и внешним смещением

$$\frac{\lambda_1(T_{b1} - T_0)}{1 + (\lambda_1 \delta_1 / \kappa_{cl})} = jV_1, \quad (5)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент внешнего теплоотвода для первого электрода,  $\kappa_{cl}$  – теплопроводность материала первого электрода,  $\delta_1$  – толщина первого электрода. Аналогично для второго электрода.

Из (5) получим выражение для определения температуры на границах диэлектрик-электрод  $T_{b(2)}$  в зависимости от плотности тока и внешнего смещения

$$T_{b(2)} - T_0 = jV_{1(2)}L / 2\gamma_{1(2)}\kappa_d, \quad (6)$$

где параметры теплоотвода

$$\gamma_{1(2)} = \frac{\lambda_{1(2)}L}{2\kappa_d[1 + (\lambda_{1(2)}\delta_{1(2)} / \kappa_{cl(2)})]}. \quad (7)$$

Для расчета с помощью (6) необходимо определить зависимость плотности тока как от внешнего смещения, так и от температуры. Уравнение (6) запишем в безразмерном виде

$$t_{b(2)} - t_0 = jV_{1(2)} / W_{b(2)}, \quad (8)$$

где  $t_{b(2)} = k_B T_{b(2)} / \Delta E$ ,  $t_0 = k_B T_0 / \Delta E$  – безразмерные температуры на границе и вне наноструктуры, а величина

$$W_{b(2)} = (2\gamma_{1(2)}\kappa_d \Delta E) / (k_B L) \quad (9)$$

характеризует плотность тепловой мощности на границе раздела на единицу поверхности.

Уравнение (1) запишем в безразмерном виде

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = -J \exp\left(\frac{1}{t}\right), \quad (10)$$

где  $x = z / L$ ,  $t = k_B T / \Delta E$ ,  $J_{1(2)} = (j^2 |\pm L / 2 - z_m|^2 k_B / 2\kappa_d \Delta E \sigma_0)$ .

Интегрируя (10) один раз по  $t$ , получим с учетом граничных условий (1)

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=\pm 1/2}^2 = -2J \int_{t_{b(2)}}^{t_m} \exp\left(\frac{1}{t}\right) dt, \quad (11)$$

где  $t_m = k_B T_m / \Delta E$ ,  $T_m$  – температура диэлектрика при  $z = 0$ .

Из (11) с учетом (4) следует уравнение, связывающее температуры  $t_m$  и  $t_{b(2)}$  с падением потенциала  $V_{l(2)}$

$$\int_{t_{b(2)}}^{t_m} \exp\left(\frac{1}{t}\right) dt = \frac{v_{bl(2)}^2}{2}, \quad (12)$$

где  $v_{bl(2)} = V_{l(2)} \sqrt{(\sigma_0 k_B / \kappa_d \Delta E)}$  – безразмерный потенциал.

Решая уравнение (10), получим уравнение, связывающее температуры  $t_m$  и  $t_b$  с плотностью тока  $j$

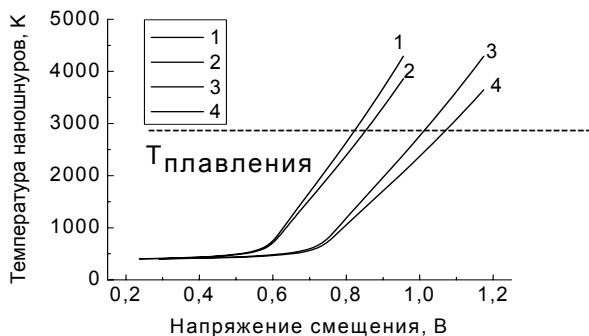
$$\int_{t_{b(2)}}^{t_m} \left( \int_t^{t_m} \exp(1/t) dt \right)^{-1/2} dt = \frac{\sqrt{2J_{l(2)}}}{2}. \quad (13)$$

Полученная система уравнений (12), (13) позволяет определить ВАХ наноструктуры металл/диэлектрик/металл (кремний) с учетом джоулева разогрева диэлектрика током и теплоотвода посредством металлических электродов.

Для расчета ВАХ предварительно найдем зависимость температуры  $t_m$  от относительной мощности  $jV_{l(2)} / W_b$ . Комбинируя выражения (12) и (13), получим уравнение для вычисления этой зависимости

$$\left( \int_{t_0 + jV_{l(2)}/W_{bl(2)}}^{t_m} \exp\left(\frac{1}{t}\right) dt \right)^{1/2} \cdot \int_{t_0 + jV_{l(2)}/W_{bl(2)}}^{t_m} \left( \int_t^{t_m} \exp\left(\frac{1}{t}\right) dt \right)^{-1/2} dt - \frac{jV_{l(2)} \gamma_{l(2)}}{2 W_{bl(2)}} = 0. \quad (14)$$

Из полученного уравнения (14) следует, что относительная температура  $t_m$  в середине диэлектрика в рамках данной модели зависит только от относительной мощности  $jV_{l(2)} / W_{bl(2)}$ , параметра теплоотводов  $\gamma_{l(2)}$  и относительной температуры окружающей среды  $t_0$ . Используя функции  $t_m(jV / W_b)$ , полученные для различных значений параметров  $\gamma_{l(2)}$  и  $t_0$  с помощью уравнений (12) и (13) находим соответствующие вольт-амперные характеристики, а также зависимости температуры в диэлектрике и на его границе с электродом от внешнего смещения.



**Рисунок – Температура нанопроводов в наноструктуре Ni / HfO<sub>2</sub>Si в зависимости от внешнего смещения: 1,3 – температура в середине нанопровода; 2,4 – температура на границе Ni / HfO<sub>2</sub>**

Рассчитаны зависимости температуры нанопровода от потенциала в условиях его джоулева разогрева. Рассмотрена наноструктура Ni / HfO<sub>2</sub> / Si, толщина оксида гафния 4÷10 нм, металла 50÷100 нм, диаметр нанопроводов порядка 50 нм. Показано что при определенном граничном значении внешнего смещения происходит резкое повышение температуры нанопроводов до температуры плавления порядка 3050 К. Граничное значение внешнего смещения определяется в основном величиной параметра теплоотвода и температурой окружающей среды.

При изменении параметра теплоотвода  $\gamma = 1 \div 5$ ,  $T_0 = 300$  К,  $\Delta E = 0.13 \div 0.15$  эВ,  $\chi = 1$  Вт / мК,  $\sigma_0 = (6 \div 8) \cdot 10^3$  см / м происходит сдвиг зависимостей по оси потенциалов в сторону его роста от 1 до 2 В. Расчет для наноструктуры Ni / HfO<sub>2</sub> / Si проведенный для параметров  $T_0 = 400$  К,  $\Delta E = 0.13 \div 0.15$  эВ,  $\chi = 1$  Вт / мК,  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  см / м, толщина: Si 500 нм, Ni – 50 нм, 80 нм показал, что в этом случае резкий рост температуры нанопроводов наблюдается уже начиная с потенциалов 0.6-0.8 В (см. рисунок). Температура плавления достигается при потенциалах 0.9÷1.1 В. Полученные результаты могут быть использованы при разработке элемента резистивной памяти (RRAM) на основе диоксида гафния.

*Список литературы*

1. P. Gonon, M. Mougenot, *et al.*, J. Appl. Phys., 2010. – Vol. 107. – P. 074507.
2. X. Li, K.L. Pey, *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2010. – Vol. 96. – P. 022903.
3. X. Wu, K.L. Pey, *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2010. – Vol. 96. – P.202903.
4. K.D. Tsendin, A.B. Shmelkin, Tech. Phys. Lett., 2004. – Vol. 30. – No 6. – P.525-528.

Model of resistivity switching for hafnium dioxide in nanostructure Ni/HfO<sub>2</sub>/Si was created. The model based on mechanism of electrical breakdown of hafnium dioxide. Temperature of nanowires was calculated.

*Данилюк Максим Александрович*, магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, maxim\_danilyk@mail.ru.

Научный руководитель – *Борисенко Виктор Евгеньевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.

УДК 389

*В.Т. Дюрдь*

**ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ  
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ  
ПРЕЦИЗИОННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

На основании международных норм разработан алгоритм контроля прецизионности результатов измерений, а также программный пакет автоматизированного контроля прецизионности результатов измерений.

Метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности [1,2].

Повышение точности измерений позволяет определить недостатки технологических процессов и устранить эти недостатки, что приводит к повышению качества продукции, экономии энергетических и тепловых ресурсов, сырья, материалов.

На изменчивость результатов измерений, выполненных по одному методу, помимо различий между предположительно идентичными образцами могут влиять многие различные факторы, в том числе:

а) оператор;

- б) используемое оборудование;
- в) калибровка оборудования;
- г) параметры окружающей среды (температура, влажность, загрязнение воздуха и т.д.);
- д) интервал времени между измерениями.

«Прецизионность» является общим термином всех видов случайной погрешности и для выражения точности и изменчивости повторяющихся измерений, которые характеризуются «повторяемостью» и «воспроизводимостью» измерений. В условиях повторяемости (сходимости) факторы (а-д), перечисленные выше, считают постоянными, и они не влияют на изменчивость, в то время как в условиях воспроизводимости все эти факторы переменны и влияют на изменчивость результатов испытаний. Таким образом, повторяемость и воспроизводимость представляют собой два крайних случая прецизионности, где первый характеризует минимальную, а второй – максимальную изменчивость результатов. Прочие промежуточные условия между этими двумя экстремальными условиями прецизионности допустимы, когда один или несколько факторов (а-д) могут изменяться. Прецизионность, как правило, выражают через стандартные отклонения.

Показатель повторяемости методики анализа в виде предела повторяемости –  $r_{\text{m}}$  для содержания, соответствующего содержанию компонента в  $m$ -м образце, рассчитывают по формуле

$$r_{\text{m}} = Q(P, n) S_{\text{m}},$$

где  $n$  – число параллельных определений, предусмотренных методикой анализа для получения результата анализа,  $P$  – доверительная вероятность.

$S_{\text{m}}$  – среднееквадратичное отклонение (СКО);

$$Q(P, n) = 2,77 \text{ при } n = 2, P = 0,95;$$

$$Q(P, n) = 3,31 \text{ при } n = 3, P = 0,95;$$

$$Q(P, n) = 3,63 \text{ при } n = 4, P = 0,95;$$

$$Q(P, n) = 3,86 \text{ при } n = 5, P = 0,95.$$

Показатель воспроизводимости методики анализа в виде предела воспроизводимости –  $R_{\text{m}}$  для содержания, соответствующего содержанию компонента в  $m$ -м образце, рассчитывают по формуле

$$R_{\text{m}} = Q(P, n) S_{\text{Rm}},$$

где  $S_{\text{Rm}}$  – среднееквадратичное отклонение (СКО).

Интерфейс одной из страниц программы автоматизированного контроля прецизионности результатов измерений приведен на рисунке 1.

№	номер лаборатории	Номер результата измеренного анализа, полученного в условиях повторяемости				среднее значение	ОД	воспроизводимость
		1	2	3	4			
1	1							
	2							
	3							
	4							
2	1							
	2							
	3							
	4							
3	1							
	2							
	3							
	4							

**Рисунок – Интерфейс программы с таблицей № 3 для расчета показателя прецизионности**

#### *Список литературы*

1. Сергеев, А.Г. Метрология и метрологическое обеспечение / А.Г. Сергеев. – М.: Высшее образование, 2008. – 575 с.
2. Сергеев, А.Г. Метрология: учебник / А.Г. Сергеев. – М.: Логос, 2005. – 272 с.
3. СТБ ИСО/МЭК 17025 – 2001 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
4. СТБ ГОСТ Р 50779.10-2001 (ИСО 3534.1 – 93) Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения.
5. РМГ 61-2003 «ГСИ. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки» Технорма.RU.

The new control procedure for the measurement data accuracy (precision), based on the international standards, as well as the software program for automatic measurement data accuracy (precision) testing, were elaborated.

*Дюрдь Виталий Тадеушевич*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 537.87

*Н.В. Жаркий*

## МОДУЛЯТОР СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В данной работе приведены результаты исследования с помощью программного продукта CST Microwave Studio свойств направленности и локализации электромагнитных волн в периодических стержневых диэлектрических средах.

В некоторых структурированных материалах электромагнитная волна может распространяться только в определенных направлениях или локализоваться в определенных областях (фотонные кристаллы). Внедрение фотонных кристаллов в СВЧ-технику обещает создание принципиально новых многофункциональных фотонных интегральных схем и компактных устройств управления распространением волн сантиметрового диапазона [1].

Целью работы является моделирование и исследование распространения и локализации электромагнитных волн СВЧ-диапазона в двумерном фотонном кристалле, состоящем из цилиндрических стержней.

Компьютерная модель установки приведена на рисунке 1 и представляет собой периодическую диэлектрическую решетку.

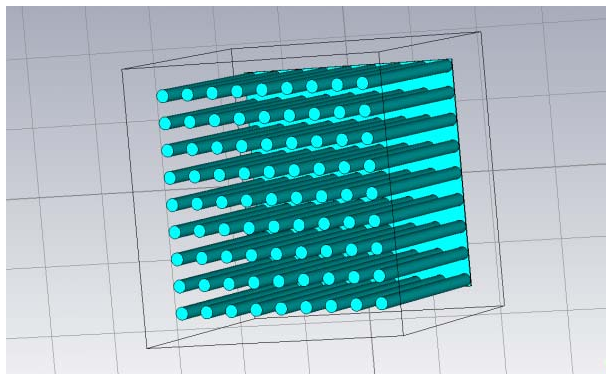


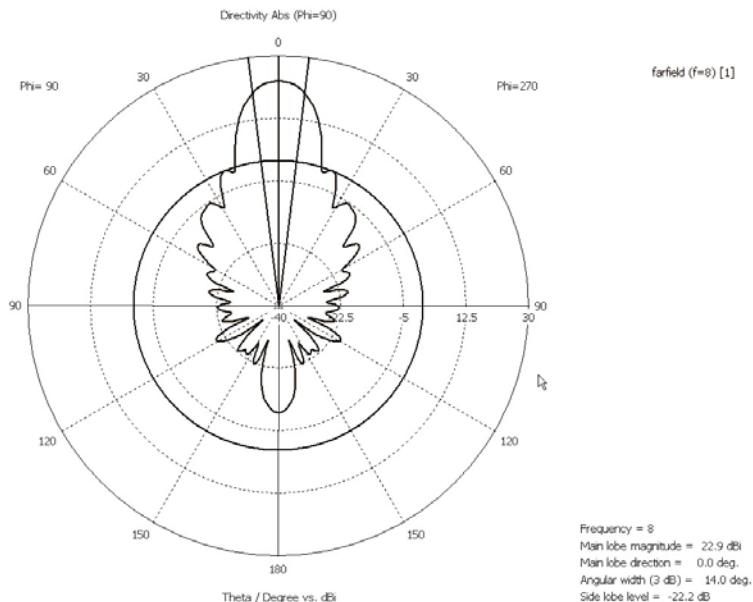
Рисунок 1 – Компьютерная модель установки в продукте  
CST Microwave Studio



При проведении работы использовался программный пакет CST Microwave Studio – система моделирования СВЧ устройств, в основе которой лежит метод аппроксимации и метод определенных интегралов во временной области.

Параметры структуры выглядят следующим образом: прямоугольная подложка площадью  $S = 159 \times 159 \text{ мм}^2$  и толщиной  $h = 1 \text{ мм}$ , матрица с  $9 \times 9$  стержнями цилиндрической формы диаметром  $d = 9 \text{ мм}$  и длиной  $L = 150 \text{ мм}$  ( $L = 4\lambda$ ), шаг расположения в матрице  $a = 18.7 \text{ мм}$  ( $a = \lambda/2$ ). Диэлектрическая проницаемость структуры  $\epsilon = 3.0$ . Исследование проводилось в СВЧ диапазоне при частоте  $f = 8.0 \text{ ГГц}$ .

Установлено, что в периодических диэлектрических структурах с геометрическими размерами не менее  $3\lambda$  проявляются выраженные свойства направленности [3-4]. На рисунке 2 приведены результаты измерения ДН такой периодической системы.



**Рисунок 2 – Диаграмма направленности периодической диэлектрической структуры**

Как показывает диаграмма, структура обладает направленными свойствами и при помощи электромагнитного поля можно эффективно управлять коэффициентами пропускания и отражения решетки, что подтверждается результатами экспериментальных работ [3-4].

*Список литературы*

1. Гапоненко, С.В. Оптика наноструктур / С.В. Гапоненко [и др.]; под ред. А.В. Федорова. – СПб.: Недра, 2005. – 326 с.
2. Баскаков, С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для вузов по «Радиотехнике» / С.И. Баскаков – М.: Высш. шк., 1998. – 416 с.
3. Заерко, Д.В. Распространение и локализация электромагнитных волн СВЧ-диапазона в периодических структурах / Д.В. Заерко // Вестник ГрГУ им. Я. Купалы. – 2008. – № 2. – С. 80-85.
4. Рычков, Ю.М. Распространение и локализация электромагнитных волн СВЧ-диапазона в управляемых периодических структурах / Ю.М. Рычков, С.А. Зайкова, Д.В. Заерко // Вестник ГрГУ им. Я. Купалы. – 2010. – № 2. – С. 59-62.

Working out and creation of computer model for studying of distribution and localization in dielectric rod systems. Reception of the directional diagram in periodic structure.

*Жаркий Никита Владимирович*, магистрант кафедры промышленной электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, kakdelanik@mail.ru.

Научный руководитель – *Рычков Юрий Михайлович*, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой промышленной электроники, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 621.382.049.77.001.63

*О.В. Зданевич*

## **УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИТРОНОВ В КОРПУСЕ SOD-80**

Анализ конструкций кристаллов кремниевых стабилитронов средней мощности и электрические характеристики различных кристаллов стабилитронов в корпусе SOD-80.

Новые технологии автоматизированного поверхностного монтажа в производстве ракетно-космической техники требует снижения габаритов полупроводниковых приборов. Уменьшение размеров корпусов требует и снижение рассеиваемой мощности и допустимых значений тока стабилизации стабилитронов.

У низковольтных стабилитронов, работающих на эффекте туннелирования величина пробивного напряжения находится в прямой зависимости от ширины запрещенной зоны. С повышением температуры значение ширины запрещенной зоны уменьшается в соответствии с аппроксимированной функцией [1]

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T_2 / (T + \beta), \quad (1)$$

где для кремния  $E_g(0) = 1,1 \text{ эВ}$ ,  $\alpha = 4,73 \cdot 10^{-4}$ ,  $\beta = 636$ .

Следовательно, температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН) в этом случае отрицателен и составляет около 0,01%/°C.

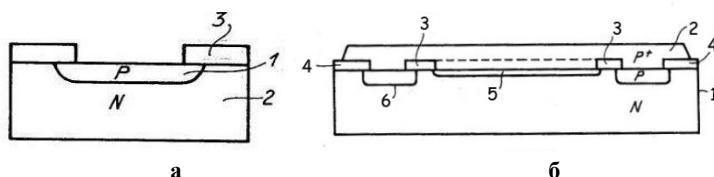
У высоковольтных стабилитронов величина пробивного напряжения при лавинном пробое находится в обратной зависимости от подвижности носителей, поскольку  $\rho \sim \mu^{-1}$ . Учитывая, что

$$\mu = \mu_0 (T_0 / T)^c, \quad (2)$$

где для кремния  $c = 3/2$  напряжение увеличивается с ростом температуры и соответственно ТКН будет положительным.

В диапазоне пробивных напряжений от 0 до ~10 В наблюдается близкая к линейной зависимость ТКН от  $U_{\text{проб}}$ . При  $U_{\text{проб}} = 5,5 \text{ В}$  ТКН  $\approx 0$ . Величина ТКНС практически не зависит от тока стабилизации, если он превышает (1-2) мА.

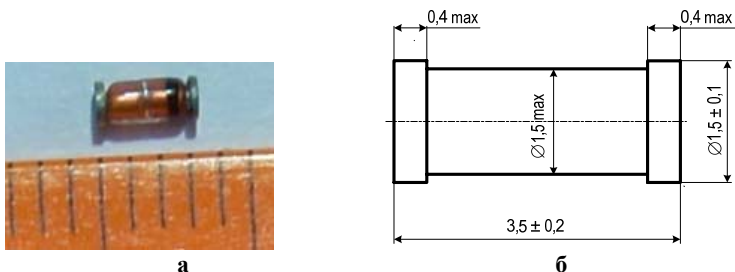
На рисунке 1 приведен разрез классической конструкции кристалла стабилитрона (а) и разрез конструкции кристалла стабилитрона с поликремневым эпитаксиальным слоем  $p^+$  – типа проводимости и изоляцией  $p-n$  – переходом (охранное кольцо) (б), в которой диффузионная область (р) сформирована непосредственно в N-подложке.



**Рисунок 1 – Разрез кристалла стабилитрона: а – классическая конструкция кристалла стабилитрона (1 – диффузионная область; 2 – подложка; 3 – оксид  $\text{SiO}_2$ ); б – конструкция кристалла стабилитрона с эпитаксиальным слоем и охранным кольцом (1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой (поликремний); 3, 4 – оксид  $\text{SiO}_2$ ; 5 – диффузионная область; 6 – охранный кольцо)**

Классическая конструкция характерна для низковольтных стабилитронов с резким р-п-переходом. Конструкция кристалла стабилитрона с охранным кольцом используется для высоковольтных стабилитронов с плавными р-п-переходами, для улучшения качества изоляции.

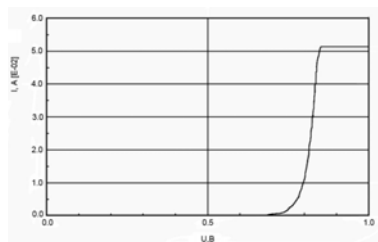
Кристалл исследуемого стабилитрона имеет размеры  $(0,5 \times 0,5)$  мм.



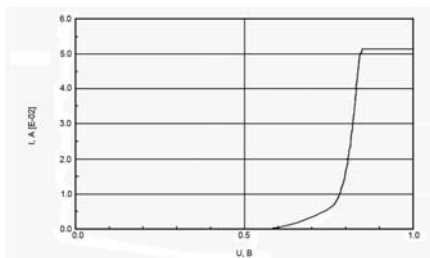
**Рисунок 2 – Внешний вид и размеры корпуса стабилитрона. а – фотография стабилитрона в корпусе SOD-80 (mini-MELF); б – чертеж корпуса стабилитрона с указанием размеров**

На рисунке 2 представлены фотография стабилитрона в корпусе SOD-80 (а) и – чертеж корпуса стабилитрона с указанием размеров (б).

На рисунках 3-5 приведены электрические характеристики исследуемых стабилитронов.

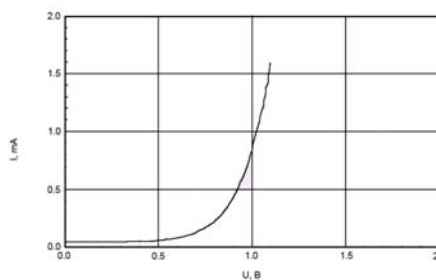


а

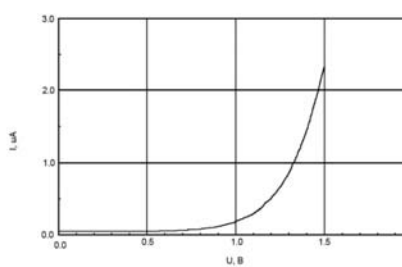


б

**Рисунок 3 – VAX стабилитрона с охранным кольцом (а)  
и без охранным кольца (б)**

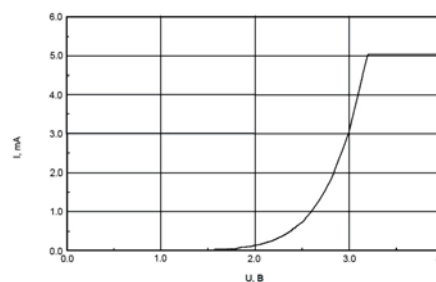


а

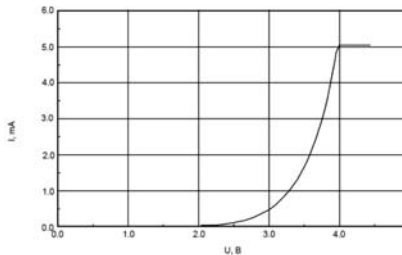


б

**Рисунок 4 – Ток утечки стабилитрона с охранным кольцом (а)  
и без охранным кольца (б)**



а



б

**Рисунок 5 – Обратная ветвь VAX стабилитрона с охранным кольцом (а)  
и без охранным кольца (б)**

Таким образом, для обеспечения стабильности электрических характеристик, исключительно высоких требований к надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам космического пространства для обеспечения длительных сроков функционирования, целесообразно использовать стабилитроны с охранным кольцом в металlostеклянном корпусе типа SOD-80.

*Список литературы*

1. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
2. Дудар, Н.Л. Моделирование электрических характеристик и расчет конструктивных параметров кремниевого стабилитрона с напряжением стабилизации 6,5 В / Н.Л. Дудар, В.С. Сякерский, Н.Н. Корытко // Научно-технический журнал «Электронные средства: исследования, разработки». – Ежеквартальный, 2009.

The study design of the hull SOD-80, the crystals of silicon diodes and high power electrical parameters.

*Зданевич Ольга Владимировна*, магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, master.bsuir@gmail.com.

Научный руководитель – *Гурский Леонид Ильич*, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, lhur@bsuir.by.

УДК 389

*А.А. Ивановская*

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ  
ПРАВИЛЬНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ  
В МЕЖЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

Разработана методика и алгоритм контроля правильности результатов измерений на основании международных стандартов, а также компьютерная программа автоматизированного контроля правильности результатов измерений.

Для аттестации методик выполнения измерений и оценивания компетентности лабораторий требуется описание точности метода измерений. В международных стандартах для этого используются понятия «правильность» и «прецизионность».

Правильность измерений – характеристика измерений, отражающая степень близости среднего арифметического значения результатов измерений к истинному или принятому опорному значению. Показателем правильности обычно является значение систематической погрешности результата измерений.

Основным требованием при оценке стабильности результатов измерений в пределах лаборатории является одновременная проверка точности получаемых результатов и поддержание показателей прецизионности и правильности на требуемых уровнях в течение длительного периода времени.

Автоматизация оценивания точности измерений позволяет снизить вероятность ошибок и трудоёмкость этого процесса.

Таким образом, создание программных средств для автоматизации процесса расчета правильности результатов измерений является достаточно важным и актуальным в наше время

В настоящей работе была создана компьютерная программа для автоматизированного расчета правильности результатов измерений в межлабораторном эксперименте.

В качестве языковой платформы выбран язык Visual Basic 10.0.

При написании программного кода использованы процедуры и функции, предназначенные для ввода данных, их обработки согласно разработанному алгоритму и вывода и состоящие преимущественно из циклов с параметром For...Next, операторов ветвления If...Then и числовых массивов.

Пример интерфейса программы приведен на рисунке 1.

Form3

*Уровни*

*Лаб*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Лаб 1	75053	0	1,643	0,447	0	0,836	0	1,643	3,391	0	2,509	2,949	1,095	0	0
Лаб 2	3,271	2,387	3,130	0,836	0,894	0,894	3,391	2,387	2,509	0	0	2,167	0	1,949	0
Лаб 3	0	1,949	3,577	0	0	2,607	0	1,732	0	0	3,937	0,547	3,937	2,828	3,492
Лаб 4	4,277	2,236	1,303	0,547	3,130	0	1,303	3,271	1,643	0,547	2,949	1,788	2,387	0	0
Лаб 5	2,073	0,547	2,387	2,509	2,167	1,643	3,492	0	1,643	1,224	0,707	3,937	0	3,049	2,607
Лаб 6	1,224	1,788	0	1,516	3,492	0,894	1,516	0	2,607	0,547	0	2,167	0	0	0,547
Лаб 7	3,130	2,387	0	3,130	1,303	0,547	2,387	4,381	3,492	0,836	0,707	1,516	0,836	4,381	1,224
Лаб 8	0,707	2,167	0	0	0	0	1,949	2,509	3,049	0	0	1,788	0	0	2,167
Лаб 9	9,066	0	1,949	1,303	2,387	0	1,303	1,224	0	0	1,095	3,492	2,509	3,937	0,894
Лаб 10	0	0	0	2,683	0	0	0	0	0	0,547	2,073	3,130	0	0	1,516
Лаб 11	1,224	1,949	2,167	1,516	2,949	0	3,391	2,387	2,167	1,788	1,341	0,547	0	0	0,447
Лаб 12	1,732	0,894	1,949	0,894	3,492	0,547	0,547	2,828	0	0	2,387	7,949	3,492	2,509	2,509
Лаб 13	1,643	0	0,707	0	1,224	1,949	0	0,547	0	0	0	1,516	1,732	2,073	0,836
Лаб 14	0,894	1,788	1,732	0	2,509	0,836	0	0,894	0,894	0	1,732	1,224	1,732	1,516	1,224
Лаб 15	8,396	0,547	0,836	3,130	0	1,643	1,516	2,828	2,236	0	0,894	0	2,387	0	0
	не подтв.	подтв.	подтв.	подтв.	не подтв.	подтв.	не подтв.	не подтв.	подтв.	подтв.	не подтв.	подтв.	не подтв.	подтв.	подтв.

**Рисунок 1 – Интерфейс программы автоматизированного контроля правильности результатов измерений в межлабораторном эксперименте**

#### *Список литературы*

1. Сергеев, А.Г. Метрология и метрологическое обеспечение / А.Г. Сергеев. – М.: Высшее образование, 2008. – 575 с.
2. Тартаковский, Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учеб. для вузов / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М.: Высшая школа, 2001. – 205 с.

To improve the precision and speed of measurement data accuracy evaluation process, the new control procedure for the measurement data accuracy, based on the international standards, as well as the software program for automatic measurement data accuracy testing, were elaborated.

*Ивановская Анна Анатольевна*, студентка 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [crystal\\_amber@mail.ru](mailto:crystal_amber@mail.ru).

Научный руководитель – *Василук Геннадий Тимофеевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [vasilyuk@grsu.by](mailto:vasilyuk@grsu.by).



УДК 530.1

*А.Г. Карнович, Н.Н. Дагиль*

## ТЕМПЕРАТУРА КЛАСТЕРОВ И МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Статья посвящена исследованию кластеров методом молекулярной динамики. В статье рассматривается связь между температурой кластера и межмолекулярным потенциалом взаимодействия. Исследование проводилось на основе инертных газов и органических веществ.

Внутренняя температура кластера определяется энергией случайного движения составляющих кластер атомов или молекул относительно центра масс кластера. Рассмотрим методику расчета температуры кластера в соответствии с [1]. В работе температура кластера определяется для случая, когда вращательные и поступательные степени свободы кластера «заморожены». Тогда внутренняя температура кластера  $T_{cl}$  определяется соотношением

$$\frac{3N}{2} k_B T_{cl} = \left\langle \sum_{i=1}^N \frac{m_i (v_{c.m.} - v_i)^2}{2} \right\rangle. \quad (1)$$

Температуру кластера можно определить также как термодинамическую величину:

$$T_{cl} = \frac{dE}{dS}, \quad (2)$$

где  $E$  и  $S$  – соответственно полная внутренняя энергия и энтропия кластера. Следует иметь в виду, что температуры, определяемые соотношениями (1) и (2), представляют собой разные величины. При термодинамическом рассмотрении кластеров учитывается не только энергия теплового движения атомов, но и потенциальная энергия взаимодействия атомов в кластере. Энергия кластера, состоящего из  $N$  атомов с парным взаимодействием, имеет вид:

$$E = U + K = \sum_{i,j} + \frac{m}{2} \sum_u \left( \frac{dr_i}{dt} \right)^2, \quad (3)$$

где  $U$  – полная потенциальная энергия,  $K$  – полная кинетическая энергия атомов,  $u(r_{ij})$  – потенциал взаимодействия двух атомов, разделенных расстоянием  $r_{ij} = r_i - r_j$ ,  $m$  – масса атома.

Температуры кластеров благородных газов, получаемых в агрегации, составляют, как правило, от нескольких градусов до нескольких десятков градусов Кельвина. По данным [1], молекулярные кластеры характеризуются температурой от нескольких десятков до нескольких сотен градусов Кельвина. Температура кластеров металлов и углерода, получаемых лазерными методами или в разрядах, может достигать 3500-4000 К, а температура кластеров тугоплавких материалов – 4500-5000 К. Представляет интерес расширить диапазон рассматриваемых веществ.

Температуру кластеров можно оценить следующим образом. Время жизни  $\tau$  атома на поверхности кластера, имеющего температуру  $T_{cl}$ , определяется соотношением:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E_s}{k_B T_{cl}}\right), \quad (4)$$

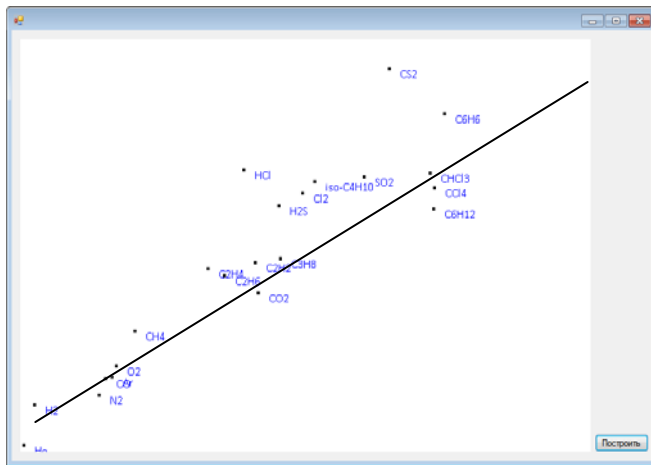
где  $\tau_0$  – период колебания атома на поверхности,  $\Delta E_s$  – теплота сублимации или парообразования.

При исследовании органических веществ так же как и в инертных газах была обнаружена закономерность: чем сильнее притяжение между атомами в кластере, тем выше температура кластера. Это указывает на то, что температура кластера связана с межмолекулярным потенциалом. Если в (4) определить время  $\tau, \tau_0$ , то по формуле:

$$T_{cl} = (10k_B \ln 10)^{-1} \Delta E_s \quad (5)$$

можно вычислить температуру кластера.

В расчетах по формуле (5) для веществ, отличных от инертных газов, принято, что  $\tau = 10^{-12}$ ,  $\tau_0 = 10^{-2}$ . Удельная теплота сублимации или парообразования определялась по данным базы [2]. На рисунке представлены результаты расчета.



**Рисунок – Глубина потенциальной ямы межатомного и межмолекулярного потенциала (ордината) как функция оцененной температуры кластеров**

На основе проведенных расчетов можно сделать вывод, что органические вещества, так же как и инертные газы, имеют линейную зависимость температуры кластера от потенциала межмолекулярного взаимодействия. Из этого следует, что чем меньше энергия связи атомов в кластере, тем ниже его конечная температура.

## Список литературы

1. Макаров, Г.Н. УФН 178 337 (2005).
2. Уэйлес, С. Фазовые равновесия в химической технологии / С. Уэйлс. – М.: Изд. «Мир» 1989.

*Карпович Александр Григорьевич*, студент 4-о курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, karpovichsanya@gmail.com.

Дагиль Николай Николаевич, студент 3-го курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, dagil\_nn@grsu.by.

Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой теоретической физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [nik@grsu.by](mailto:nik@grsu.by).

УДК 621.382

*А.Ю. Клинецвич*

## **УЧЕБНЫЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Рассмотрен учебный контроллер на основе микроконтроллера Atmel AT89S52, позволяющий решать типовые задачи автоматизации физического эксперимента при изучении дисциплин специализации студентов инженерных специальностей.

Применение высокоинтегрированных микроконтроллеров, оснащенных встроенными АЦП, ЦАП и другими компонентами, для учебных целей не всегда удобно из-за отсутствия доступа к внутренним сигналам и невозможности аппаратного контроля состояния встроенных устройств. Построение изучаемого устройства из отдельных элементов с возможностью контроля всех сигналов позволяет более детально изучить процесс взаимодействия микроконтроллера с подключенными к нему внешними компонентами. В связи с этим при разработке контроллера был сделан выбор в пользу решения на отдельных компонентах невысокой степени интеграции, несмотря на значительное увеличение стоимости разработки.

Выбор элементной базы для представленной разработки обусловлен имеющимися в наличии компонентами, достижением максимальной функциональности, а также главной областью применения изготовленного устройства – в виде лабораторного макета для учебных практикумов по курсам «Основы автоматизации эксперимента» и «Микропроцессорные измерительные устройства и системы».

В качестве основного элемента контроллера применяется микроконтроллер AT89S52-24 фирмы Atmel, совместимый по системе команд и по выводам с базовыми микроконтроллерами семейства Intel MCS-51. Основными критериями при выборе этой модели микроконтроллера были его функциональные возможности, а также доступность средств программирования и отладки. Выбранный аналого-цифровой преобразователь – 12-битный AD7893 (Analog Devices), отличается простым последовательным протоколом обмена информацией с управляющим микроконтроллером, и имеет встроенное устройство выборки – хранения и тактовый генератор. На входе АЦП установлен 8-входовой аналоговый мультиплексор ADG608 (Analog

Devices), позволяющий подключать один из восьми источников сигналов к входу АЦП. В качестве источников сигналов выступают датчики физических величин, оснащенные дополнительными усилителями. Для генерации произвольных сигналов заданной формы и частоты используются два внешних ЦАП MAX504 (Maxim), выходы которых при необходимости буферизируются повторителями на основе операционных усилителей. Свободные линии портов микроконтроллера используются для подключения вспомогательных элементов, например, управляющих кнопок, дискретных датчиков или исполнительных устройств.

Для измерения температуры применен цифровой датчик DS18B20 (Dallas) позволяющий измерять температуру с разрешением от 9 до 12 двоичных разрядов. Информация передается из/в DS18B20 по интерфейсу 1-Wire. Обработанная микроконтроллером информация выводится на алфавитно-цифровой жидкокристаллический индикатор на основе стандартного контроллера HD44780, и передается в ПЭВМ с использованием последовательного интерфейса RS-232. Сопряжение микроконтроллера с интерфейсом RS-232 по уровням сигналов реализуется с помощью специализированной микросхемы MAX232 (Maxim).

Наличие в контроллере основных компонентов типовой системы автоматизации позволяет использовать его как основу для построения автоматизированных лабораторных установок для использования в учебном процессе. При этом написание специального программного обеспечения может обеспечиваться студентами, изучающими архитектуру автоматизированных измерительных систем в рамках упомянутых курсов.

#### *Список литературы*

1. Клинецвич, А.Ю. Лабораторный макет контроллера для автоматизации эксперимента / А.Ю. Клинецвич. – Екатеринбург: ВНКФ-17, 2011. – С. 536.

This article is about the training controller based on the microcontroller Atmel AT89S52, the model allows one to solve the problem of automation of physical experiments in the study subjects of specialization students of engineering specialties.

*Клинецвич Артур Юрьевич*, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [klintsevich@list.ru](mailto:klintsevich@list.ru).

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [german@grsu.by](mailto:german@grsu.by).

УДК 539.192

*В.А. Ковалева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко*

## **АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ АБСОРБЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ ИОНА ПРАЗЕОДИМА В КАЛЬЦИЙ-СКАНДИЙ-ГЕРМАНИЕВОМ ГРАНАТЕ**

Используя разные варианты теории интенсивностей, выполнен сравнительный анализ абсорбционных переходов иона празеодима в монокристалле  $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , вычислено время жизни мультиплетов  $^3\text{P}_0$  и  $^1\text{D}_2$  и коэффициенты ветвления люминесценции. Вычисленные значения сравнены с экспериментальными. Сделан вывод о наиболее адекватном варианте теории интенсивностей.

Оксидные кристаллы, такие как  $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , ( $\text{CaSGG}$ ), активированные трехвалентными ионами празеодима, являются перспективными материалами для создания твердотельных лазеров, генерирующих излучение в видимом, ультрафиолетовом и инфракрасном диапазоне. Такие лазеры находят широкое применение в производстве оптических запоминающих устройств, в метрологии, в мониторинге окружающей среды, медицине и т.д. Кроме того кристаллы, активированные  $\text{Pr}^{3+}$ , используются как чувствительные элементы в приборах для обнаружения и измерения характеристик ионизирующего излучения. Поэтому неудивительно, что в работе [1] выполнено детальное экспериментальное исследование оптического спектра  $\text{CaSGG}$ , активированного ионами  $\text{Pr}^{3+}$ .

В кристаллах  $\text{CaSGG}$  ион  $\text{Pr}^{3+}$  замещает двухвалентный  $\text{Ca}^{2+}$ , что приводит к образованию большого количества разного типа оптических центров из-за процессов зарядовой компенсации. В результате этого полосы люминесценции всегда неоднородно уширены даже при низких температурах. Широкие полосы поглощения дают определенное технологическое преимущество – нет необходимости в жесткой температурной стабилизации работы диодного лазера, используемого для накачки. Для дальнейшей оценки перспективности применения кристалла  $\text{CaSGG}:\text{Pr}^{3+}$  в оптических устройствах в работе [1] выполнен расчет времени жизни мультиплетов  $^3\text{P}_0$  и  $^1\text{D}_2$  и коэффициентов ветвления люминесценции с них и установлено, что на

спектроскопические характеристики сильно влияют возбужденные конфигурации. Однако детального исследования этих эффектов в работе [1] не выполнено. В связи с этим в данной работе выполнен сравнительный анализ интенсивностей абсорбционных переходов, вычисленных в разных вариантах теории интенсивностей.

Вывод о наиболее эффективном канале люминесценции можно сделать на основе коэффициентов ветвления  $\beta_{JJ'}$ , для оценки которых обычно используют выражение

$$\beta_{JJ'} = \tau_J A_{JJ'} , \quad (1)$$

где  $\tau_J$  время жизни возбужденного мультиплета, равное

$$\tau_J = \frac{1}{\sum_{J'} A_{JJ'}} . \quad (2)$$

В свою очередь вероятности спонтанных переходов  $A_{JJ'}$  можно оценить по формуле

$$A_{JJ'} = \frac{8\pi^2 e^2 n^2}{mc\lambda^2} f_{JJ'} , \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $n$  – показатель преломления среды,  $\lambda$  – средняя длина волны,  $m$  – масса электрона,  $c$  – скорость света.

Безразмерная величина  $f_{JJ'}$ , называемая силой осциллятора перехода, определяется через силу линии перехода  $S_{JJ'}$  следующим образом:

$$f_{JJ'} = \frac{8\pi^2 mc\sigma}{3(2J+1)\hbar e^2} \left[ \frac{(n^2+2)^2}{9n} S_{JJ'}^{ed} + n S_{JJ'}^{md} \right] . \quad (4)$$

Сила линии магнитных дипольных переходов однозначно определяется выражением:

$$S_{JJ'}^{md} = \frac{e^2 \hbar^2}{16\pi^2 m^2 c^2} \left\langle \chi JM \left\| \vec{L} + 2\vec{S} \right\| \chi' J' M' \right\rangle^2 . \quad (5)$$

Здесь  $|\chi JM\rangle$  – функция редкоземельного иона в кристалле,  $\vec{L}$  и  $\vec{S}$  – орбитальный момент и спин редкоземельного иона.

Для силы линии межмультиплетных электрических дипольных переходов в приближении слабого конфигурационного взаимодействия (метод Джадда-Офельта [2,3]) можно получить формулу:

$$S_{JJ'}^{ed} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \Omega_k \left\langle \chi JM \left\| U^k \right\| \chi' J' M' \right\rangle^2 . \quad (6)$$

Сила линии межмультиплетных электрических дипольных переходов равна сумме произведений параметров интенсивности  $\Omega_k$  и квадратов приведенных матричных элементов тензорного оператора  $U^k$ . Согласно микроскопической теории параметры интенсивности  $\Omega_2, \Omega_4, \Omega_6$  должны быть обязательно больше или равны нулю.

Более точный учет влияния возбужденных конфигураций можно выполнить с помощью оператора силы линии, полученного в приближении промежуточного конфигурационного взаимодействия [4],

$$S_{JJ'}^{ed} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \underbrace{\Omega_k [1 + 2R_k (E_J + E_{J'} - 2E_f^0)]}_{\Omega_k} \langle \mathcal{J} \| U^k \| \mathcal{J}' J' \rangle^2 \quad (7)$$

в котором параметры интенсивности  $\tilde{\Omega}_k$  зависят линейно от энергии мультиплетов  $E_J$  и  $E_{J'}$ , включенных в переход. Здесь  $R_k$  – дополнительные параметры, обусловленные конфигурационным взаимодействием,  $E_f^0$  – энергия центра тяжести конфигурации  $4f^2$ .

В оксидных материалах, активированных редкоземельными элементами, возбужденные конфигурации влияют на интенсивности межмультиплетных переходов более сильно, чем во фторидах или хлоридах. Поэтому при описании экспериментальных результатов в таких кристаллах часто можно достигнуть более высокой точности, применив оператор силы линии, полученный в приближении сильного конфигурационного взаимодействия [5]

$$S_{JJ'}^{ed} = e^2 \sum_{k=2,4,6} \Omega_k \left( \frac{\Delta}{\Delta - E_{\mathcal{J}}} + \frac{\Delta}{\Delta - E_{\mathcal{J}'}} \right)^2 \langle \mathcal{J} \| U^k \| \mathcal{J}' J' \rangle^2, \quad (8)$$

где  $\Delta$  – средняя энергия возбужденных конфигураций с переносом заряда и конфигурации противоположной четности.

Описание экспериментальных сил осцилляторов абсорбционных переходов было выполнено в приближении слабого конфигурационного взаимодействия (6), в упрощенном варианте приближения промежуточного конфигурационного взаимодействия (7), когда  $R_2 = R_4 = R_6 = \alpha$  и в приближении сильного конфигурационного взаимодействия (8). Наилучшее описание было достигнуто в приближении промежуточного конфигурационного взаимодействия. Результаты приведены в таблице.



Таблица – Экспериментальные и вычисленные силы осцилляторов в кристалле CaSGG:  $\text{Pr}^{3+}$ 

Переход ${}^3H_4 \rightarrow {}^{2S+1}L_J$	$E_J, \text{см}^{-1}$	$f_{\text{expt}} \times 10^6$	Вычисленные $f \times 10^6$ по теории	
			Джадда-Офельта (6)	модифицированной (7)
${}^3H_6$	4790	0,070	0,157	0,077
${}^3F_2$	5310	0,780	0,656	0,630
${}^3F_3 + {}^3F_4$	6670	1,520	2,068	1,615
${}^1G_4$	9780	0,050	0,092	0,109
${}^1D_2$	1666	0,710	0,221	0,465
${}^3P_0$	2064	1,150	0,914	0,685
${}^1I_6 + {}^3P_1$	2145	1,180	1,364	1,527
${}^3P_2$	2227	2,090	0,738	2,009
$\sigma$			0,704	0,331
Параметры				
$\Omega_2 \times 10^{20}, \text{см}^2$			0,012 $\pm$ 0,850	3,633 $\pm$ 1,150
$\Omega_2 \times 10^{20}, \text{см}^2$			1,249 $\pm$ 0,360	0,886 $\pm$ 0,120
$\Omega_2 \times 10^{20}, \text{см}^2$			0,848 $\pm$ 0,290	2,586 $\pm$ 0,180
$\alpha \times 10^4, \text{см}$				0,269 $\pm$ 0,011

Примечание:  $\alpha = R_2 = R_4 = R_6$ ,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение.

Применение модифицированной теории дает лучшее описание абсорбционных переходов и времени жизни: для мультиплета  ${}^3P_0$   $\tau_{\text{calc}} = 31$  мкс ( $\tau_{\text{expt}} = 17$ ), для мультиплета  ${}^1D_2$   $\tau_{\text{calc}} = 297$  мкс ( $\tau_{\text{expt}} = 180$ ).

Вычисленные коэффициенты ветвления люминесценции позволяют сделать вывод, что наиболее эффективными каналами люминесценции будут следующие:  ${}^3P_0 \rightarrow {}^3F_2, {}^3H_6, {}^3H_4$  и  ${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4, {}^3H_4$ . По длине волны генерируемого излучения эти переходы представляют технологический интерес.

*Список литературы*

1. Study of the visible spectra of  $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  garnet crystals doped with  $\text{Ce}^{3+}$  or  $\text{Pr}^{3+}$  / S. Pinelli et al // Opt. Mat. – 2004. – Vol. 25. – P. 91-99.
2. Judd, B.R. Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions / B.R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127, № 3. – P. 750-761.
3. Ofelt, G.S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions / G.S. Ofelt // J. Chem. Phys. – 1962. – Vol. 37, № 3. – P. 511-520.
4. Kornienko, A.A. Dependence of the line strength of  $f$ - $f$  transitions on the manifold energy. II. Analysis of  $\text{Pr}^{3+}$  in  $\text{KPrP}_4\text{O}_{12}$  / A.A. Kornienko, A.A. Kaminskii, E.B. Dunina // Phys. Stat. Sol.(b). – 1990. – Vol. 157, № 1. – P. 267-273.
5. Корниенко, А.А. Теория интенсивностей электрических дипольных переходов в приближении сильного конфигурационного взаимодействия / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, В.Л. Янкевич // Опт. и спектр. – 1996. – Т. 80. – С. 871-874.
6. Dunina, E.B. Modified theory of  $f$ - $f$  transition intensities and crystal field for systems with anomalously strong configuration interaction / E.B. Dunina, A.A. Kornienko, L.A. Fomicheva // Cent. Eur. J. Phys. – 2008. – Vol. 6. – № 3. – P. 407-414.

Using different variants of the intensity theory the comparative analysis of absorption transitions of  $\text{Pr}^{3+}$  ion in  $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  single crystal is carried out, the lifetime of  $^3P_0$  and  $^1D_2$  multiplets and branching coefficients were calculated. Theory was compared with the experimental results.

*Ковалева Виктория Александровна*, студентка 2 курса Витебского государственного технологического университета, Витебск, Беларусь, l.dun@mail.ru.

*Дунина Елена Брониславовна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной математики Витебского государственного технологического университета, Витебск, Беларусь, l.dun@mail.ru.

*Корниенко Алексей Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Витебского государственного технологического университета, Витебск, Беларусь, a\_a\_kornienko@mail.ru.

Научный руководитель – *Корниенко Алексей Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики, Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь, a\_a\_kornienko@mail.ru.

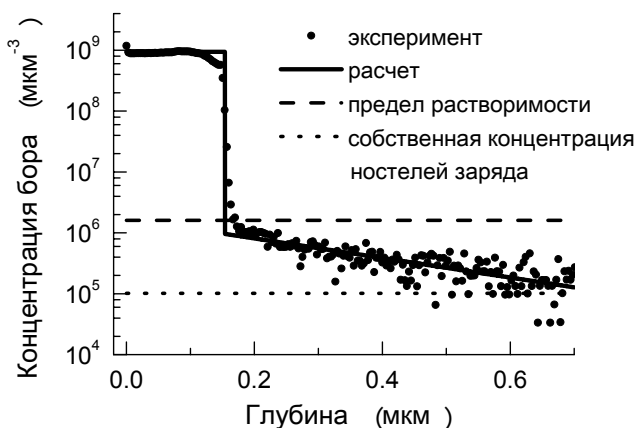
УДК 539.219.3

*А.П. Ковалева*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖУЗЕЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ БОРА ПРИ ТВЕРДОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОСАЖДЕННОГО АМОРФНОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ**

Показано, что формирование «хвостов» в области низкой концентрации бора при низкотемпературных отжигах связано не с постимплантационными дефектами, а с эффектами высокого уровня легирования кремния бором.

Традиционный подход к управлению свойствами полупроводниковых материалов основан на использовании процессов их легирования примесями, создающими строго заданные уровни в запрещенной зоне. В последние годы быстрый прогресс кремниевой микроэлектроники в области легирования обеспечивался с применением различных методов ионной имплантации в сочетании быстрыми термическими обработками и пиковыми отжигами для минимизации временно ускоренной диффузии (ВУД). Однако, в силу наличия большого количества постимплантационных дефектов, окончательного решения проблемы ВУД получить не удалось. В связи с этим в работе [1] был предложен новый не имплантационный подход к управлению свойствами кремниевых структур, включающий два этапа: 1) низкотемпературное осаждение слоя аморфного кремния (a-Si) на кремниевую подложку из газовой фазы с одновременным легированием растущего слоя атомами бора; 2) твердофазную эпитаксиальную рекристаллизацию (ТФЭР) аморфной фазы при низкотемпературном отжиге сформированной структуры. В эксперименте, проведенном в работе [1], слой a-Si осаждался на кремниевые подложки ориентации (001). Для осаждения был использован трисилан ( $\text{Si}_3\text{H}_8$ ), который имеет низкую температуру разложения. Легирование пленок осуществлялось добавлением в  $\text{Si}_3\text{H}_8$  диборана ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ). В качестве газа-носителя применялся очищенный водород ( $\text{H}_2$ ). Для измерения профиля легирования был использован метод вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Измеренный методом ВИМС профиль распределения бора после ТФЭР при отжиге с температурой  $500^\circ\text{C}$  в течение 600 с представлен на рисунке.



**Рисунок – Рассчитанное распределение общей концентрации бора после твердофазной рекристаллизации легированного аморфного слоя.**  
**Экспериментальные данные взяты из работы [1]**

Из рисунка видно, что профиль распределения бора характеризуется протяженным «хвостом» в области низкой концентрации примеси, который имеет вид прямой линии при логарифмическом масштабе по концентрационной оси. Величина коэффициента диффузии бора по механизму образования, миграции и распада пар «атом бора – межузельный атом кремния» при  $500^{\circ}\text{C}$  равна  $2.83 \cdot 10^{-16} \text{ мкм}^2/\text{с}$ , что для 600 секундного отжига соответствует средней длине диффузионного перераспределения примеси  $L = 4.12 \cdot 10^{-7} \text{ мкм}$  или  $4.12 \cdot 10^{-4} \text{ нм}$ . Это означает, что «хвост» формируется не в результате диффузии пар, а вследствие быстрой миграции межузельных атомов бора из рекристаллизуемого слоя в кристаллическую подложку, то есть точно так же, как и в ионно-имплантированных слоях [2]. Поскольку в рассматриваемом случае отсутствуют постимплантационные дефекты, из результатов эксперимента [1] и проведенного выше анализа следует весьма важный вывод, что генерация межузельных атомов бора происходит не в результате отжига созданных ионной имплантацией дефектов и взаимодействия атомов примеси, находящихся в положении замещения, с собственными межузельными атомами, а в результате явлений,

которые обусловлены высоким уровнем легирования кремния. К числу таких явлений можно отнести процессы образования, перестройки и распада кластеров атомов бора, так как концентрация примеси существенно выше предела растворимости бора в кремнии и низкотемпературный отжиг должен сопровождаться интенсивным кластерообразованием. Генерация межузельных атомов бора также может происходить в результате действия упругих напряжений, возникающих вследствие малости атомного радиуса бора по сравнению с радиусом атома кремния. На рисунке представлены результаты расчета профиля распределения бора после отжига, выполненные в рамках сформулированных выше предположений. При моделировании использовалось значение средней длины пробега неравновесных межузельных атомов бора  $l_{Al} = 0.12$  мкм, полученное из условия наилучшей подгонки к экспериментальным данным. Как видно из рисунка, наблюдается хорошее согласие рассчитанного и измеренного профилей распределения бора, что свидетельствует об адекватности предложенного механизма формирования «хвоста» в области низкой концентрации примеси.

#### *Список литературы*

1. Insights into solid phase epitaxy of ultrahighly doped silicon / A. Gouyé [et al.] // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol.108, Art. No. 013513.
2. Величко, О.И. Моделирование перераспределения ионно-имплантированного бора в различных условиях подавления скоротечной диффузии / О.И. Величко, А.П. Ковалева // Взаимодействие излучений с твердым телом = Interaction of Radiation with Solids: материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20-22 сент. 2011 г. / редкол.: В.М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2011. – С. 115-117.

It has been shown that the formation of «tails» in the low concentration region of boron profile during low temperature annealing is not related to the postimplantation defects but occurs due to the effects of a high concentration of boron atoms in silicon substrate.

*Ковалева Алина Петровна*, студентка 3 курса факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, Kalinaaa1@yandex.ru.

Научный руководитель – *Величко Олег Иванович*, доктор физико-математических наук, доцент, кафедра физики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, oleg\_velichko@cosmostv.by, velichkomail@gmail.com.

УДК 537.622.001

*А.В. Кухарев*

## ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ОДНОДОМЕННЫХ ЧАСТИЦАХ КОБАЛЬТА

Исследованы ориентационные фазовые переходы в однодоменной частице кобальта в форме диска, которые происходят при изменении её температуры. Определены устойчивые состояния намагниченности в зависимости от температуры, аспектного отношения диска и направления кристаллографических осей. Рассчитаны температуры фазовых переходов.

Магнитные наночастицы могут использоваться для построения элементов магнитной или магнитооптической памяти, управляемой лазером [1,2]. Нагрев ферромагнетика, например лазерными импульсами, приводит к изменению его магнитного состояния. Фазовые переходы в ферромагнетиках, связанные с изменением ориентации осей лёгкого намагничивания, называются ориентационными. Эти переходы обусловлены температурной зависимостью энергии магнитной анизотропии. Ориентационные фазовые переходы в объёмных материалах достаточно хорошо изучены [3, 4]. В случае же магнитных наночастиц возникают особенности, связанные с влиянием размагничивающего поля, зависящего от формы частицы.

Мы будем рассматривать однодоменную ферромагнитную частицу из кобальта в форме симметричного диска (предельный случай эллипсоида вращения) с двумя вариантами направления гексагональной оси кристалла: параллельно и перпендикулярно плоскости диска. Выберем декартову систему координат так, чтобы ось  $z$  совпадала с осью диска.

Устойчивое равновесное направление вектора намагниченности ферромагнитного диска определяется минимумом энергии, которая в случае ферромагнетика с гексагональной кристаллической решеткой и в отсутствии внешних полей с точностью до постоянного слагаемого записывается в виде [5]

$$F = k_1 \sin^2 \psi + k_2 \sin^4 \psi + \frac{1}{2}(N_x m_x + N_y m_y + N_z m_z).$$

Здесь  $m_x, m_y, m_z$  – компоненты нормированного вектора намагниченности  $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M$ . Угол  $\psi$  – это угол между вектором намагниченности  $\mathbf{m}$  и гексагональной осью кристалла (направление [0001]). Компоненты  $N_x, N_y, N_z$  тензора размагничивающих факторов

являются функциями его аспектного отношения  $L/D$  ( $L$  – толщина,  $D$  – диаметр диска) и для симметричного диска выполняются соотношения  $N_x = N_y = (1 - N_z)/2$  [6]. Величины  $k_1 = K_1/\mu_0 M^2$  и  $k_2 = K_2/\mu_0 M^2$  получаются нормированием констант магнитной кристаллографической анизотропии  $K_1$  и  $K_2$ ,  $\mu_0$  – магнитная постоянная. Зависимость намагниченности насыщения от температуры  $T$  аппроксимируем выражением  $M(T) = M_0 \sqrt{1 - (T/T_C)^2}$ , где  $M_0$  – намагниченность насыщения при нулевой температуре,  $T_C$  – температура Кюри.

Компоненты нормированной намагниченности  $\mathbf{m}$  удобно записать в сферических углах  $\theta$  и  $\phi$ :

$$m_x = \sin \theta \cos \phi, m_y = \sin \theta \sin \phi, m_z = \cos \theta.$$

Тогда энергия  $F$  запишется в виде

$$F = k_1 \sin^2 \psi + k_2 \sin^4 \psi + \frac{1}{4}(1 - 3N_z) \sin^2 \theta + \frac{1}{2} N_z.$$

Анализ магнитного состояния проводится для температур не выше  $T_m = 727\text{K}$ , поскольку при ее превышении кобальт переходит в состояние кристалла с гранецентрированной кубической решеткой. Ниже этой точки температурные зависимости нормированных констант анизотропии близки к линейным. Поэтому будем аппроксимировать их в виде  $k_1(T) = \alpha_1 - \beta_1 T$ ,  $k_2(T) = \alpha_2 - \beta_2 T$ , где коэффициенты  $\alpha_1 = 0.473$ ,  $\beta_1 = 9.41 \cdot 10^{-4}$  и  $\alpha_2 = 0.0492$ ,  $\beta_2 = 2.84 \cdot 10^{-5}$  определены исходя из табличных данных [7].

1. В случае  $[0001] \parallel z$ , то есть когда гексагональная ось кристалла кобальта параллельна оси диска, имеем  $\psi = \theta$  и

$$F = k_1 \sin^2 \theta + k_2 \sin^4 \theta + \frac{1}{4}(1 - 3N_z) \sin^2 \theta + \frac{1}{2} N_z.$$

В виду симметричности диска, устойчивое направление вектора намагниченности не зависит от азимутального угла  $\phi$ . Поэтому необходимыми и достаточными условиями минимума энергии  $F$  в этом случае являются

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} > 0.$$

Отсюда после несложных, но громоздких выкладок получим, что положение минимума энергии в зависимости от температуры  $T$  задается углом

$$\theta_0(T) = \begin{cases} 0, \pi, & 0 < T < T_1, \\ \arcsin \left[ \pm \sqrt{\frac{3N_z - 4k_1(T) - 1}{8k_2(T)}} \right], & T_1 < T < T_2 \\ \pi/2, & T_2 < T < T_m \end{cases}$$

Температуры фазовых переходов  $T_1$  и  $T_2$  находятся соответственно из условий  $4k_1(T) = 3N_z - 1$  и  $4k_1(T) + 8k_2(T) = 3N_z - 1$ . В случае линейной аппроксимации  $k_1(T)$  и  $k_2(T)$  находим  $T_1 = \frac{1 - 3N_z + 4\alpha_1}{4\beta_1}$ ,  $T_2 = \frac{1 - 3N_z + 4\alpha_1 + 8\alpha_2}{4\beta_1 + 8\beta_2}$ . Расчётные значения  $T_1$  и  $T_2$  при линейном приближении констант анизотропии  $k_1(T)$  и  $k_2(T)$  приведены в таблице для некоторых значений аспектного отношения диска  $L/D$ .

Таблица – Зависимость температур фазовых переходов от размагничивающего фактора  $N_z$  и аспектного отношения  $(L/D)$  диска в случае  $[0001] \parallel z$

$N_z$	$L/D$	$T_1, K$	$T_2, K$
0.2	1.79	609.3	673.3
1/3	0.91	502.9	573.0
0.8	0.10	130.8	222.1

2. В случае  $[0001] \parallel x$  (гексагональная ось кристалла лежит в плоскости диска) получаем, что  $\cos \psi = m_x = \sin \theta \cos \phi$  и

$$F = (k_1 + k_2) - (k_1 + 2k_2) \sin^2 \theta \cos^2 \phi + k_2 \sin^4 \theta \cos^4 \phi + \frac{1}{4} (1 - 3N_z) \sin^2 \theta + \frac{1}{2} N_z.$$

Необходимое и достаточное условия минимума энергии  $F$  в этом случае имеют вид:



$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial \phi} = 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \phi^2} - \left( \frac{\partial^2 F}{\partial \theta \partial \phi} \right)^2 > 0, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} > 0.$$

Получаем различные решения в зависимости от значения размагничивающего фактора  $N_z$ .

Фазы магнитного состояния диска при  $N_z = 1/3$ :

1)  $0 < T < T_1$ :  $\theta = \pi/2$ ,  $\phi = 0$  и  $\pi$ ;

2)  $T_1 < T < T_2$ : множество точек  $(\theta, \phi)$ , что  $\sin \theta \cos \phi = \pm \sqrt{1 + \frac{k_1}{2k_2}}$ ;

3)  $T_2 < T < T_m$ :  $\theta = 0$  и  $\pi$ , произвольное  $\phi$ .

Фазы при  $N_z > 1/3$ :

1)  $0 < T < T_1$ :  $\theta = \pi/2$ ,  $\phi = 0$ , и  $\pi$ ;

2)  $T_1 < T < T_2$ :  $\theta = \pi/2$ ,  $\cos \phi = \pm \sqrt{1 + \frac{k_1}{2k_2}}$ ;

3)  $T_2 < T < T_m$ :  $\theta = \pi/2$ ,  $\phi = \pi/2$  и  $3\pi/2$ .

Здесь температуры ориентационных переходов  $T_1$  и  $T_2$  находятся из условия  $k_1(T)(k_1(T) + 2k_2(T)) = 0$ . Для линейной аппроксимации

$k_1(T)$  и  $k_2(T)$  находим  $T_1 = \frac{\alpha_1}{\beta_1}$ ,  $T_2 = \frac{\alpha_1 + 2\alpha_2}{\beta_1 + 2\beta_2}$ . Расчёты дают

$T_1 = 502,9$  К,  $T_2 = 573,0$  К.

Фазы при  $N_z < 1/3$ :

1)  $0 < T < T_3$ :  $\theta = \pi/2$ ,  $\phi = 0$ , и  $\pi$ ;

2)  $T_3 < T < T_4$ :  $\sin \theta = \pm \sqrt{\frac{4k_1 + 8k_2 + 3N_z - 1}{8k_2}}$ ,  $\phi = 0$  и  $\pi$ ;

3)  $T_4 < T < T_m$ :  $\theta = 0$  и  $\pi$ , произвольное  $\phi$ .

Температуры  $T_3$  и  $T_4$  находятся из условий  $4k_1(T) + 3N_z - 1 = 0$  и  $4k_1(T) + 8k_2(T) + 3N_z - 1 = 0$  соответственно. В линейном приближении

$T_3 = \frac{3N_z - 1 + 4\alpha_1}{4\beta_1}$ ,  $T_4 = \frac{3N_z - 1 + 4\alpha_1 + 8\alpha_2}{4\beta_1 + 8\beta_2}$ . Для  $N_z = 0.2$  получаем

$T_3 = 396,6$  К,  $T_4 = 472,8$  К.

Как видно из полученных результатов, в случае, когда гексагональная ось кристалла кобальта параллельна оси диска, имеется три фазы магнитного состояния диска в рассматриваемом диапазоне температур (от 0 до  $T_m$ ). Температуры переходов между этими фазами уменьшаются с уменьшением аспектного отношения диска. В случае, когда гексагональная ось перпендикулярна оси диска, также имеется три фазы, но вид фазовых диаграмм существенно зависит от значения размагничивающего фактора  $N_z$ .

#### *Список литературы*

1. Крупа, Н.Н. Управление магнитным состоянием многослойных нанопленок с помощью лазерного излучения / Н.Н. Крупа // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, № 1. – С. 111 – 120.
2. Bigot, J.-Y. Ultrafast magnetization dynamics in ferromagnetic cobalt: the role of the anisotropy / J.-Y. Bigot // Chemical Physics. – 2005. – V. 318. – P. 137–146.
3. Horner, H. Nature of spin-reorientation transitions / H. Horner, C.M. Varma // Phys. Rev. Lett. – 1968. – V. 20. – № 16. – P. 845–846.
4. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1983. – 620 с.
5. Вонсовский, С.В. Магнетизм / С.В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
6. Кравчук, В.П. Тонкий ферромагнитный диск в поперечном магнитном поле / В.П. Кравчук, Д.Д. Шека // ФТТ. – 2007. – Т. 49. – № 10. – С. 1834 – 1841.
7. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

We have investigated orientation phase transitions taking place in a single-domain particle of cobalt in the shape of disk when its temperature is changed. The stable magnetic states depending on temperature, aspect ratio and crystallographic directions of the disk have been determined. The temperatures of these phase transitions have been calculated.

*Кухарев Андрей Валерьевич*, аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, kuharev-sp@mail.ru.

Научный руководитель – *Данилюк Александр Леонидович*, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Центра нанoeлектроники и новых материалов, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, danilyuk@nano-center.org.

УДК 681.5

*А.В. Лавыш, А.В. Никито*

## **СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХКООРДИНАТНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА**

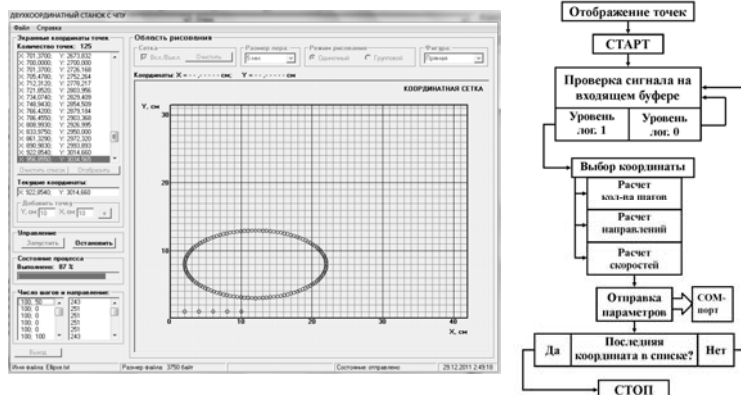
Разработано программное обеспечение для управления двухкоординатным станком с ЧПУ на основе микроконтроллера.

Данное программное обеспечение было разработано на языке программирования Visual Basic 6.0. Управление двухкоординатным станком осуществляется с помощью запрограммированного микроконтроллера, связь с которым устанавливается через последовательный порт (СОМ-порт).

Разработанное приложение позволяет с помощью конечного числа точек построить желаемую геометрическую фигуру на плоскости, а затем изобразить ее с помощью двухкоординатного станка на какой-либо поверхности, отслеживая в режиме реального времени процесс выполнения. Двухкоординатный станок представляет собой плоскую «рабочую» поверхность определенных размеров с движущейся по ней кареткой. Перемещение каретки осуществляется при помощи двух шаговых двигателей (ШД), один из которых отвечает за горизонтальное перемещение каретки, а другой – за вертикальное. Т.о., управление двухкоординатным станком сводится к управлению двумя шаговыми двигателями.

В процессе выполнения приложение осуществляет расчет и отправку необходимых параметров, образующих пакет данных. Данный пакет содержит шесть параметров: количества шагов для двух ШД, направления их вращения и скорости их вращения. Все эти параметры рассчитываются для каждой точки непосредственно только из значений ее координат, затем собираются в пакет и отправляются в СОМ-порт, после чего рассчитываются параметры для следующей точки. Для синхронизации работы приложения и прибора была организована обратная связь, благодаря которой отправка следующего пакета данных осуществляется только по окончании выполнения операций, заданных предыдущим пакетом данных. Так, при окончании выполнения

операций, заданных пакетом данных, микроконтроллер отправляет во входной буфер СОМ-порта специальный сигнал, указывающий на готовность принять следующий пакет данных.



**Рисунок 1 – Общий вид главного окна приложения в процессе выполнения передачи данных (слева). Блок-схема процедуры вычисления параметров и их передачи в СОМ-порт (справа)**

Программа проверяет, установлен ли во входном буфере уровень логической единицы, и затем либо принимает решение об обработке следующей точки, либо снова проверяет входной буфер на уровень логической единицы. Этот цикл выполняется до тех пор, пока не будет достигнута последняя точка. При достижении последней точки приложение производит необходимый расчет параметров и их отправку, и завершает процедуру.

Структура пакета данных состоит из трех частей, представляющих собой восьмибитные двоичные числа. В первой части содержится количество шагов для первого ШД, во второй части – количество шагов для второго ШД. Максимальное количество шагов, которое можно задать шаговым двигателям, равно 255.

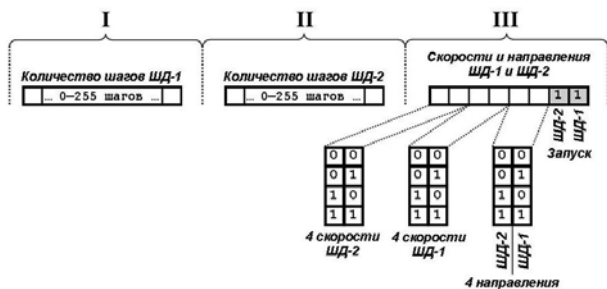


Рисунок 2 – Структура пакета данных

При минимальном количестве шагов, равном нулю, двигатели не будут вращаться. Третья часть пакета данных содержит скорости и направления вращений ШД-1 и ШД-2. Первый и второй биты являются «флагами» запуска двигателей, поэтому всегда установлены в единицу. Третий и четвертый биты отвечают за направления вращений двигателей и определяют 4 направления движения каретки прибора, являющиеся комбинациями направлений вращений двух двигателей. Комбинации значений 5-го и 6-го битов дают четыре значения скорости для первого ШД, а комбинации значений 7-ого и 8-ого – четыре скорости для второго ШД. Следовательно, комбинацией 4-х скоростей ШД-1 и 4-х скоростей ШД-2 можно получить 16 скоростей движения каретки относительно рабочей поверхности. Флаги запуска двигателей, направления вращений и скорости объединяются в одно восьмибитное число, и вместе с количествами шагов для двигателей образуют необходимый пакет данных, отправляемый через COM-порт в микроконтроллер.

В данном приложении также организовано рисование стандартных геометрических объектов и фигур, таких как прямая, эллипс (или дуга). Это приложение также позволяет сохранять координаты точек построенных фигур в текстовом формате, а также в дальнейшем открывать их для многократного использования.

Designed software for control the two-coordinate machine with computer numeric control based on a microcontroller.

Лавыш Андрей Валентинович, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, andrewlavysh@mail.ru.

*Никито Алексей Вячеславович*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, NikitoAV@mail.ru.

Научные руководители – *Маскевич Александр Александрович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, amaskevich@grsu.by.

*Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by.

УДК 29436

*А.С. Макарский*

## **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЛИТЬЕВЫХ ПРЕСС-ФОРМ**

Исследовано использование компьютерных программ при конструировании литьевой оснастки, а так же моделирование физических процессов и анализ полученных данных. Дана оценка возможности изготовления полимерных изделий с использованием холодноканальной и горячеканальных литниковых систем.

Методом литья под давлением производится более трети от общего объема изделий из полимерных материалов. В процессе придания формы изделию используется специальная дорогостоящая оснастка – литьевая пресс-форма. Современное программное обеспечение позволяет повысить качество проектирования оснастки и сократить сроки её изготовления. В качестве программной среды используются САПР – системы автоматизированного проектирования [1].

Современные САПР включают в себя системы автоматизированного конструирования, анализа и подготовки производства. Системы конструирования помогают в разработке конструкции пресс-формы, оптимизации расположения и типа литниковой системы, толкателей и других элементов. Системы анализа позволяют провести расчёт и моделирование физических процессов, происходящих внутри пресс-формы. Используя системы анализа можно получить информацию о [2]: деформации плит пресс-формы;

распределении температур внутри оснастки; анализе течения полимерного расплава и т.д.

В данной работе наибольший интерес представляют системы компьютерного анализа, т.к. они позволяют при помощи расчётных методов оценить, как поведёт себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации, помогают убедиться в работоспособности изделия без привлечения больших затрат времени и средств. Для моделирования процесса литья термопластов применяются фундаментальные законы механики и термодинамики [3].

Рынок САПР для анализа литья пластмасс предлагает большой выбор программ, лидирующее место среди которых занимает *MoldFlow* компании *Autodesk*. Данная система включает автоматизированные алгоритмы прогнозирования возникновения дефектов отливки при заполнении пресс-формы [4].

Основной задачей настоящей работы является сравнение эффективности применения холодноканальной и горячеканальных литниковых систем, и на основании выбора конкретной литниковой системы – конструирование литьевой пресс-формы для изготовления изделий типа «дюбель-зонтик» (рисунок 1).

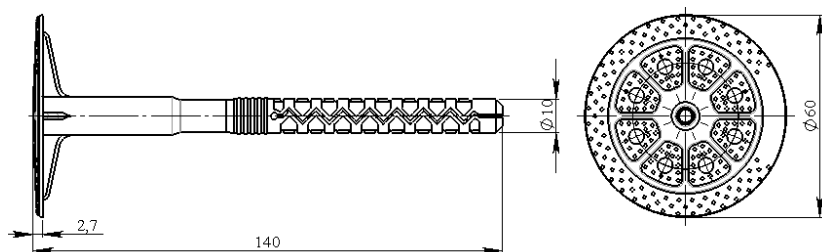


Рисунок 1 – Чертёж изделия «дюбель-зонтик»

На сегодняшний день имеются следующие основные типы литниковых систем: холодноканальные с затвердевающими литниками; горячеканальные с внутренним обогревом (*Cold – One*); горячеканальные с наружным обогревом (*Hot – One*). Каждая из перечисленных систем имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретной системы влияет на конструкцию оснастки.

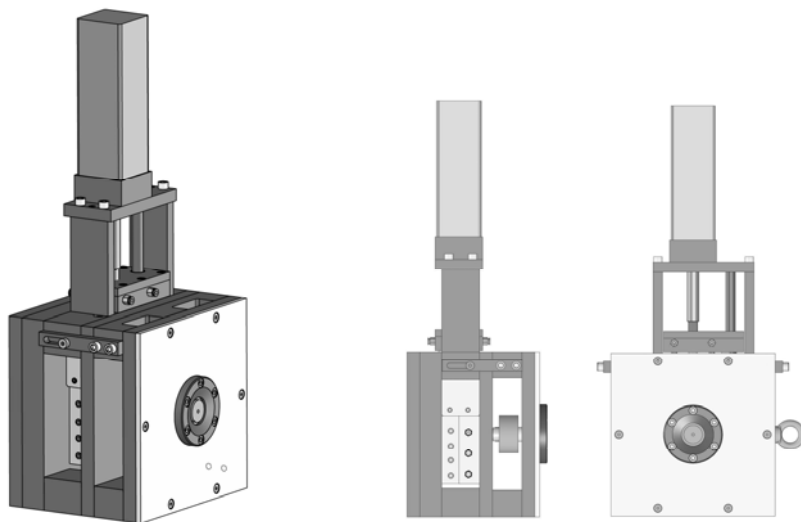
Объектом компьютерных испытаний выбрана трёхмерная модель двух полимерных изделий. Нами были построены соответствующие трёхмерные литниковые системы, заданы начальные условия и проведены компьютерные испытания. На первой стадии на моделях были определены места расположения точек впрыска пластмассы, и построены необходимые системы расположения литниковых каналов. На второй стадии проведён анализ заполнения моделей полимерным материалом. Важным результатом испытаний является то, что использование горячеканальной системы с наружным обогревом по сравнению с другими позволяет уменьшить давление впрыска термопластавтомата на 22%, а усилие смыкания на 25%. При снижении этих значений мы можем снизить энергопотребление литьевой машины.

Полученные данные были применены при проведении натурных испытаний на термопластавтомате *Engel\_Victory\_500/120*. После уменьшения давления впрыска на 22% и усилия смыкания на 25%, мы добились снижения энергопотребления за один рабочий цикл на 0,0017 кВт·ч и 0,0033 кВт·ч соответственно, что в сумме даёт 0,005 кВт·ч. Изделия типа «дюбель-зонтик» производятся крупными сериями, таким образом, при производстве 100 000 изделий экономия электроэнергии составляет 250 кВт·ч.

На основании данных компьютерного анализа и выбора литниковой системы была сконструирована трёхмерная модель горячеканальной литьевой пресс-формы. Конструирование проводилось в программе *SolidWorks*. Определённые на первом этапе компьютерных испытаний места расположения впускных литников, определили расположение всех элементов оснастки (рисунок 2).

Таким образом, при использовании программных продуктов мы можем не только добиваться наилучших характеристик изготавливаемых изделий, а также выбирать наиболее экономически выгодный способ их производства.





**Рисунок 2 – Компьютерная модель литейной пресс-формы**

*Список литературы*

1. САПР // Независимый информационный портал CADобзор [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://cadobzor.ru/САПР>. – Дата доступа : 10.11.2011.
2. Глобальные изменения рынка программных продуктов для компьютерного анализа процесса литья под давлением полимерных материалов / И.А. Барвинский, И.Е. Барвинская // Литьё пластмасс [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: [http://www.barvinsky.ru/articles/art\\_041\\_global\\_market\\_of\\_cae\\_2010.htm](http://www.barvinsky.ru/articles/art_041_global_market_of_cae_2010.htm). – Дата доступа: 21.10.2011.
3. Проблемы горячеканального литья под давлением деталей из термопластов / И.А. Барвинский, И.Е. Барвинская // Литьё пластмасс [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: [http://www.barvinsky.ru/articles/art\\_044\\_temperature\\_in\\_hot\\_runners\\_mold.htm](http://www.barvinsky.ru/articles/art_044_temperature_in_hot_runners_mold.htm). – Дата доступа : 25.10.2011.
4. MoldFlow – Возможности и демонстрация проектов деталей из пластмассы // Autodesk [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.autodesk.ru/adsk/servlet/pc/index?siteID=871736&id=14659045>. – Дата доступа: 25.09.2011.

This work shows how to use the computer software for the design of the mold. Conducted the computer analysis of molding polymer products with cold and hot runner gating systems.

Макарский Александр Сергеевич, студент Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, san3d@mail.ru.

Научный руководитель – Минаев Сергей Геннадьевич, магистр, главный конструктор ООО «Молдер», Гродно, Беларусь, minaevs@molder.by.

УДК 621.396

*А.М. Миклашевич, Б.А. Ассанович, Т.А. Ситкевич*

## УПРАВЛЕНИЕ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ ВИДЕОПРОЦЕССОРА ПРИ ПОМОЩИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Разработана аппаратная реализация обработки M-JPEG изображения в компрессированной форме и исследована его максимальная скорость считывания и обработки на практике.

Видеопроцессор на основе STV0676 выполняет функции восприятия и кодирования изображения, и используется для идентификации объекта. Изображение объекта обрабатывается видеопроцессором и передается в параллельном коде на микроконтроллер PIC16F876, осуществляющий применение данных от видеопроцессора и передачу их на персональный компьютер. Структурная схема обработки данных представлена на рисунке 1.

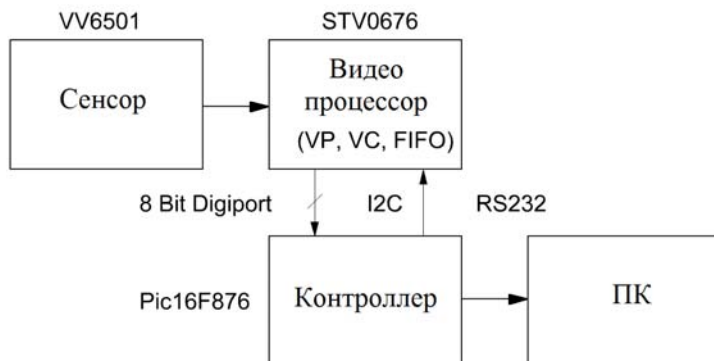


Рисунок 1 – Блок-схема обработки видеоданных объекта

Процессор состоит из 3 элементов: видеопроцессора (VP), видеокомпрессора (VC), буферной памяти FIFO. Видеопроцессор обрабатывает данные сенсора с использованием преобразования видеоданных в M-JPEG формат, который представляет собой серию изображений. При сжатии изображения 20:1, изображение VGA формата 640x480 размером 614000 байт будет занимать 30720 байт.

Программирование видеопроцессора осуществляется при помощи шины I2C при доступе к 3 банкам его памяти, содержащей управляющие регистры. Запись значений и их верификация показана на рисунке 2.

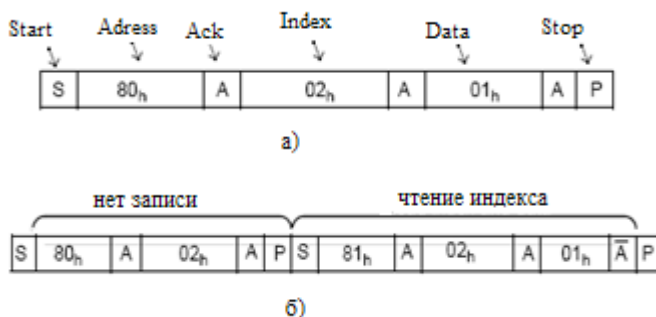


Рисунок 2 – Запись (а) и верификация данных (б)

При этом контроллер выступает в роли мастера устройства, а видеопроцессор – в роли slave устройства. Для установки значений регистров используется ввод их значения с клавиатуры персонального компьютера, что позволяет исключить необходимость дополнительного подключения кнопочной клавиатуры к контроллеру. Данные видеопроцессора в параллельном виде записываются в контроллер, преобразуются в последовательный код и передаются через USART на выход для считывания управляющей программой персонального компьютера.

Определение режимов работы видеопроцессора осуществляется при помощи органов управления видеопроцессора, а использование контроллера реализуется при помощи программирования его работы на высокоуровневом языке BASIC PROTON.

В результате анализа блок-схемы (рис. 1) была построена модель ее обработки в среде Proteus (рис. 3). При стробировании считывания данных от видеопроцессора с частотой не менее 600 кГц реализуется запись данных в персональный компьютер на скорости 57600 б/с. На следующем этапе работы осуществляется анализ данных изображения, полученных от видеопроцессора с целью реализации алгоритмов идентификации объекта.

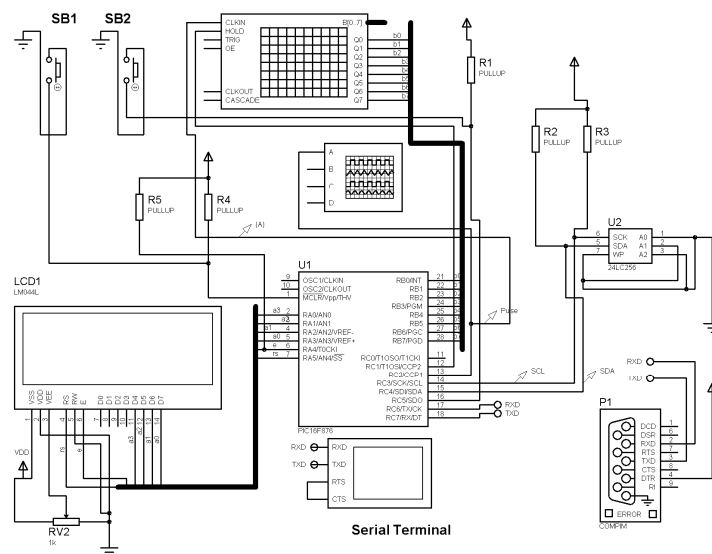


Рисунок 3 – Модель обработки данных в среде Proteus

Hardware realization of M-JPEG image processing in compressed domain was performed and its bit rate as well as practical application have been studied.

*Миклашевич Андрей Мечиславович*, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

*Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, bas@grsu.by.

*Ситкевич Татьяна Анатольевна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, bas@grsu.by.

УДК 621.396

*А.М. Миклашевич, Б.А. Ассанович, Т.А. Ситкевич*

## **ВЫДЕЛЕНИЕ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА ИЗ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЦВЕТОВЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Предложен метод распознавания человеческого лица на основе анализа цветовых и геометрических параметров изображения в YCbCr пространстве и продемонстрирована его практическая применимость в Matlab.

Обнаружение лица человека играет важную роль в видеонаблюдении, распознавании лиц в управлении базами данных. Многие исследования по обнаружению лица объединили в себе ряд алгоритмов, использующих его геометрию и цветовой фон. Преимуществами этих методов являются быстрота, высокая степень обнаружения и возможность работать с лицом в сложной форме.

В связи с представлением YCbCr преобразование цветового пространства каждое изображение имеет различное распределение цвета. Вычисление средней яркости  $Y_{\text{avg}}$  входного изображения определяется как:

$$Y_{\text{avg}} = \sum Y_{i,j}, \quad (1)$$

где  $Y_{i,j} = 0.3R + 0.6G + 0.18B$ .

Предлагаемый метод основывается на выделении объектов на основе цветового восприятия кожи человека и соотношению геометрических размеров элементов лица. Метод включает в следующие шаги:

1. Компенсация яркости и преобразование цветового пространства.

2. Выделение цвета кожи и НЧ фильтрация.
3. Предполагаемые области и определение их размеров.
4. Выделение области, имеющих губы и глаза человека.

Компенсация изображения  $C_{ij}$  определяется следующими уравнениями:

$$R'_{ij} = (R'_{ij})^{\tau} \quad (2)$$

$$G'_{ij} = (G'_{ij})^{\tau} \quad (3)$$

$$C_{ij} = \{R'_{ij}, G'_{ij}, B_{ij}\}, \quad (4)$$

где

$$\tau = \begin{cases} 1.4, & Y_{\text{avg}} < 64 \\ 0.6, & Y_{\text{avg}} > 192 \\ 1. & \end{cases}$$

Используется компенсация цвета R и G.  $C_r$  определяется как:

$$C_r = 0.5R' - 0.41G' - 0.081B'. \quad (5)$$

В соответствии с  $C_r$  цвет человеческой кожи определяется следующим образом:

$$S_{ij} = \begin{cases} 0, & 10 < C_r < 45 \\ 1. & \end{cases} \quad (6)$$

После исследования изображения получаем несколько участков, которые могут быть человеческим лицом. Определяются функция высоты к ширине для рта и глаз. Для обнаружения пикселей каждого участка используется угол  $\theta$  [1]:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{0.5(2R' - G' - B)}{\sqrt{(R' - G')^2 + (R' - B)(G' - B)}} \right). \quad (7)$$

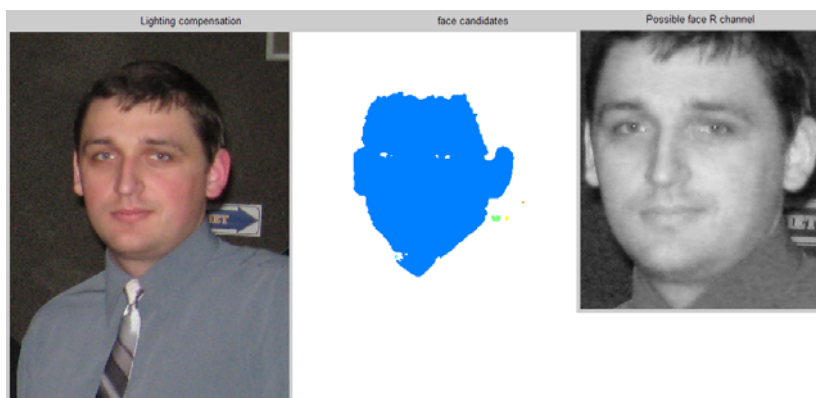
Наличие пикселя определяются как часть рта из матрицы M:

$$M_{pq} = \begin{cases} 0, & 0 < 90 \\ 1. & \end{cases} \quad (8)$$

После обнаружения координат губ, вычисляются координаты глаз. Человеческий глаз можно обнаружить по яркости цвета кожи:

$$E_{hw} = \begin{cases} 0, & 65 < Y < 80 \\ 1. & \end{cases} \quad (9)$$

Пример обнаружения показан на рисунке, где приведены исходное изображение, выделение цветовой разности кожи и найденная область лица.



**Рисунок – Пример обнаружения лица человека**

Face Recognition method with the use of colour and geometric parameters in YCbCr space is proposed and its application for frame detection with human face with the help of Matlab is demonstrated.

*Миклашевич Андрей Мечиславович*, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

*Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, bas@grsu.by.

*Ситкевич Татьяна Анатольевна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной электроники Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Ассанович Борис Алиевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, bas@grsu.by.

УДК 65.011 (076)

*А.В. Никито*

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Работа посвящена разработке и изготовлению универсального высоковольтного генератора, с использованием умножителя напряжения. Устройство может быть использовано в учебно-демонстрационных целях, в радиационных исследованиях, для накачки лазеров, в искровых камерах и т. п. Генератор может быть использован в озонаторах для получения озона с помощью коронного разряда.

Генератор высокого напряжения построен на базе ШИМ преобразователя с частотой 33 кГц, в основе которого лежит специализированная микросхема MC34063A [1], содержащая в себе таймер и цепи управления ключевым транзистором с учетом обратной связи. Также осуществляется контроль перегрузки по току и мягкий запуск. Импульсы, вырабатываемые микросхемой, управляют мощным полевым транзистором, который в свою очередь коммутирует первичную обмотку повышающего трансформатора.

Повышающий трансформатор – доработанный трансформатор строчной развертки ТВС-110ПЦ15 от телевизора, у которого удалена первичная обмотка, вместо нее намотана новая: 15 витков медного провода, диаметром 1 мм.

Оконечным звеном высоковольтного генератора является умножитель напряжения УН9/27 [2], который в три раза увеличивает и выпрямляет напряжение с вторичной обмотки трансформатора.

Электрическая часть схемы играет роль преобразователя низкого напряжения питания, в высокое выходное напряжение, порядка 27 кВ. Напряжение питания генератора  $12\text{В} \pm 2\text{В}$ . Потребляемый ток варьируется в пределах 0,5–6 А, в зависимости от режима работы.

Генератор высокого напряжения получил применение в учебно-демонстрационных целях при проведении экспериментов с высоким напряжением: пробой воздушного зазора электрической дугой, плазменный шар, лестница Якова, ионный двигатель [3].

### *Список литературы*

1. Datasheet MC34063A. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fairchildsemi.com/ds/MC/MC34063A.pdf>. – Дата доступа: 20.04.2011.



2. Умножители напряжения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.qrz.ru/schemes/contribute/digest/bp30.shtml>. – Дата доступа: 18.04.2011.
3. Опыты с высоким напряжением – Технический форум. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tehnari.ru/fl117/t57097/>. – Дата доступа: 20.04.2011.

A universal high-voltage generator, the main characteristics of which are low cost, easy, affordable electronic components.

*Никито Алексей Вячеславович*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы Гродно, Беларусь, [NikitoAV@mail.ru](mailto:NikitoAV@mail.ru).

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [german@grsu.by](mailto:german@grsu.by).

УДК 65.011 (076)

*А.В. Никито, А.В. Лавыш*

## **УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СТАНКА С ЧПУ**

Создан универсальный контроллер шагового двигателя для станка с ЧПУ, позволяющий управлять двумя шаговыми двигателями, при перемещении рабочего инструмента в плоскости X-Y.

Универсальный контроллер – это высокопроизводительный двухкоординатный контроллер перемещений. Двухканальный контроллер управляет четырехфазными шаговыми двигателями с максимальным током до 3А на обмотку. Устройство отвечает за правильную работу двигателей. Контроллер является промежуточным звеном между двигателями и персональным компьютером.

Использование микроконтроллеров в системах управления обеспечивает достижение исключительно высоких показателей функциональность/стоимость. В основе универсального контроллера шагового двигателя лежит микроконтроллер AT89C2051 семейства MCS-51 [1]. Микроконтроллеры фирмы Atmel серии AT89 обладают широкими возможностями и всем необходимым для решения

поставленной задачи. Программа микроконтроллера формирует на его выводах импульсы и задержки определенной длительности, которые в свою очередь управляют вращением шаговых двигателей. Микроконтроллер осуществляет контроль за сигналами от датчиков граничного положения и организует связь с персональным компьютером для обмена данными.

Прием и передача информации осуществляется через универсальный асинхронный приемопередатчик. Для согласования напряжений и логических уровней COM-порта и UART микроконтроллера используется микросхема MAX232 [2]. Управление двигателями происходит с помощью трех байт данных, которые представляют собой количество шагов для первого шагового двигателя, количество шагов для второго шагового двигателя и направление их вращения. Третий байт помимо направления, определяет скорость вращения. Скорость приема-передачи составляет 9600 бит/с.

Данный универсальный контроллер шагового двигателя может быть доработан до трехкоординатного, путем установки блока управления третьим шаговым двигателем. Для этого на печатную плату установлены специальные разъемы.

Напряжение питания универсального контроллера шагового двигателя 5 В, потребляемый ток не превышает 400 мА. Напряжение питания шаговых двигателей не должно превышать 30 В, с максимальным током на одну обмотку до 3 А.

#### *Список литературы*

1. Микроконтроллеры семейства MCS-51 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.radiodod.ru/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=78&Itemid=34](http://www.radiodod.ru/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=78&Itemid=34). – Дата доступа: 10.11.2011.
2. Datasheet на MAX232 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://avrlab.com/upload\\_files/max232\\_datasheet.pdf](http://avrlab.com/upload_files/max232_datasheet.pdf). – Дата доступа: 14.12.2011

A universal controller for stepper motor CNC machine that allows you to control two stepper motors, carrying out the movement of the working tool in the plane XY

*Никито Алексей Вячеславович*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы Гродно, Беларусь, [NikitoAV@mail.ru](mailto:NikitoAV@mail.ru).

*Лавыш Андрей Валентинович*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы Гродно, Беларусь, [s\\_andrex@mail.ru](mailto:s_andrex@mail.ru).

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [german@grsu.by](mailto:german@grsu.by).

УДК 004

*А.А. Самосюк*

## **АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ВИРТУАЛЬНЫХ КОМАНД**

Введено понятие виртуальной команды, проанализированы возможности виртуальной групповой работы. Определены основные функции систем поддержки совместной работы, рассмотрены уровни и подсистемы. Выявлены особенности использования систем поддержки совместной работы.

В современных условиях для проведения научных исследований требуется привлечение к работе высококвалифицированных, узкоспециализированных специалистов, зачастую разобщенных географически. Организация работы в подобных случаях требует применения новейших информационных технологий и использования специфических подходов к организации работ в форме виртуальной команды.

Виртуальная команда – группа лиц с общими целями, выполняющих свои роли, которые в процессе сотрудничества практически не общаются лично.

Виртуальная групповая работа предоставляет следующие возможности:

- использовать в команде проекта специальные экспертные знания без привязки к географическому региону;
- формировать команды из исполнителей, работающих в разные смены или часы;
- выполнять работы, реализация которых в иных условиях была бы невозможной из-за высоких командировочных расходов.

В силу того, что коммуникации занимают до 90 % от всего времени, выделяемого на проект, наибольшее значение для успешной работы виртуальной команды приобретает планирование коммуникаций. При этом перед руководителем стоит сложная задача осуществления процесса управления таким образом, чтобы совместная работа была

слаженной и эффективной. Построение системы поддержки совместной работы является ключевым элементом управления виртуальной командой.

Технологии, применяемые в системах поддержки совместной работы, можно разделить по уровням:

1. Уровень архитектуры: клиент-серверная, р2р.
2. Уровень сети: проводные, беспроводные, локальные, глобальные сети.
3. Уровень устройств доступа: персональный компьютер, ноутбук, смартфон, устройства виртуальной реальности.
4. Уровень программного обеспечения (ПО).

В составе системы поддержки совместной работы можно выделить следующие подсистемы:

1. Подсистема передачи текстовой информации: электронная почта, средства обмена мгновенными сообщениями, чат, форум.
2. Подсистема передачи аудиовизуальной информации: телефонные звонки, IP-телефония, видеоконференции, веб-конференции, веб-презентации.
3. Подсистема автоматизации коллективной работы включает: подсистемы управления проектами и портфелями проектов, персональные информационные менеджеры, подсистемы хранения и обмена знаниями (вики, файлохранилища, подсистемы управления версиями и т.д.), корпоративные порталы.

Использование системы поддержки совместной работы имеет свои особенности:

1. Требуется высокий уровень компетентности в сфере информационных технологий руководителя и всей команды в целом.
2. Различный стиль работы людей обуславливает специфические коммуникативные потребности и, как следствие этого, различный уровень комфорта при использовании одних и тех же электронных средств коммуникаций разными людьми.
3. Существует вероятность возникновения чувства изоляции у членов команды при недостаточном уровне коммуникаций и неграмотном использовании имеющихся информационных средств.
4. К участникам команды предъявляются высокие требования по самодисциплине.

Построение системы является лишь одним из условий эффективной работы. Помимо этого, руководителю необходимо: на начальном этапе работ ясно сформулировать цели и задачи всего проекта; мотивировать

участников на достижение положительного результата; своевременно и точно оценивать эффективность коммуникаций при использовании выбранных электронных форм совместной работы, оперативно реагировать на изменения в поведении команды. Для эффективной работы критически важно, чтобы были четко налажены процессы управления, согласно принятой методологии или стандартам управления проектами.

В результате анализа систем поддержки совместной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. Системы поддержки совместной работы выполняют три основные функции: обеспечение коммуникации; обеспечение координации; предоставление общего доступа к ресурсам и обмен знаниями.

2. Обеспечение базовых функций может быть достигнуто путем использования различного набора программных средств и технологий, а именно: ПО совместной работы, обеспечивающего взаимодействия между участниками проекта; специализированного ПО, предназначенного для выполнения прикладных задач.

#### *Список литературы*

1. Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK). – 4-е изд. – Project Management Institute, 2008. – 463 с.
2. Лушинский, В. Расстояние – не помеха. Построение виртуальных ИТ-команд [Электрон. ресурс] // IT Manager. – 2009. – №11. – С. 12-16. – Режим доступа: <http://www.it-world.ru/news/articles/139601.html>. – Дата доступа: 05.02.2012.
3. Byatt, G. Managing a Virtual Project Team / G. Byatt, G. Hamilton, J. Hodgkinson [Electronic resource] // American Society for the Advancement of Project Management (ASAPM). – 2010. – Mode of access: <http://asapm.org/asapmag/articles/VirtualTeams.pdf>. – Date of access: 05.02.2012.
4. Encyclopedia of e-collaboration / ed. N. Kock. – Information Science Reference, 2008. – 725 p.

The concept of the virtual team is introduced. The possibilities of the virtual teamwork are analyzed. The main functions of the collaboration support systems are defined, and the levels and subsystems are considered. The peculiarities of the use of the collaboration support systems are found out.

*Самосюк Андрей Александрович*, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, a.samosuk@grsu.by.

Научный руководитель – *Волчок Валерий Александрович*, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, wwa@grsu.by.

УДК 539.2, 620.3

*С.И. Саросек*

## ПОЛУЧЕНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «ЖАДНОГО» АЛГОРИТМА

Показано что в рамках плотнейших упаковок построить объёмную структуру, включающую только тетроздральные пустоты невозможно. Использование на основании атомных тетраэдров можно построить линейчатые структуры висцерного типа, разветвления которых приводят к структурам типа фрактальных кластеров. Аналогичные системы могут быть построены на основе структурных атомных октаэдров.

Во второй половине прошлого века и физики технологи стали уделять большое внимание анализу свойств кристаллов, получение наноматериалов. Для этих целей применяют один из методов «снизу-вверх».

Методом «снизу-вверх» можно создавать объекты, которые не существуют в природе, и создавать из них блоки наноматериалов. Для наноразмерных наночастиц справедливы принципы плотнейших упаковок [1].

**Принципы плотнейших упаковок.** Плотнейшие шаровые упаковки при сохранении решеточной симметрии могут существовать в двух вариантах. На рисунке 1а показана гранецентрированная кубическая упаковка (ГЦК). На рисунке 1б показана гексагональная плотная упаковка (ГПУ) [2].



Рисунок 1 – Плотнейшие упаковки: ГЦК (а), ГПУ (б)

Во всех указанных случаях между шарами в упаковках имеются пустоты, координированные либо шестью шарами, либо четырьмя. В первом случае центры шаров соединённые прямолинейными отрезками формируют октаэдр, и пустота называется октаэдрическая, а во втором центры четырех шаров формируют тетраэдр, то есть пустота тетраэдрическая.

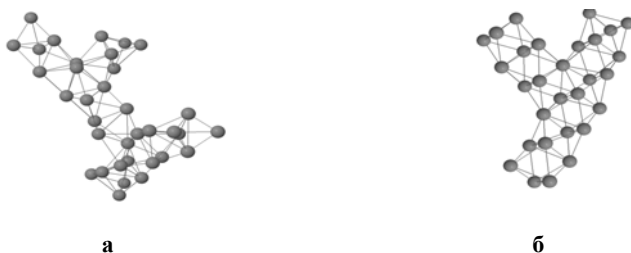
**Получение фрактальных структур.** Одним из параметров, которым характеризуют взаимоположение атомов в плотнейшей упаковке является коэффициент компактности, который равен отношению объема шаров, к общему объему системы и равен 0,74 для данных упаковок.

Мы стремились рассматривать наиболее плотную упаковку. Так как тетраэдрическая пустота меньше чем октаэдрическая, была предложена методика упаковки шаров по тетраэдрической схеме. Тетраэдральная конфигурация является плотнейшей упаковкой четырёх шаров в пространстве, данная конфигурация показана на рисунке 2а.

Построение объекта выполнялось с использованием «жадного» алгоритма. Используя данную конфигурацию невозможно заполнить все пространство. Стратегия упаковки шаров в тетраэдральные комплекты до тех пор, пока это возможно, приводит к тому, что наступает ситуация когда возникает такая конфигурация шаров, которая уже неспособна «поглотить» очередной шар без увеличения просвета между ними.

Такая упаковка шаров известна как «жадный» алгоритм. Очевидно «жадный» алгоритм порождает оптимальную упаковку шаров в небольшой области, размеры которой не превосходят нескольких их диаметров. Это, в конечном счете, приводит к коэффициенту компактности меньше чем 0,74.

Построить по тетраэдральному мотиву сплошную конструкцию невозможно, но грани тетраэдров на начальной цепочке могут служить создания ответвлений (рис. 2 а). На каждый из этих ответвлений может возникнуть новая ветвь, то есть создается конструкция фрактального кластера. Аналогично, структуру можно получить при соединении структурных октаэдров их общей гранью. Цепочка таких октаэдров, как и цепочка тетраэдров, может иметь макроскопические размеры, то есть и в первом и во втором случае возникает структуры типа вискерев, как и для тетраэдральной конструкции цепочки октаэдров могут создавать фрактальные кластера, как это показано на рисунке 2 б.



**Рисунок 2 – Фрактальные кластера: основании атомных тетраэдров (а), на основании атомных октаэдров (б)**

Проведённые исследования показали, что на основании атомных тетраэдров или на основании атомных октаэдров пространственные структуры построить невозможно показано, что из этих отдельно взятых атомных структурных полиэдров можно построить атомные конфигурации висцерного типа. Разветвления этих вискерев возможно в обоих указанных слоях при этом будут созданы структуры фрактальных кластеров. Подчеркивается, что коэффициент компактности шаровых упаковок для структурных полиэдров указанных типов рассчитывать только с учетом частей шаров, входящих в полиэдр, не корректен. Расчет этих коэффициентов должен учитывать минимальный объем, в котором может размещаться рассматриваемые структуры.

#### *Список литературы*

1. Фейнман, Р.Ф. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики / Р.Ф. Фейнман // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2002. – Т. XLVI. – № 5.
2. Конвей, Дж. Упаковка шаров, решетки и группы: В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. / Дж. Конвей, Н. Слоэн. – М.: Мир. – 1990. – 415 с.



When creating polymer composites nanomodifikatorami necessary to achieve a uniform distribution of nanoparticles in the matrix base. This is achieved either by mixing the particles of the polymer granules nanomodifikatora, or a mix is diluted in the polymer. It is shown that in both cases, the formation of clusters of particles nanomodifikatora by electrostatic interaction between them.

*Саросек Станислав Иосифович*, аспирант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, s.sarosek@grsu.by.

Научный руководитель – *Лиопо Валерий Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, liopo@grsu.by.

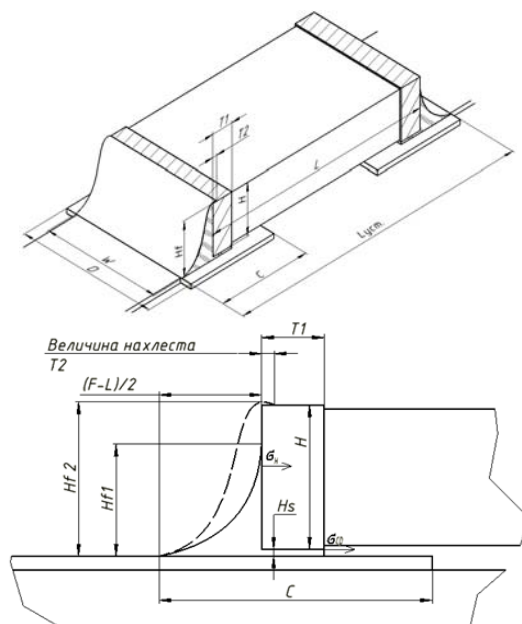
УДК 621.38.002.72

*Е.А. Степанькова, Д.М. Тимошков*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЯХ С ПОВЕРХНОСТНЫМ МОНТАЖОМ**

Предложены математические выражения и получены зависимости прочности паяных соединений различных типов поверхностно-монтируемых элементов бессвинцовыми припоями в электронных модулях.

Формирование паяных соединений при поверхностном монтаже SMD компонентов предусматривает нанесение определенного объема паяльной пасты и ее оплавление при нагреве [1]. Параметры паяного соединения, полученного оплавлением припойной пасты, определяются геометрическими размерами SMD, знакоместа и трафарета для нанесения пасты (рис. 1).



**Рисунок 1 – Параметры паяного соединения**

Обозначения на рис. 1 следующие:  $C$  – длина окна трафарета;  $D$  – ширина окна трафарета;  $L_{уст}$  – расстояние между контактными площадками;  $W$  – ширина компонента;  $L$  – длина компонента;  $H$  – высота компонента;  $H_f$  – высота гантели паяного соединения;  $T_1$  – длина металлизированного контакта компонента;  $T_2$  – величина нахлеста;  $F$  – длина площади растекания.

Используемые паяльные пасты на основе Sn с содержанием металла до 90% имеют плотность  $4,42 \text{ г/см}^3$ , а плотность оплавленного припоя –  $8,12 \text{ г/см}^3$ . Объем оплавленной паяльной пасты может быть выражен как:

$$V_w = (\rho_1 \cdot \delta) / (\rho_2) \cdot (H_w \cdot (D \cdot C) \cdot R), \quad (1)$$

где  $H_w$  – толщина пасты,  $(D \cdot C)$  – площадь контакта для пайки;

$R$  – отношение между размерами ячейки трафарета и платы;

$\rho_1$  – плотность паяльной пасты;

$\rho_2$  – плотность оплавленного припоя;

$\delta$  – процентное содержание металла в паяльной пасте.

Для расчетов  $R$  примем равным 1, тогда выражение (1) примет вид

$$V_w = 0,94H_w \times (D \times C), \quad (2)$$

где  $D$  и  $C$  представляют собой длину и ширину контакта.

$H_{f1}$  и  $H_{f2}$  обозначают соответственно высоты галтели при меньшем и большем количестве припойной пасты. Общий объем пасты может быть выражен как:

$$(V) = W \times ((H + H_s) \times (F - L) / 2 \times 1 / 2 + T_1 \times H_s), \quad (3)$$

где  $H_s$  – среднее значение высоты компонента над контактной площадкой в пасте.

При расчете объема оплавленного припоя форма галтели учитывалась как треугольная, для упрощения решения задачи. Приравняв выражения (2) и (3), выражаем  $H_f$

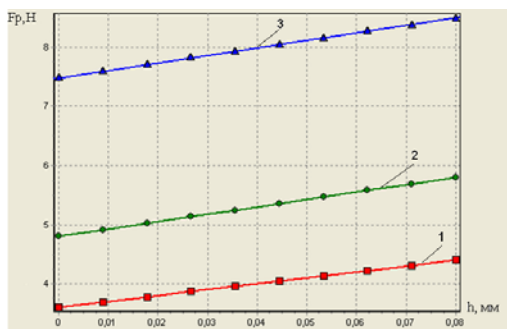
$$H_f = \left( \frac{0,49H_w DC}{W} - H_s T_1 \right) \times \frac{4}{F - L}. \quad (4)$$

Прочность паяного соединения будет определяться как величиной растягивающего, так и касательного напряжения:

$$F_p = H_f W \sigma_B + W(T_1 + T_2) \sigma_{cp}, \quad (5)$$

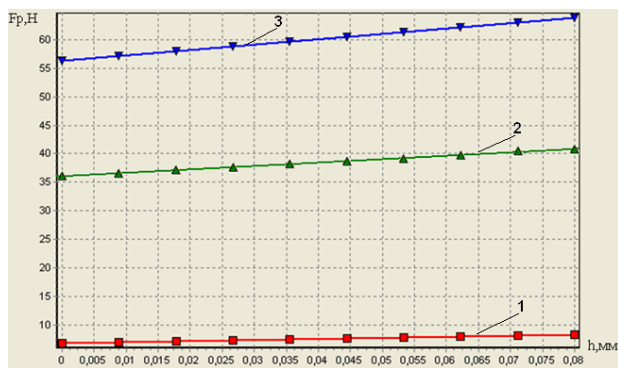
где  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{cp}$  – критические значения растягивающего и касательного напряжения.

Используя разработанную программу моделирования в Delphi, получили зависимости прочности паяных соединений для различных типов SMD и бессвинцовых припоев (рис. 2, 3).



**Рисунок 2 – Зависимости прочности паяного соединения для корпуса типа 0603: 1 – 99.3Sn/0.7Cu, 2 – 96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu, 3 – 91Sn/9Zn**

Исходя из результатов моделирования, можно заключить, что припой 91Sn/9Zn будет обеспечивать наибольшую прочность паяного соединения, но он более других склонен к окислению. Поэтому для электронных модулей с поверхностным монтажом рекомендуется припой 96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu. С увеличением типоразмера элемента растет объем оплавленной паяльной пасты и соответственно прочность соединения.



**Рисунок 3 – Зависимости прочности паяного соединения припоя 96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu для типоразмеров SMD: 1 – C0805, 2 – C1210, 3 – C1808**

При поверхностном монтаже электронных модулей бессвинцовыми припоями прочность паяных соединений зависит как от типоразмера элемента, так и от используемого припоя.

#### *Список литературы*

1. Кундас, С.П. Технология поверхностного монтажа / С.П. Кундас [и др.]. – М.: «Армита – Маркетинг, Менеджмент» 2000. – 352 с.

*Степанькова Елена Александровна*, магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, [Stepankovalena@tyt.by](mailto:Stepankovalena@tyt.by).

*Тимошков Дмитрий Михайлович*, студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.

Научный руководитель – *Ланин Владимир Леонидович*, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, [vlanin@bsuir.by](mailto:vlanin@bsuir.by).

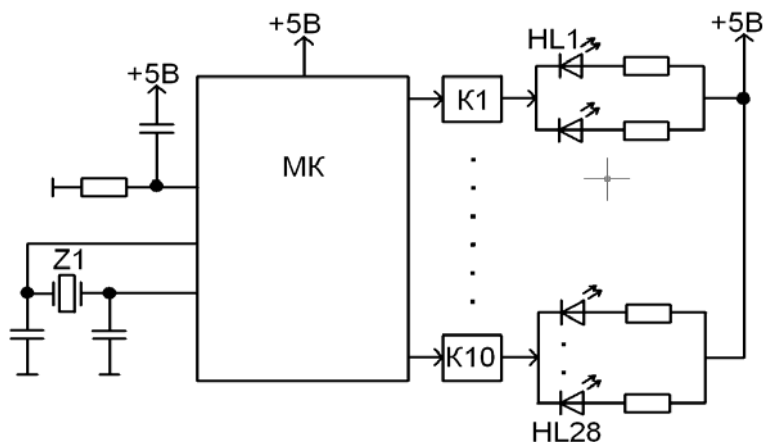
УДК 621.383

*Ю.Ю. Тарасюк, Ю.В. Рекеть*

## МАКЕТ РЕГУЛИРУЕМОГО ПЕРЕКРЁСТКА НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ AT89C2051

Разработан и изготовлен учебный макет регулируемого перекрёстка на микроконтроллере AT89C2051, с помощью которого можно наглядно изучать принципы построения автоматизированных управляющих систем, архитектуру и основы программирования на языке ассемблера микроконтроллеров семейства MCS-51.

Основой изготовленного макета регулируемого перекрёстка является микроконтроллер (МК) AT89C2051 [1].



**Рисунок – Структурная схема макета регулируемого перекрёстка**

Кварцевый резонатор Z1 определяет частоту встроенного тактового генератора микроконтроллера. Выходные сигналы с выводов микроконтроллера поступают на электронные ключи (K1-K10), в качестве которых служат транзисторы КТ315. С выхода ключа сигнал поступает на светодиоды (HL1-HL28) отдельных светофоров (красные, жёлтые, зелёные), управляя ими. Макет содержит 12 светофоров.

Напряжение питания макета +5В при потреблении тока управления не более 70 мА.

Контроллер устройства изготовлен на плате из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита размером 130×90 мм.

Разработанный учебный макет регулируемого перекрёстка планируется использовать в лабораторном практикуме по курсу «Основы робототехники».

*Список литературы*

1. Белов, А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах: / А.В. Белов. – СПб.: Наука и техника, 2005. – 256 с.
2. Светофор на ATtiny13. [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: file:///localhost/D:/rep/Светофор%20на%20ATtiny13.mht – Дата доступа: 22.01.2011.

The educational model of the managed crossing is worked out and made on the microcontroller of AT89C2051, by means of which it is possible evidently to study principles of construction of managing CASS, architecture and bases of programming in assembly language of microcontrollers of family of MCS - 51.

*Тарасюк Юрий Юрьевич*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, jura-tarasjuk@mail.ru.

*Рекетъ Юрий Владимирович*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, Reket-jura@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель проректора по научной работе и инновациям, начальник научно-исследовательской части, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы; Гродно, Беларусь, german@grsu.by.

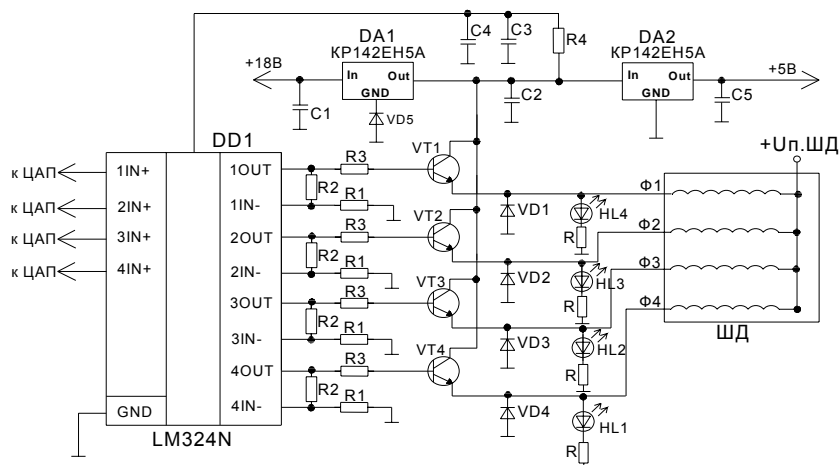
УДК 65.012

*Ю.Ю. Тарасюк*

## **БЛОК СОПРЯЖЕНИЯ ЧЕТЫРЁХКАНАЛЬНОГО ЧЕТЫРЁХРАЗЯДНОГО ЦАП С ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Разработан и изготовлен блок сопряжения четырёхканального четырёхразрядного ЦАП с шаговым двигателем для управления им в микрошаговом режиме.

Данный блок разработан для сопряжения четырех канального четырех-разрядного ЦАП [1] с шаговым двигателем. Основой изготовленного блока является четырёхканальный операционный усилитель LM324N, на базе которого реализован неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления по напряжению 8.



**Рисунок – Принципиальная схема блока сопряжения 4-канального 4-разрядного ЦАП с шаговым двигателем**

Сигналы с выходов усилителей поступает на p-n-p-транзисторы KT972A, включенные в схему эмиттерных повторителей. Далее усиленный по току сигнал поступает на обмотки шагового двигателя.

С использованием микросхемы DA1 KP142EH5A и стабилитрона VD5 KC210 реализована схема стабилизатора напряжения +16В, используемого для питания обмоток шагового двигателя и усилителя.

На микросхеме DA2 и конденсаторах C2, C5 выполнен стабилизатор напряжения, обеспечивающий питание 4-канального 4-разрядного ЦАП стабилизированным напряжением +5В.

На элементах C3, C4, R4 реализован фильтр, необходимый для фильтрации напряжения источника питания и для защиты от

проникновения помех по цепям питания в усилитель. Диоды VD1-VD4 используют для защиты транзисторов от выбросов ЭДС самоиндукции.

Макет изготовлен на плате из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита размером 70×90 мм.

#### *Список литературы*

1. Физика конденсированного состояния: материалы XIX респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов, и студентов (Гродно, 19-20 апр. 2011 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2011. – 418 с.

Designed and manufactured pair of four-unit four-digit DAC with a stepper motor to control them in microstepping mode.

*Тарасюк Юрий Юрьевич*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, jura-tarasjuk@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель проректора по научной работе и инновациям, начальник научно-исследовательской части, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by.

УДК 65.014

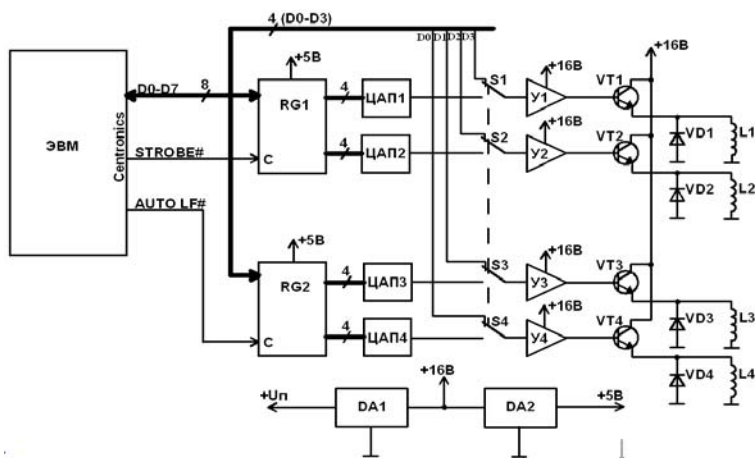
*Ю.Ю. Тарасюк*

## **МАКЕТ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «МИКРОШАГОВЫЙ РЕЖИМ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ»**

Разработан и изготовлен макет лабораторной работы для изучения принципов управления шаговым двигателем в микрошаговом режиме.

Блок управления шаговым двигателем в микрошаговом режиме состоит из двух основных частей: 4-канального 4-разрядного ЦАП и блока сопряжения ЦАП с шаговым двигателем.





**Рисунок – Структурная схема макета блока управления шаговым двигателем в микрошаговом режиме**

Сигналы шины данных интерфейса «Centronics» подключены к входам демультиплексора портов, выполненного на двух параллельных регистрах RG1 и RG2 типа KP1533IP33. В качестве сигналов управления регистрами используются инверсные сигналы интерфейса AUTO LF# и STROBE#. Выходные сигналы с выводов регистров поступают на 4-х каналный 4-х разрядный ЦАП, построенный на дискретных элементах [1].

С выходов ЦАП сигнал поступает на четырёхканальный усилитель У1-У4, на выходе которого он усилен в 8 раз. Напряжение на обмотки шагового двигателя поступает через эмиттерный повторитель VT1-VT4.

Устройство помещено в компактный корпус в виде закрывающейся шкатулки, на верхней панели которой находится градуированная шкала с вращающейся стрелкой и светодиоды, при помощи которых можно наглядно отслеживать работу шагового двигателя. С помощью галетного переключателя (S1-S4), расположенного на боковой панели, можно переключать шаговый двигатель из микрошагового режима управления в полу, полношаговый. Это возможно благодаря подключению шагового двигателя к компьютеру напрямую через схему усилителя минуя ЦАП. Макет питается от источника постоянного напряжения +18В и потребляет ток не более 0,7 А.

Использование данного макета позволяет ознакомиться с шаговыми двигателями и контроллерами, управляющими ими, а также получить

практические навыки в управлении шаговым двигателем в микрошаговом режиме. Предполагается, что в дальнейшем он будет использован в качестве макета лабораторной работы «Микрошаговый режим управления шаговым двигателем» в курсах «Основы автоматизации эксперимента» и «Основы робототехники».

#### *Список литературы*

1. Физика конденсированного состояния: материалы XIX респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов, и студентов. (Гродно, 19-20 апр. 2011 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2011. – 418 с.
2. Герман, А.Е. Основы автоматизации эксперимента: лабораторный практикум / А.Е. Герман, Г.А. Гачко. – Гродно: ГрГУ, 2005. – 103 с.
3. Основные принципы современных шаговых двигателей, драйвера и контроллеры шаговых двигателей / [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа: [http:// www.Stepmotors.ru](http://www.Stepmotors.ru) / – Дата доступа: 22.11.2011.

Designed and produced layout of the laboratory work to study the principles of management of a stepper motor in microstepping mode.

*Тарасюк Юрий Юрьевич*, студент 5 курса физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Гродно, Беларусь, [jura-tarasjuk@mail.ru](mailto:jura-tarasjuk@mail.ru).

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель проректора по научной работе и инновациям, начальник научно-исследовательской части, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, [german@grsu.by](mailto:german@grsu.by).

УДК 621.38.002.72

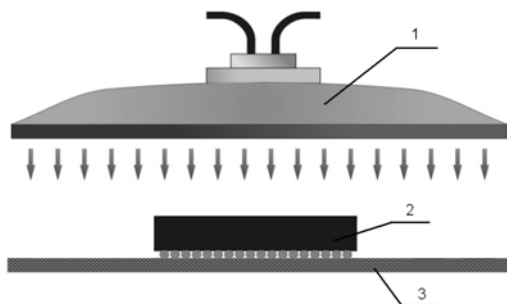
*В.И. Цвирко, Д.В. Кривель*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ИНФРАКРАСНОГО НАГРЕВА ПРИ МОНТАЖЕ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ**

Моделированием получен температурный профиль инфракрасного нагрева при монтаже микросхем в корпусе BGA на печатные платы.

Широкое распространение бессвинцовых паяльных паст, а также расширение типов корпусов компонентов (начиная с больших BGA и

заканчивая компонентами типа fine-pitch), приводит к необходимости разработки новых методов монтажа и демонтажа электронных компонентов. Это связано с тем, что при демонтаже одного компонента, можно повредить соседний компонент или печатную плату. Поэтому необходимо учитывать теплоемкость и теплопроводность нагреваемых компонентов и печатной платы. Таким образом, во избежание теплового удара монтируемые или демонтируемые компоненты не должны перегреваться в зоне плавления, а контактные площадки и шариковые выводы BGA (рис. 1) должны быть нагреты до температуры, достаточной для разрушения паяного соединения.



**Рисунок 1 – Схема нагрева BGA элемента: 1 – ИК нагреватель, 2 – BGA, 3 – печатная плата**

При ИК-нагреве тепловая энергия передается посредством электромагнитного излучения, которое равномерно нагревает компоненты при оптимальном температурном профиле. Ламповые ИК-излучатели имеют ограниченную площадь, при этом зона наибольшего нагрева находится непосредственно под нагревателем. Теплопередача ИК излучением является эффективным и мощным механизмом:

$$T(K)E = bT^4, \quad (1)$$

где  $E$  – тепловая энергия излучения;  $T$  – абсолютной температура источника,  $b$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Современное программное обеспечение позволяет в настоящее время применить метод конечных элементов для анализа тепловых полей зоны ИК-нагрева. Методика анализа ИК-нагрева в пакет Solid Works включает: создание геометрической модели, задание свойств

материала и граничных условий, настройка опций расчета и сетки, просмотр результатов. Для решения поставленной задачи используется уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (UT) - \nabla (D_T T) = S_T, \quad (2)$$

где  $\frac{\partial T}{\partial t}$  – изменение температуры  $T$ ;

$\nabla(UT)$  – конвективное слагаемое изменения температуры  $T$ ;

$\nabla(D_T T)$  – диффузное слагаемое изменения температуры  $T$ ;

$S_T$  – энергия излучателя.

Исходными данными для моделирования являются керамические панели ИК нагрева мощностью 800 Вт, интенсивность излучения 100000 Вт/м<sup>2</sup> и начальной температурой 300 °С.

Температурный профиль ИК нагрева (рис. 2) показывает, что температура на выводах BGA достигает температуры плавления припоя, но при этом на поверхности корпуса BGA температура нагрева почти в 2 раза выше. Такая разность температур объясняется тем, что поверхность BGA элемента поглощает больше энергии, чем выводы, т.к. они имеют способность ее отражать.

Такая температура на поверхности корпуса нежелательна, так как она может привести к разрушению BGA.

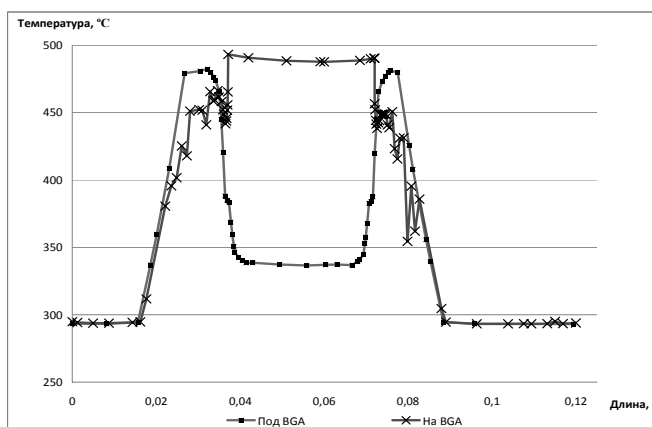


Рисунок 2 – Температурный профиль ИК-нагрева микросхемы BGA

Поэтому необходимо использовать дополнительный нагрев платы. Использование двухстороннего ИК-нагрева BGA микросхемы и печатной плата снизит градиент температур в рабочей зоне, что уменьшит термические напряжения в плате.

*Список литературы*

1. Алямовский, А.А. Компьютерное моделирование в инженерной практике Solid Works 2007-2008 / А.А. Алямовский, Е.В. Одинцов, А.А. Собачкин. – СПб.: Изд. Питер, 2008. – 768 с.
2. Ланин, В.Л. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В.Л. Ланин, А.П. Достанко, Е.В. Телеш. – Минск: Изд. центр БГУ, 2007. – 574 с.

Modeling is obtain of infrared radiation temperature profile on a zone of joining of external BGA elements of with density electronics elements.

*Цвирко Валентин Иосифович*, магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, valicdevil@tut.by.

*Кривель Дмитрий Викторович*, магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.

Научный руководитель – *Ланин Владимир Леонидович*, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, vlanin@bsuir.by.

УДК 539.19

*П.С. Чибирай*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ НАНОРАЗМЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ УРАНИЛА С ОРГАНИЧЕСКИМИ ЛИГАНДАМИ**

На основе квантово-химических расчетов построены структурные модели комплексов динитрата и дигидрат динитрато-уранила с молекулами органических растворителей – диметилсульфоксидом (ДМСО) и диметилформамидом (ДМФА). Рассчитанные колебательные спектры смоделированных соединений демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными данными.

Ураниловые соединения являются типичными представителями комплексных соединений. Общим элементом структуры выступает многоатомная ураниловая группа  $\text{UO}_2^{2+}$ . Координационное окружение урана в данных ураниловых кластерах представляет собой бипирамиду. В противоположенных вершинах располагаются атомы кислорода уранила, а в экваториальной плоскости – донорные группы лигандов в *транс*-положении. В качестве лигандов выступают молекулы нитрата, воды, ДМСО и ДМФА.

Расчёты структурных и спектральных характеристик наноразмерных комплексов уранила выполнялись при помощи квантово-химического пакета GAMESS-US [1]. Для атома урана использовалось приближение эффективного остоного потенциала LANL2DZ, для других атомов применялся полноэлектронный базисный набор cc-pVDZ. Во всех расчетах был также использован гибридный обменно-корреляционный функционал B3LYP [2].

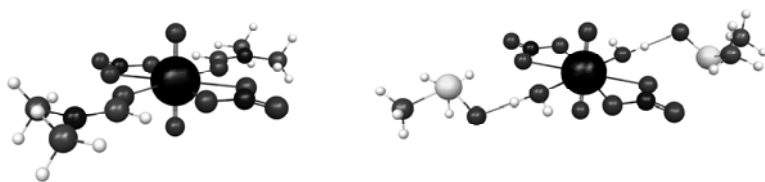
Для построения комплексов первоначально были найдены равновесные структуры иона уранила, нитрата и полярных органических растворителей ДМСО и ДМФА.

В результате расчетов показано, что комплекс динитрато-уранила с бидентантным присоединением нитратной группы обладает симметрией  $D_{2h}$ . При присоединении лигандов симметрия уранилового комплекса снижается до  $C_i$ . Структура входящих в комплекс молекул при комплексообразовании остаётся практически неизменной.

Отметим также, что при формировании равновесного состояния комплексов дигидрат динитрато-уранила с органическими лигандами наблюдается выход последних из экваториальной плоскости. Для воды отклонение составляет порядка нескольких градусов, а для молекул ДМСО и ДМФА — нескольких десятков градусов.

Как показал расчет, более устойчивыми структурами являются динитратные ураниловые комплексы. Выход лигандов в дигидрат динитратных комплексах из экваториальной плоскости можно объяснить уменьшением взаимодействия последних с центральным фрагментом.

Для проверки адекватности полученных результатов были рассчитаны ИК спектры поглощения как изолированных молекул, так и ураниловых соединений. Наблюдается высокая корреляция экспериментальных и теоретически полученных данных, что подтверждает адекватность предложенных моделей.



Динитрато-дидиметилформамидо-  
уранил

Дигидрато-динитрато-дидиметилсульфоксидо-  
уранил

**Рисунок– Равновесные структуры ураниловых комплексов**

#### *Список литературы*

1. <http://www.msg.ameslab.gov/GAMESS/GAMESS.html>
2. Кон, В. Электронная структура вещества – волновые функции и функционалы плотности / В. Кон // УФН. 2002. – Т. 172. – С. 336.

On the basis of quantum-chemical calculations of the structural model complexes dinitrate-and dinitrate dihydrate of uranyl with the molecules of organic solvents - dimethyl sulfoxide (DMSO) and dimethylformamide (DMF). The calculated vibrational spectra of the modeled compounds show good agreement with experimental data.

*Чибирай Полина Сергеевна*, студентка физического факультета  
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь,  
[polinkin.smile@gmail.com](mailto:polinkin.smile@gmail.com).

Научный руководитель – *Шундалов Максим Борисович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физической оптики, физический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, [shundalov@bsu.by](mailto:shundalov@bsu.by).

УДК 621.382

*Е.А. Янушко*

## **ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА OMNICHROME 2000**

Разработан и изготовлен измеритель мощности на основе двухстадийного интегрирующего аналого-цифрового преобразователя (АЦП), используемый в комплекте с аргоновым лазером Omnicrome 2000.

Интегрирующие двухстадийные преобразователи обладают высокой точностью при сравнительно низкой стоимости. Двухстадийный метод преобразования экономичен при применении в преобразователях высокого разрешения, однако быстродействие таких преобразователей не превышает нескольких сотен преобразований в секунду. Как правило, цифровая информация на выходе таких АЦП представляется в специальном коде, предназначенном для непосредственного управления светодиодными семисегментными индикаторами или дисплеями, выполненными на жидких кристаллах.

В работе [1] приведено описание цифрового вольтметра на основе АЦП ICL7106, который позволяет измерять постоянное напряжение в диапазоне  $0 \div 2$  В с точностью лучше 3 мВ и использован в качестве основы описываемого в настоящей работе измерителя мощности.

Для измерения мощности лазерного излучения используется сигнал с выхода кремниевого фотодиода, размещенного в корпусе лазера, на который поступает излучение от светоделительной пластинки, размещенной за выходным зеркалом лазера. Светодиод включен в режиме источника тока и получаемое выходное напряжение на нагрузке пропорционально мощности излучения. Проведена калибровка выходного сигнала датчика, подключенного к входу цифрового вольтметра, для разных длин волн излучения, генерируемого лазером. Обеспечено измерение мощности лазерного излучения в диапазоне  $0 \div 20$  мВт.

Печатная плата цифрового вольтметра размещена в отдельном пластмассовом корпусе, размещаемом рядом с блоком излучателя лазера. Изготовленный измеритель питается от встроенного в лазер источника питания напряжением 15 В. Потребляемый ток не превышает 200 мА.

Использование разработки в лаборатории молекулярной спектроскопии ГрГУ показало высокую надежность устройства и удобство его использования.



*Список литературы*

1. Янушко, Е.А. Цифровой вольтметр на основе двухстадийного интегрирующего АЦП / Е.А. Янушко // Физика Конденсированного состояния: материалы XIX респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 19 - 20 апреля 2011 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2011. – 418 с.

The capacity measuring instrument is developed and made on the basis of the two-phasic integrating analog-digital converter (ADC), used complete with argon laser Omnichrome 2000.

*Янушко Евгений Анатольевич*, магистрант физико-технического факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, e.a.yanushko@gmail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь, german@grsu.by.