Секция 2

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И КОМПЬТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 535.016

А. В. БОБРОВИЧ

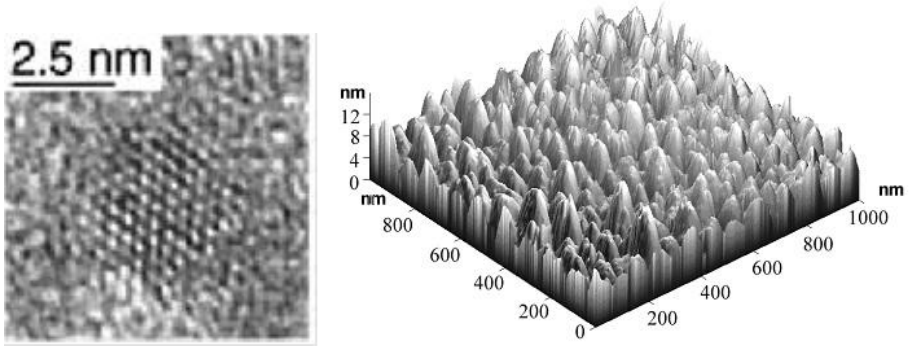
ИНДИКАТРИСЫ ВТОРИЧНОГО СВЕЧЕНИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/ZnS У ПЛАЗМОНННОЙ ПОВЕРХНОСТИ СЕРЕБРЯНЫХ ПЛЁНОК

Исследованы индикатрисы вторичного свечения квантовых точек (CdSe/ZnS), осажденных у поверхности плазмонных пленок серебра при различных углах падения лазерного возбуждения с длиной волны 488 нм. Показано, что при малых углах падения (до 10°) и малых углах регистрации (35°), наблюдается максимум интенсивности люминесценции. Показано, что в отличие от молекулярных соединений вторичное свечение квантовых точек при малых углах падения света слабо зависит от плоскости поляризации лазерного возбуждения. Возможной причиной такого эффекта является двукратное вырождение дипольного момента квантовых точек.

Дифракционный предел оптической микроскопии, как известно, преодолевается с использованием зондовой сканирующей микроскопии ближнего поля, послужившей толчком к становлению нового раздела оптики – наноплазмоники. Эта новая область оптики оперирует понятием поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) – электромагнитных возбуждений, которые распространяются на поверхности раздела благородных металлов и диэлектрика, экспоненциально затухая в обеих средах в пределах ближнего поля [1]. Данная особенность позволяет исследовать объекты, размеры которых много меньше длинны волны света. Выделяют три основных типа наноплазмонных структур: плазмонные кристаллы [2], резонансные плазмонные частицы [3] и плазмонные пленки [4]. Плазмонные пленки представляют собой тонкие (по сравнению с длиной волны света) нанотекстурированные, квазипериодические пленки металлов, в которых под действием света могут быть возбуждены как поверхностные, так и локализованные плазмоны (ЛП). Несмотря на непериодическую, в лучшем случае, лишь квазипериодическую и неоднородную морфологию поверхности, плазмонные пленки обладают рядом уникальных свойств и удобством в использовании. В первую очередь стоит отметить возможность плавной настройки их спектральных свойств к условию резонанса с осажденными хромофорами, что позволяет исследовать разные классы хромофоров в широкой области спектра. Благодаря нерегулярной структуре плазмонных пленок, проявляются особые свойства данных структур, а именно, одновременное возбуждение ППП и ЛП.

Цель. Целью данной работы является выявление особенностей вторичного свечения квантовых точек CdSe/ZnS и выявление зависимости интенсивности вторичного излучения от угла падения света, поляризации и направления распространения(угла регистрации). В свою очередь квантовые точки обладают такими качествами, как высокая чувствительность. Они являются стабильными и селективными метками для неизотопного биомедицинского анализа, превосходящими по всем указанным параметрам органические флуорофоры. Широкая цветовая гамма селектированных по размерам нанокристаллов позволяет производить на их базе мультиплексный анализ в режиме реального времени с использованием одного единственного источника оптического возбуждения.

На рисунке 1 приведено изображение квантовой точки и 3-D изображение плёнки серебра.

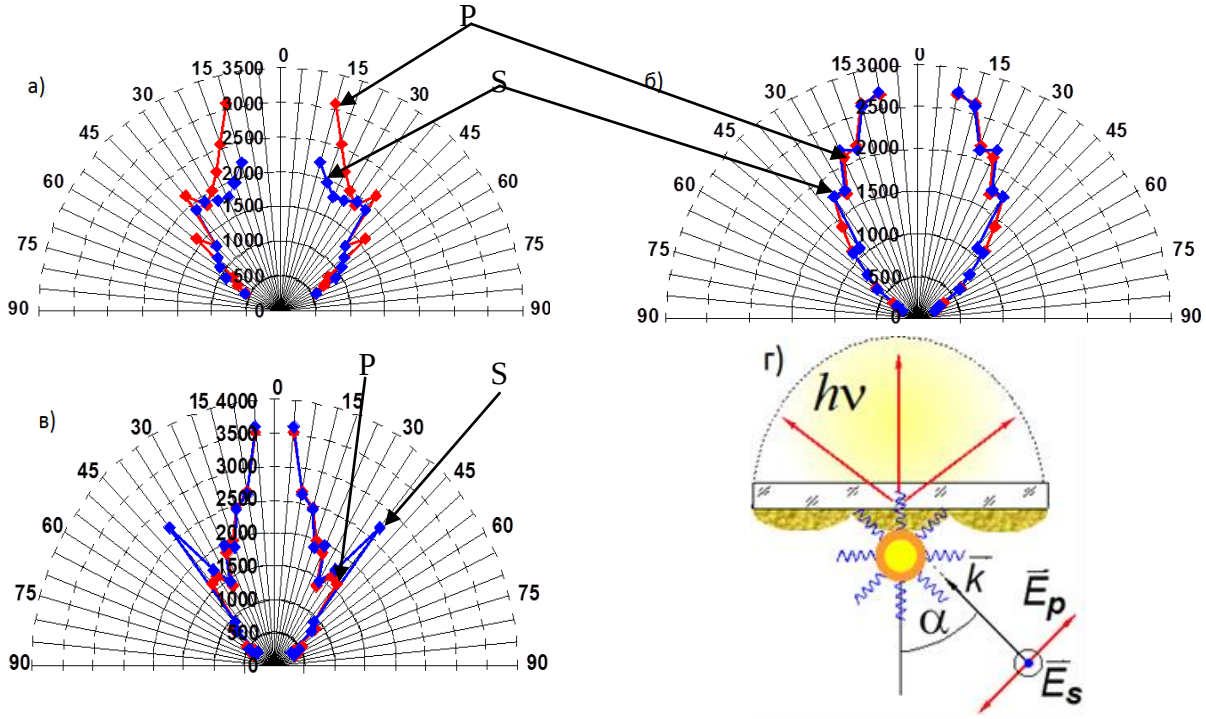


(а) (б)

а – квантовой точки, полученное с помощью электронного сканирующего микроскопа, б – изображение серебряной плёнки, полученное при помощи атомно-силового микроскопа

Рисунок 1 – Изображения квантовой точки и плазмонной пленки серебра

На рисунке 2 приведены индикатрисы вторичного свечения квантовых точек CdSe/ZnS у плазмоннной поверхности серебряных плёнок. Синим цветом показаны индикатрисы S поляризованного излучения, а красным P поляризованного излучения (а, б в), и схематическое представление исследуемого образца и условий возбуждения вторичного свечения (г).



углы падения: а – 0°, б – 5°, в – 10°, длиной волны возбуждения 488 нм; г – схематическое представление исследуемого образца и условий возбуждения вторичного свечения, где α – угол падения света, $\vec{k}, \vec{E}_p, \vec{E}_S$ – волновой вектор, векторы напряженности поля падающей волны при *P* и *S* поляризации

Рисунок 2 – Индикатрисы вторичного свечения квантовых точек у поверхности плазмонной пленки серебра в максимуме полосы при различных углах падения возбуждающего лазерного излучения

В данной работе исследовались образцы плазмонных плёнок серебра, с осаждённым на них слоем квантовых точек. Данный вид плёнок, по причине особенного размера зёрен метала, обладает уникальными характеристиками. Исследуемые плёнки являются флуоресцентно активными. Поэтому в данной работе мы изучает спектры плазмон зависимой флуоресценции. Не смотря на то, что плёнки обладают устойчивыми характеристиками, в ходе выполнения данной работы возникли интересные эффекты. При осаждении квантовых точек CdSe/ZnS на поверхности серебряной плёнки происходит быстрая деградация свечения квантовых точек, что усложняет проведение эксперимента. Для устранения влияния данного эффекта на результаты измерений постоянно проводилась отстройка спектров при фиксированном значении угла. Это позволило исключить из результатов погрешность, связанную с деградацией частиц за время проведения опытов. Нестабильность квантовых точек в условиях сорбции на поверхности плазмонной пленки является интересным и важным эффектом, который требует дальнейшего изучения, что и будет проводиться в дальнейшем.

Список литературы:

1. Zayats, A. V. Nano-optics of surface plasmon polaritons / A. V. Zayats, I. I. Smolyaninov, A. A. Maradudin // Phys. Rep., 408, 2005. – P. 131–314.
2. Stewart, M. E. Quantitative multispectral biosensing and 1D imaging using quasi-3D plasmonic crystals / M. E. Stewart et al. // PNAS, 103, 2006. – P. 17143–17148.
3. Shultz, D. A. Plasmon resonant particles for biological detection / D. A. Shultz. // Curr. Opin. Biotechnol, 14. – 2003. – P. 13–22.
4. Strekal, N. D. Selective excitation of surface-enhanced secondary emission from boimolecules by substrates based on thin golden films / N. D Strekal, V. F. Oskirko, A. A. Maskevich, I. R. Nabiev, S. A. Maskevich // Optics and spectroscopy. – 2000. – Vol. 89, № 6. – P. 872–875.

Indicatrix of secondary emission of quantum dots (CdSe / ZnS) deposited on the surface of plasmon silver films at various angles of incidence of laser excitation with 488 nm wavelength investigated. It is shown that for small angles of incidence (up to

10 °) and small angles of registration (up to 35 °) luminescence intensity maximum observed. It is shown that unlike molecular compounds secondary emission of quantum dots at small angles of incidence depends weakly on laser excitation plane polarization. A possible reason for this effect is twofold degeneracy of the quantum dots dipole moment.

Бобрович Александр Владимирович, студент 5-го курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Стрекаль Наталья Дмитриевна*, доктор физико-математических наук , профессор кафедры общей физики ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 621.382

А. М. БОРОВИК, И. Ю. ЛОВШЕНКО

ПРИБОРЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ SiC И GaN

Рассмотрены основные преимущества и недостатки карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) для их применения в качестве перспективных материалов микроэлектроники при создании силовых и оптоэлектронных приборов.

Эффективность микроэлектронных устройств существенно зависит от быстродействия, энергопотребления и надежности элементной базы, в том числе от ее способности долговременной работы в жестких условиях эксплуатации. В связи с этим значительное место в области разработки и применения новых полупроводниковых материалов занимают исследования широкозонных полупроводников. Большие, чем у Si и GaAs, величины запрещенных зон обусловили преимущества этих материалов: увеличение области рабочих температур, возможность создания на их основе светоизлучающих приборов на видимую область спектра, высокие значения критического поля пробоя, большая радиационная стойкость. В таблице 1 представлены основные параметры некоторых полупроводниковых материалов [1, 2].

Таблица 1 – Основные параметры некоторых полупроводниковых материалов

Материал	Ширина запрещенной зоны E_g, эВ	Напряженность критического поля пробоя E_{cr}, 10^6 В/см	Скорость насыщения V_{sat}, 10^7 см/с	Теплопроводность λ, Вт/(см·К)	Подвижность дырок μ_p, см^2/(В·с)	Подвижность электронов μ_n, см^2/(В·с)
Si	1,12	0,3	1	1,5	600	1500
GaAs	1,43	0,6	1	0,45	400	8500
4H-SiC	3,2	3	2	4,9	120	1000
GaN	3,45	5	2,2	1,3	850	1250

Ключевыми преимуществами SiC по сравнению с Si и GaAs являются:

- высокая напряженность электрического поля пробоя;
- чрезвычайно малый ток утечки при повышенной температуре;
- высокая теплопроводность SiC, значительно снижающая тепловое сопротивление кристалла;
- стабильность во времени и слабая зависимость от температуры электронных свойств приборов;
- устойчивость к жесткой радиации, препятствующая деградации электронных свойств кристалла;
- высокая рабочая температура кристалла (более 600 °С).

Хорошая подвижность электронов для SiC в сочетании с высокой возможной концентрацией носителей заряда (на два порядка больше по сравнению с Si), а следовательно, и большая (на порядок) критическая напряженность электрического поля позволяют, в принципе, улучшить все характеристики приборов силовой электроники: быстродействие, предельные коммутируемые токи и напряжения, статические и динамические потери. Применение приборов силовой электроники на основе SiC позволит радикально уменьшить габариты преобразовательного оборудования, увеличить надежность работы за счет возможности работы на более высоких частотах преобразования, с более высокой температурой и упрощенной системой охлаждения [1 – 4].

Основными препятствиями на пути широкого внедрения приборов силовой электроники на основе SiC являются проблемы получения высококачественных подложек и эпитаксиальных пленок (проблема микропор), их высокая стоимость, сложность технологических процессов [2, 4]. Материал устойчив к окислению при температуре до 1400 °С, при комнатной температуре не взаимодействует с кислотами, что также представляет трудность при изготовлении полупроводниковых приборов на его основе. Для максимального использования температурных характеристик SiC (при температуре свыше 500 °С), требуется решить проблему получения надежного электрического контакта, что возможно при использовании многослойной металлизации [3].

Несмотря на технологические проблемы с использованием CVD-материала продемонстрированы практически все классические электропреобразовательные полупроводниковые приборы: диоды Шоттки, диоды с *p-n*-переходом, полевые транзисторы с *p-n*-переходом, МОП-транзисторы; СВЧ-приборы – полевые транзисторы с затвором Шоттки, лавинно-пролетные диоды [5]. Главное преимущество диодов Шоттки на основе SiC состоит в их исключительных динамических характеристиках: заряд обратного восстановления

чрезвычайно низок. Компания Cree массово выпускает диоды Шоттки, рассчитанные на напряжение до 1700 В [6]. Изготовлены и исследованы высоковольтные 4H-SiC-диоды, имеющие интегрированную Шоттки-(*p-n*)-структуру, с предельным обратным напряжением 3,3 кВ (JBS) [7]. В работе [5] исследованы статические и динамические характеристики выпрямительных 4H-SiC p^+-n_0-n^+-диодов, рассчитанных на обратное напряжение 6, 10 и 20 кВ. Изготовлены транзисторы Cree с напряжением пробоя более 13 кВ; силовые модули, способные коммутировать токи до 600 А, СВЧ полевые транзисторы Cree с максимальной частотой до 40 ГГц и пробивным напряжением 120 В, высокотемпературные (до 600 °С), радиационно-стойкие датчики [1, 4, 6].

Можно выделить следующие преимущества GaN:

- высокая удельная плотность выходной мощности;
- высокая рабочая температура (до 600 °С);
- возможность применения для малошумящих транзисторов в диапазоне частот 1–25 ГГц;
- возможность создания гибридных и монолитных микросхем на GaN-транзисторах;
- низкое по сравнению с традиционными транзисторами сопротивление во включенном состоянии;
- высокая радиационная стойкость приборов.

Проблемами, сдерживающими развитие приборов на основе GaN, являются задача обеспечения эффективного теплоотвода от активной структуры и необходимость выращивания эпитаксиальных структур GaN на чужеродных подложках, из-за невозможности реализации высокоомной GaN-подложки. Присутствие большой плотностью дефектов (10^6–10^9 см$^{-2}$) в структурах, выращенных методами MOCVD, MBE и HVPE, сказывается на долговременной работе, особенно в условиях высоких напряжений и повышенных температур. Для транзисторов на основе GaN существенной проблемой является нестабильность (резкое падение) тока стока при увеличении напряжения стока (коллапс). Кроме того, обнаружилось ухудшение параметров приборов при высоких частотах, даже если они имели хорошие статические характеристики («дисперсия крутизны»). Также в импульсном режиме имеет место несоответствие выходного сигнала стока входному сигналу на затворе при изменении его значения (эффект «задержки затворного сигнала»). Исследования показали, что все эти эффекты нестабильности связаны с дефектами материала (ловушечными центрами захвата) [8–10].

Высокая термическая, химическая и радиационная стойкость GaN позволяет использовать его для изготовления приборов, работающих при повышенных температурах и в неблагоприятных условиях. Высокая теплопроводность упрощает решение проблем охлаждения рабочей области, а сочетание высокой подвижности электронов и значительной напряженности поля пробоя делает его пригодным для изготовления мощных высокочастотных и высокотемпературных транзисторов. Прямой характер межзонных переходов, большая ширина запрещенной зоны, образование твердых растворов изоморфного замещения с нитридами алюминия и индия обуславливают возможность значительного расширения спектрального диапазона работы изготавливаемых на его основе светоизлучающих и фотоприемных устройств. Основными областями применения GaN являются яркие источники света в коротковолновой области видимого спектра и ближней ультрафиолетовой области спектра; источники белого света на основе системы «кристалл – люминофор»; активные среды лазерных диодов; элементная база силовой и СВЧ-электроники (транзисторы и диоды Шоттки); приборы, работающие в условиях жесткой радиации. На данный момент в мире реализованы различные типы СВЧ-транзисторов на основе GaN, подтверждающие перспективность этого класса приборов [11, 12].

Таким образом, представленные особенности SiC и GaN свидетельствуют о перспективности их применения при создании силовых и оптоэлектронных приборов. Существует возможность приборно-технологического моделирования таких приборов с использованием программного комплекса компании Silvaco.

Список литературы

1. Агеев, О. А. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О. А. Агеев, А. Е. Беляев, Н. С. Болтовец [и др.]. – Харьков: ИСМА, 2010 – 532 с.

2. Лебедев, А. А. Широкозонные полупроводники для силовой электроники / А. А. Лебедев, В. Е. Челноков // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 9. – С. 1096–1099.

3. Полищук, А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния – настоящее и будущее силовой электроники / А. Полищук // Компоненты и технологии. – 2004. – № 8. – С. 40–45.

4. Флоренцев, С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники / С. Флоренцев // Современные технологии автоматизации. – 2004. – № 2. – С. 20–30.

5. Иванов, П. А. Мощные биполярные приборы на основе карбида кремния: обзор / П. А. Иванов, М. Е. Левинштейн, Т. Т. Мнацаканов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, вып. 8. – С. 897 – 913.

6. Cree, Inc. [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: http://www.cree.com.

7. Иванов, П. А. Высоковольтные (3.3 кВ) JBS-диоды на основе 4H-SiC / П. А. Иванов, И. В. Грехов, Н. Д. Ильинская [и др.]. // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, № 5. – С. 677–681.

8. Громов, Д. В. Материаловедение для микро- и наноэлектроники / Д. В. Громов, А. А. Краснюк. – М.: МИФИ, 2008. – 156 с.

9. Данилин, В. Транзистор на GaN пока самый «крепкий орешек» / В. Данилин, Т. Жукова, Ю. Кузнецов [и др.]. // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – № 4. – С. 20–29.

10. Using Enhancement Mode GaN-on-Silicon Power Transistors // EPC article. – 2010. – 8 p.

11. Васильев, А. Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов. Через GaN к алмазу / А. Васильев, В. Данилин, Т. Жукова // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. – № 4. – С. 68–76.

12. Колосницын, Б. С. Электронные приборы на основе полупроводниковых соединений / Б. С. Колосницын. – Минск: БГУИР, 2006. – 104 с.

The main advantages and disadvantages of silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) for their application as promising microelectronics materials in creating power and optoelectronic devices are examined.

Боровик Артур Михайлович, аспирант БГУИР, Минск, Беларусь, 1artur999@tut.by.

Ловшенко Иван Юрьевич, аспирант БГУИР, Минск, Беларусь, hron666@gmail.com.

Научный руководитель – *Стемпицкий Виктор Романович*, кандидат технических наук, доцент кафедры МНЭ БГУИР, Минск, Беларусь, vstem@bsuir.by.

УДК 621.382

В. С. ВОЛЧЁК, И. Ю. ЛОВШЕНКО

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТИВНОГО ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КРЕМНИИ

Представлены результаты моделирования процесса реактивного ионного травления. Проведен анализ влияния его параметров на профиль сформированной канавки в кремнии.

Сегодня наблюдается тенденция к повышению интеграции и миниатюризации изделий микроэлектроники. В настоящее время значительное продвижение достигнуто в развитии метода трехмерной интеграции с помощью сквозных отверстий в кремнии (Through-Silicon Vias, TSV) [1].

Для формирования вертикальных отверстий в кремнии разработано несколько способов, наиболее популярными из которых являются плазменные методы, «Bosch»-процесс и альтернативный ему криогенный процесс, относящиеся к технологии глубокого реактивного ионного травления. От жидкостных анизотропных методов плазменное травление отличает низкая чувствительность к кристаллографической ориентации кремния, высокая селективность к материалу маски. Существующие подходы к глубокому реактивному ионному травлению отличаются способом пассивации боковых стенок, которая необходима для достижения анизотропии [2]. Предпочтение отдается «Bosch»-процессу, основанному на чередовании стадий травления и пассивации (полимеризации) в плазмах SF_6 и C_4F_8 соответственно [3]. Начальной является стадия изотропного травления, за которой следует операция осаждения полимерной пленки, образующейся на всех поверхностях рельефа структуры. Далее стадия травления повторяется, что приводит к удалению полимерного слоя с горизонтальных поверхностей за счет ионного распыления. При этом на боковых стенках пассивирующий слой остается, и при последующих стадиях он препятствует боковому травлению [2].

На стадиях изотропного травления используется метод реактивного ионного травления (РИТ), от характеристик которого существенно зависит профиль вертикальных отверстий. В системах РИТ конструктивно обеспечивается поток положительных ионов из плазмы в направлении, перпендикулярном поверхности подложки [4].

Моделирование такого процесса является необходимым методом исследования, так как обладает предсказательной способностью и позволяет избежать дорогостоящих экспериментов. Моделирование процесса РИТ осуществлялось в модуле Victory Process программного комплекса компании Silvaco. Модель РИТ, используемая в модуле Victory Process, представляет собой упрощенную модель процесса травления, основанного на совместном действии химических реакций с участием нейтральных частиц и ионного распыления. Такое представление позволяет рассматривать двухчастичную задачу в качестве одночастичной, подставляя в выражение для расчета локальной скорости суммарный поток частиц обоих типов и использовать функцию фон Мизеса. Описывая пространственное распределение скорости ионов, она включает в себя параметр, называемый «фокусом» (F). Чем больше значение параметра F, тем более сфокусированным является ионный пучок.

Отношение между количеством ионов и нейтральных частиц, достигающих каждую точку на плоской незатененной поверхности структуры, обозначается как R_{flux}. Поскольку пространственные распределения скорости частиц определяются различными функциями, то для частично затененной поверхности структуры отношение между количеством ионов и нейтральных частиц будет отличным от значения R_{flux}. В модели не учитываются эффекты локального поля и рассеяние частиц в газовой фазе, а также вторичные эффекты (например, отражение частиц) [5].

На рисунке 1 представлена исходная структура. На участке кремния шириной W_{Si} = 0,6 мкм и высотой h_{si} = 0,4 мкм методом геометрического осаждения сформирована оксидная маска высотой h_{ox} = 0,2 мкм с углом среза относительно нормали к поверхности кремния φ = 10°. Ширина участка кремния, открытого для травления, W_{etch} = 0,4 мкм.

Моделирование операции реактивного ионного травления проводилось при следующих параметрах: скорость травления кремния V_{Si} = 6 мкм/мин, время травления T_{Si} = 3 с.

На рисунке 2, а изображены профили канавки, получаемые при различных значениях фокуса F и постоянном значении отношения R_{flux} = 1,00. При возрастании величины F до 10 глубина канавки увеличивается, а боковой подтрав уменьшается, так как пучок ионов становится более сфокусированным. При возрастании величины F от 10 до 20 профиль меняется несущественно – фокусировка ионного пучка достигает максимально возможного значения. Следует отметить, что боковой подтрав присутствует при любом значении фокуса, поскольку он является результатом изотропного травления нейтральными частицами.

На рисунке 2, б изображены профили канавки, получаемые при различных значениях отношения Rflux и постоянном значении фокуса F = 10. Величиной R_{flux} регулируется отношение между ионным распылением и изотропным химическим травлением. Увеличение значения R_{flux} до 10 приводит к травлению преимущественно распылением, а результатом уменьшения значения R_{flux} до 0,01 является преимущественно химическое травление.

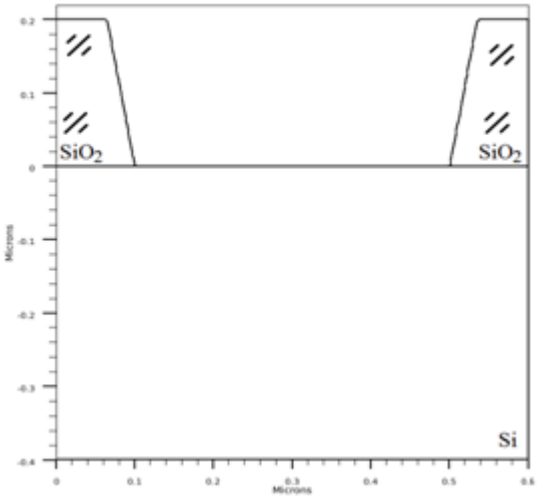


Рисунок 1 – Исходная структура

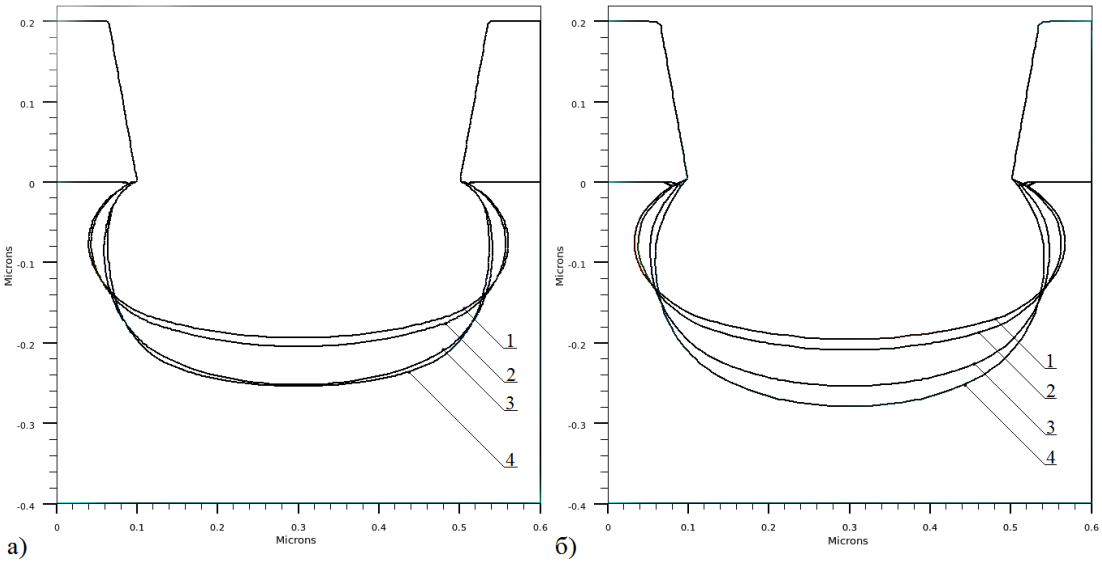


Рисунок 2 – Сравнение профилей канавки при различных значениях фокуса F (1,0 (1); 5,0 (2); 10,0 (3); 20,0 (4)), постоянном отношении R_{flux} = 1,0 (а) и при различных значениях отношения R_{flux} (0,01 (1); 0,1 (2); 1,0 (3); 10 (4)), постоянном значении фокуса F = 10 (б)

Модель РИТ, содержащаяся в модуле Victory Process программного комплекса компании Silvaco, позволяет предсказывать профиль канавки. Входные параметры, фокус F и отношение между количеством ионов и нейтральных частиц, достигающих каждую точку на плоской незатененной поверхности структуры, R_{flux} предоставляют возможность для оптимизации профиля получаемой канавки в кремнии.

Список литературы

1. Мухина, Е. 3D-сборка. Технология сквозных отверстий в кремнии / Е. Мухина, П. Башта // Электроника.: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – № 2. – С. 92–93.
2. Голишников, А. А. Разработка процесса глубокого плазменного травления кремния для технологии трехмерной интеграции кристаллов / А. А. Голишников, М. Г. Путря // ТКЭА. – 2014. – № 1. – С. 36–41.
3. McColman, S. Bosch processing on the ICPRIE / S. McColman. – Edmonton : University of Alberta's NanoFab, 2001. – P. 1–6.
4. Айнспрук, Н. Плазменная технология в производстве СБИС / Н. Айнспрук, Д. Брайн. – М.: Мир, 1987. – 463 с.
5. http://www.silvaco.com.

This paper presents the results of reactive ion etching simulation carried out for analysis of the influence of the etch parameters on the trench profile in silicon.

Волчёк Владислав Сергеевич, магистрант БГУИР, Минск, Беларусь, vlattenham@gmail.com.
Ловшенко Иван Юрьевич, аспирант БГУИР, Минск, Беларусь, hron666@gmail.com.
Научный руководитель – *Стемпицкий Виктор Романович*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники, Минск, Беларусь, vstem@bsuir.by.

УДК 543.42

С. Д. ГОГОЛЕВА

ЭЛЕКТРОННЫЕ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ КАМФАРЫ

Данная работа посвящена изучению электронных и колебательных спектров камфары. В дополнение к экспериментальным данным рассчитан колебательный спектры камфары с помощью программы FireFly 8.0.1. Также было произведено отнесение полос спектра гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) камфары.

Камфара – одно из важнейших веществ, имеющее широкое применение в нашей жизни, которое было известно с древности.

Актуальность изучения данного вещества, прежде всего, обусловлена его широким применением в медицине. Камфара входит в состав спреев от кашля, насморка, а также в состав мазей от болей суставов, лечит язвы, обморожения и ожоги. Она также содержится в аналептических средствах и препаратах, применяемых при хронической сердечной недостаточности и т. д.

В данной работе представлены результаты исследований камфары. Для регистрации спектров поглощения использовался спектрофотометр Specord-200 (Zeiss, Германия).

Для регистрации спектров гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) использовались резонансные плазмонные частицы серебра, лазерный спектрометр ДФС-52 (ЛОМО, Россия) с аргоновым лазером на длине волны возбуждения 488 нм.

На рисунке 1а представлены спектры поглощения камфары при разных значениях pH.

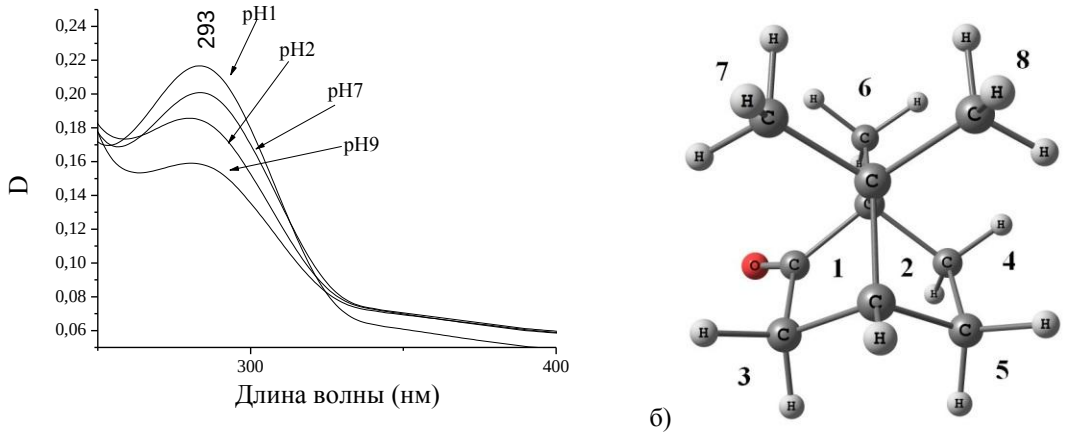


Рисунок 1 – а) спектр поглощения камфары при разных значениях pH; б) структурная формула камфары

На данном спектре мы наблюдаем одну полосу поглощения на 293 нм. При разных значениях pH мы видим, что меняется лишь оптическая плотность этой полосы. Следует отметить, что полосы, соответствующие электронным σ-переходам в молекуле камфары, расположены в дальней УФ-области спектра [1].

В результате исследований были получены спектры ГКР камфары при разных значениях pH (рисунок 2а).

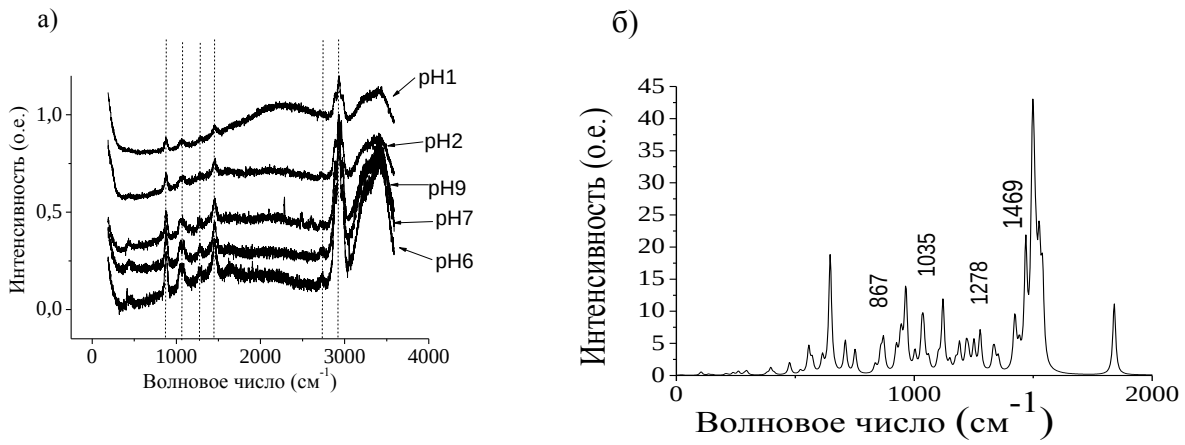


Рисунок 2 – а) спектр ГКР камфары при разных значениях pH;б) рассчитанный спектр КР камфары

При анализе спектров ГКР камфары при разных значениях pH (рисунок 2а) было выявлено, что полосы с частотой 1279 см$^{-1}$ и 435 см$^{-1}$ практически не проявляются в растворах при pH1 и pH2.

Таблица 1 – Относительная интенсивность полосы 1279 см$^{-1}$ в спектрах растворов камфары при разных значениях pH

1279 см$^{-1}$				
pH1	pH2	pH6	pH7	pH9
0,0316	0,0308	0,0703	0,0478	0,0514

Из полученных данных можно сделать вывод, что полоса 1279 см$^{-1}$ является максимальной в спектре раствора при pH6,а в растворах с другими значениями pH её интенсивность убывает.

Таблица 2 – Относительная интенсивность полосы 435 см$^{-1}$ в спектрах растворов камфары при разных значениях pH

435 см$^{-1}$				
pH1	pH2	pH6	pH7	pH9
0,0143	0,0238	0,0333	0,0428	0,0475

Относительно полосы 435 см$^{-1}$ можно сказать, что она прослеживается в растворах с pH6,pH7,pH9, а при pH1 и pH2 она практически пропадает. Данная полоса соответствует деформационным колебаниям угла CCO [2].

С помощью программы FireFly 8.0.1 [3], был получен спектр КР камфары (рисунок 2б), и на основании сравнений этого спектра и спектра ГКР полученного опытным путём были смоделированы колебания камфары. Расчёт колебательного спектра происходил на основании метода функционала плотности, в котором использовались базисы 6-31G, 6-31G(d,p) и функционал B3LYP.

Таблица 3 – Отнесение колебаний молекулы камфары

Частота, см$^{-1}$	**Форма колебаний**
871	γ (CHH) фрагмента 3,5,6,7,8; γ (CCO)
1039	γ (CHH); γ (CCO)
1277	γ(CHH) фрагмента 3,4,5,6,7,8;Q(C-C); γ (CCO)
1469	γ(CHH) фрагмента 3,4,5,6,7,8; γ (CCO)

Из полученных данных было выявлено, что колебания с наибольшей интенсивностью испытывают фрагменты 3,4,5,6,7,8. Отсюда можно предположить, что перечисленные фрагменты находятся в более тесном контакте с поверхностью наночастиц серебра.

В результате проведенных исследований были рассмотрены особенности формирования спектров электронных и колебательных переходов камфары. В работе также приведены результаты квантово-химических расчётов, которые позволили сделать отнесение колебаний полос спектров ГКР камфары. Были

сделаны предположения о геометрии адсорбции камфары на резонансных плазмонных частицах серебра. Полученные результаты, будут использованы для анализа комплекса-камфара-цитохром P450cam.

Список литературы:

1. Вязьмин, С. Ю. Электронная спектроскопия органических соединений: учеб. пособие, / С. Ю. Вязьмин, Д. С. Рябухин, А. В. Васильев. – СПб.: СПбГЛТА, 2011. – 43 с.
2. Кулаковский, В. Д. Влияние гидростатического сжатия на колебания кислорода в орторомбических монокристаллах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ // В. Д. Кулаковский, О. В. Мисочко, В. Б. Тимофеев, М. И. Еремец, Е. С. Ицкевич, В. В. Стружкин // Письма в ЖЭТФ. – 1988. – Т. 47. – Вып. 10. – С.536–538.
3. Granovsky, A. A. FireFly version 8.0.1,[Элетронный ресурс]. – Режим доступа: http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html.

The work is devoted to investigation of the spectra of camphor. Vibrations of molecule were simulated with use of FireFly 8.0.1. The correlation of vibrations in the spectra of Surface Enhanced Raman Scattering (SERS) of camphor are produced in the basis of quantum-chemical calculations.

Гоголева Светлана Дмитриевна, студентка 5 курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, gogoleva.svetlana1@mail.ru.

Научный руководитель – *Стрекаль Наталья Дмитриевна*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики, физико-технический факультет, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, nat@grsu.by.

УДК 621.382

ДИНЬ ХА ДАО

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВОГО ДАТЧИКА ХОЛЛА

Представлены результаты оптимизации конструктивно-технологических параметров магниточувствительного элемента – полевого датчика Холла на основе МДП-структуры, сформированного по технологии «кремний на изоляторе» (ПДХ КНИ). Проведено трехмерное приборное моделирование, по итогом которого определены основные характеристики структуры.

В основу функционирования разнообразных систем контроля и управления положена регистрация магнитного поля. Чувствительным элементом таких систем является преобразователь, трансформирующий воздействие магнитного поля в электрический сигнал. Наиболее распространенные типы преобразователей магнитного поля – датчики Холла (ДХ) [1, 2]. Традиционные ДХ представляют собой пассивные регистраторы внешнего воздействия. В отличие от них, ПДХ КНИ обеспечивает регистрацию магнитного сигнала, управление величиной выходного сигнала и измерение в режимах цифровой и аналоговой модуляции [3].

На рисунке 1 представлена структура ПДХ КНИ. На кремниевой подложке (1) n-типа электропроводности с концентрацией примеси $5\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ известными методами [4] сформирован слой скрытого оксида (2) толщиной 400 нм. Отсекаемый им слой приборного кремния, называемый активной областью (3), по толщине равен 200 нм. В активной области сформирован холловский крест из Si полосок длиной L = 25 мкм и шириной W = 10 мкм. Омические контакты (4) к токовым (5) и холловским (9) электродам легированы фосфором до уровня 10^{21} см$^{-3}$. На поверхность холловского креста нанесена пленка пиролитического SiO_2 (7) толщиной 100 нм, поверх которой осажден Al (6). Такая конструкция представляет собой верхний затвор. Нижним затвором (8) служит основание подложки с осажденной пленкой Al. Полезный сигнал снимается с холловских электродов (9).

В зависимости от полярности и значения напряжения затвор-исток толщина области, в которой проявляется эффект Холла, может изменяется от толщины слоя кремния практически до нуля. Отсюда следует, что пороговая чувствительность ПДХ КНИ на порядок превосходит таковую для кремниевых ДХ [5]. Скрытый оксид (2) уменьшает токи утечки в подложку на несколько порядков, что приводит к увеличению рабочей температуры по сравнению с традиционными кремниевыми ДХ (от -40 до 125 °С) [3].

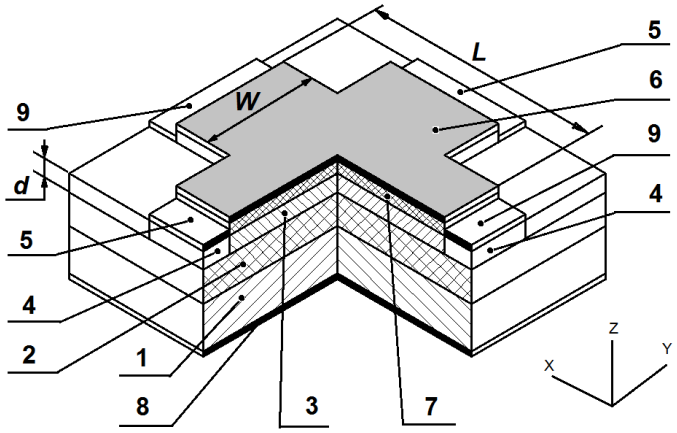


Рисунок 1 – Структура полевого датчика Холла

Зависимость напряжения Холла U_X от толщины активной области d, геометрического коэффициента G, постоянной Холла R_X, индукции магнитного поля B, а также силы тока I, который протекает между токовыми контактами, можно представить в виде: $U_X = GR_X \frac{IB}{d}$.

Геометрический коэффициент G зависит от соотношения длины и ширины L / W. Поправка на конечную длину датчика относительно мала. При отношении длины к ширине $L / W = 2$, геометрический коэффициент G достигает значения 0,95, а при $L / W = 3$ поправка составляет всего около 1 %. Поэтому не имеет смысла увеличивать это отношение, на практике обычно берется $L / W = 2..3$ [5].

Моделирование структуры и электрических характеристики осуществлялось в модуле *Atlas* программного комплекса компании *SILVACO*.

На рисунке 2, а представлены зависимости напряжения Холла U_X от напряжения сток-исток $U_{СИ}$ при различных напряжениях затвор-исток $U_{ЗИ}$. Из графика видно, что при увеличении напряжения сток-исток $U_{СИ}$, происходит повышение значения напряжения Холла U_X. На рисунке 2, б представлены зависимости напряжения Холла U_X от напряжения затвор-исток $U_{ЗИ}$ при различных напряжениях сток-исток $U_{СИ}$. Полученные зависимости демонстрируют возможность управления чувствительностью ДХ, а значит, и уровнем выходного сигнала.

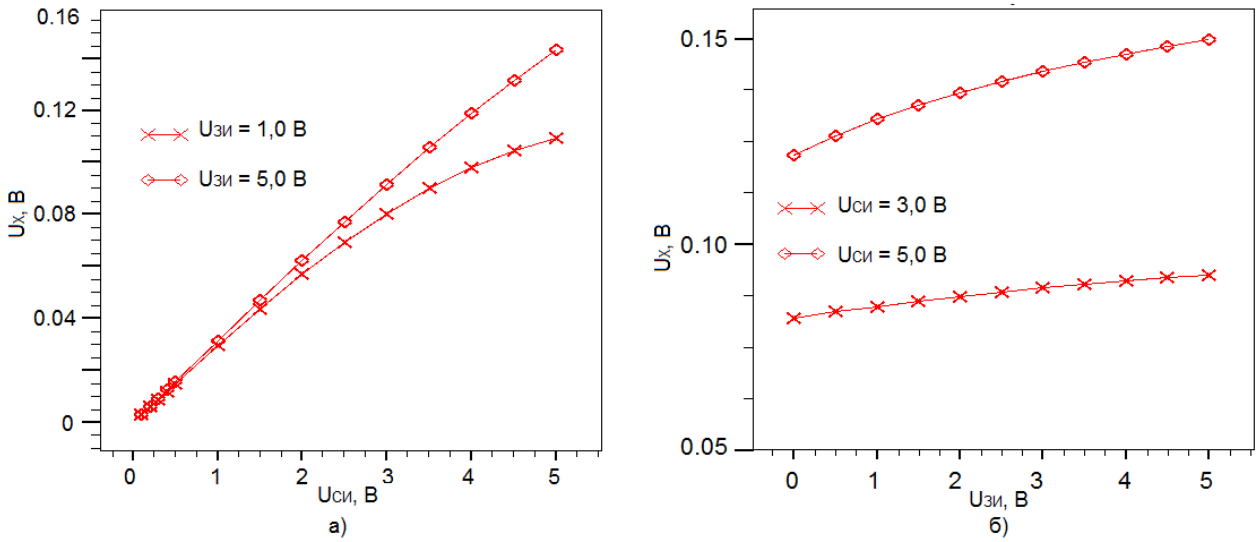


Рисунок 2 – Электрические характеристики полевого датчика Холла

Для рассматриваемой структуры ПДХ КНИ исследовано влияние конструктивно-технологических параметров на чувствительность прибора. Результаты моделирования представлены в таблице 1. Сравнительный анализ позволяет сделать вывод, что пропорциональное уменьшение длины и ширины структуры в некоторых пределах приводит к повышению чувствительности ДХ.

Таблица 1 – Чувствительность ПДХ КНИ при различных геометрических параметрах

Параметры	L = 50 мкм; W = 20 мкм		L = 25 мкм; W = 10 мкм	
	d = 200 нм	d = 100 нм	d = 200 нм	d = 100 нм
Абсолютная чувствительность, В / Тл	70	135	100	200
Чувствительность по току, В / А·Тл	180	330	265	480
Чувствительность по напряжению, мВ / В·Тл	30	30	30	25

В КНИ ПДХ благодаря наличию вертикальной, двухзатворной управляющей системы существует возможность модуляции полезного сигнала (ЭДС Холла) по затвору, которая осуществляется путем изменения чувствительности ПДХ КНИ. Анализ влияния конструктивно-технологических параметров на чувствительность ДХ показал, что уменьшение линейных размеров датчика в два раза с сохранением отношения длины к ширине L/W = 2, увеличивает значения абсолютной чувствительности для структуры с толщиной активной области d = 200 нм на 30 % (изменяется со значения 70 В / Тл до 100 В / Тл), а для структуры с толщиной активной области d = 100 нм на 48 % (со 135 В / Тл до 200 В / Тл).

Список литературы

1 Долгий, Л. Н. Моделирование и оптимизация технологии формирования и электрических характеристик магниточувствительного элемента с датчиком Холла на КНИ-структуре / Л. Н. Долгий, И. Ю. Ловшенко, В. В. Нелаев // Известия вузов. Электроника. – 2013. – № 1. – С. 3–10.

2. Бараночников, М. Л. Полевой датчик Холла на основе структур «кремний-на-изоляторе» / М. Л. Бараночников [и др.] // Микросистемная техника. – 2002. – № 10. – С. 8–12.

3. Бараночников, М. Л. Микромагнитоэлектроника / М. Л. Бараночников. – М.: Изд. ДМК, 2001. – С. 29–60.

4. Тимошенков, С. П. Процессы получения структур кремний на изоляторе / С. П. Тимошенков [и др.] // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2003. – № 4. – С. 51–55.

5. Антропов, В. А. Применение гальваномагнитных явлений в полупроводниках для создания приборов и устройств СВЧ диапазона / В. А. Антропов, Л. Х. Антропова. – Пенза: ПГУ, 2011.

Дао Ха Динь, магистрант БГУИР, Минск, Беларусь, havixuly@gmail.com.

Научный руководитель – *Стемпицкий Виктор Романович*, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники, Минск, Беларусь, vstem@bsuir.by.

УДК 004:53

А. Ю. ДАУКША

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Разработана структурная классификация виртуальных лабораторий (ВЛ), основанная на следующих признаках: по реализации заданных функций, по доступу к ресурсам и по полноте использования информационной инфраструктуры.

1. По реализации заданных функций можно выделить следующие виртуальные лаборатории:

1.1. *Реального физического эксперимента,* позволяющие проводить опыты без непосредственного контакта с реальной установкой. В состав такой ВЛ входит реальная лабораторная установка, программно-аппаратное обеспечение для управления установкой и оцифровки полученных данных, а также средства коммуникации [1; 2].

1.2. *Виртуальных приборов***,** представленных в виде программ, повторяющих логику работы и внешний вид реальных приборов для проведения эксперимента и получения данных [3].

1.3. *Математического и имитационного моделирования*. Основу данных ВЛ составляют пакеты прикладных программ (ППП) имитационного моделирования. В таких лабораториях в процессе проведения имитационного моделирования наиболее часто выделяют две группы моделей [4; 5]:

- модели, задачей которых является проверка функционирования объекта или системы в целом;
- модели для обнаружения ошибок во внутренней структуре объекта или системы.

2. По доступу к информационным ресурсам виртуальные лаборатории можно разделить на:

2.1. *Локальные***.** Работа в лаборатории происходит на отдельных ПК, объединенных в локальную сеть.

2.2. *Удаленные.* В удаленных ВЛ используется клиент-серверная архитектура, что позволяет получить доступ к лаборатории с любого ПК подключенного к Internet/Intranet. По способу реализации удаленные ВЛ можно условно разделить на следующие [6; 9]:

2.2.1. *ВЛ на базе удаленного сервера.* Пользователь подключается непосредственно к серверу на котором находятся ресурсы ВЛ, а также проводятся все эксперименты и расчеты.

2.2.2. *ВЛ на базе технологий распределенных вычислений (GRID).* Большая ресурсоемкая вычислительная задача решается на суперкомпьютере или распределяется между множеством компьютеров, объединенных в мощный вычислительный кластер или несколько кластеров, соединенных через Internet/Intranet.

2.2.3. *ВЛ на базе облачных вычислений (cloud computing).* ВЛ представляет собой динамически масштабируемый способ доступа к внешним вычислительным ресурсам в виде WEB-сервиса, при этом пользователю не требуется никаких особых знаний об инфраструктуре «облака» или навыков управления этой «облачной» технологией. В общем случае сервисы «облачных» вычислений представляют собой WEB-приложения, доступ к которым обеспечивается посредством обычного WEB-браузера [7].

3. По полноте использования информационной инфраструктуры ВЛ можно подразделить на:

3.1. *ВЛ, обеспечивающие использование распределенных информационные ресурсов* и включающие:

3.1.1. *Локальное программное обеспечение***,** установленное на отдельных ПК в локальной вычислительной сети.

3.1.2. *WEB-ресурсы* (сайты, порталы и др.).

3.1.3. *Специализированное клиентское программное обеспечение*.

3.1.4. *Базы данных***,** содержащие справочные материалы по каждому объекту изучения, графические иллюстрации, аудио и видео фрагменты, а также модели, типовые программы, результаты предыдущих измерений, гиперссылки на дополнительные материалы и т.д.

3.1.5. *Электронные библиотеки*.

3.1.6. *Информационные и информационно-управляющие системы* и другие элементы.

3.2. *ВЛ, обеспечивающие использование распределенных вычислительных ресурсов* и включающие:

3.2.1. *Интегрированные территориальные информационные системы* (ИТИС).

3.2.2. *Сетевые вычислительные ресурсы* (сетевое программное обеспечение).

3.2.3. *Индивидуальные компьютеры, множество компьютеров, объединенных в мощный вычислительный кластер или в несколько кластеров, суперкомпьютеры.*

3.3. *ВЛ, максимально использующие все телекоммуникационные ресурсы и* обеспечивающие взаимодействие удаленных пользователей с информационными и вычислительными ресурсами [8].

Исследование выполнялось в рамках Государственной программы научных исследований на 2014-15 годы «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» подпрограмма «Информатика». Тема: «Разработка технологий и архитектурных решений интеграции вычислительных ресурсов и сервисов учреждений образования в рамках единой облачной инфраструктуры на базе учреждений образования БГУ и ГрГУ им. Я.Купалы». Задание 1.23.

Результаты данной работы могут быть использованы для создания виртуальных лабораторий, обеспечивающих проведение научных исследований, в частности для моделирования процессов в конденсированных средах.

Список литературы

1. Трухин, А. В. Об использовании виртуальных лабораторий в образовании / А. В. Трухин // Казанский (Приволжский) федеральный университет. [Электронный ресурс]. – 1995–2015 гг. – Режим доступа: http://kpfu.ru/docs/F1666571770/statya_Truhin_ob_ispolzovanii_virtualnyh_laboratorij_v_obrazovanii.pdf. – Дата доступа: 07.02.2015.

2. Дмитриев, В. М. Принципы реализации автоматизированных лабораторных комплексов с локальным и удаленным доступом / В. М. Дмитриев, Т. Ю. Короткина // Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. [Электронный ресурс]. – 1999–2015 гг. – Режим доступа: http://www.tusur.ru/filearchive/reports-magazine/2007-2/121-128.pdf. – Дата доступа: 09.02.2015.

3. Соловов, А. В. Электронное обучение: проблематика, дидактика, технология / А. В. Соловов // Центр новых информационных технологий при СГАУ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://cnit.ssau.ru/news/book_solovov/index.html. – Дата доступа: 07.02.2015.

4. Voltczok, V. System Approach and Integrating Concept of Development Information Infrastructures of Transboundary Regions / V. Voltczok // Proceedings of the First International Conference «Digital Information Processing and Control in Extreme Situations»/ Belarussian Akademy of Science. – Minsk, 1998. – P. 58–65.

5. Voltchok, V. The Methodological Approach and Principles of Construction Information Business of Systems. / V. Voltchok // Proceedings of the International Conference «Financial Aspects of Regional Development». The University of Finance and Management in Bialystok». – Bialystok, 2000. – P. 69 – 75.

6. Баринов, К. А. Концепция разработки и использования виртуальной учебной лаборатории на кафедре «АСУ» МАДИ / К. А. Баринов, А. Б. Николаев, А. В. Остроух // Электронное обучение и дистанционные образовательные технологии. Электронный научный журнал. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://eodot.esrae.ru/pdf/2013/1/2.pdf. – Дата доступа: 09.02.2015.

7. Виртуальная лаборатория конечно-элементного моделирования / С. П. Копысов [и др.] // Общероссийский математический портал. [Электронный ресурс] – 2010 г. – Режим доступа: http://mi.mathnet.ru/vuu197. – Дата доступа: 05.02.2015.

8. Волчок, В. А. Элементы системного подхода к формированию информационных ресурсов в корпоративной информационной инфраструктуре университета / В. А. Волчок // Вест. ГрГУ им. Я. Купалы. Сер. 2, Информатика. – 2007. – № 2 (52). – С. 84–88.

9. Интернет-лаборатория «Основы электроники» / Ю. В. Арбузов [и др.] // Информатизация инженерного образования: электронные образовательные ресурсы МЭИ. Вып. 4 / сост.: А. И. Евсеев, Б. Р. Липай, С. И. Маслов [и др.].; под общ. ред. С. И. Маслова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 175–178.

The structural classification of the Virtual Laboratories (VL) based on a next three features: an implementation of the specified functions, access to resources and a completeness of the information infrastructure.

Даукша Александр Юрьевич, магистрант физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, dauksha_aj@grsu.by.

Сведения о научном руководителе – *Волчок Валерий Александрович*, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, wwa@grsu.by.

УДК 621.373.826

А. А. ДУНАЕВ

ШИРИНА СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО РОС-ЛАЗЕРОМ НА КРАСИТЕЛЯХ ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Численно исследована ширина спектра излучения РОС-лазера на красителях из-за изменения инверсии населённости и поглощения в процессе генерации. Установлено, что уширение спектра, наблюдаемое с ростом величины накачки, вызвано соответствующим изменением инверсии населённости активной среды лазера.

Генерационные характеристики лазера определяют его практическое использование, поэтому они заслуживают самого пристального внимания. Для РОС-лазера на красителях, работающего при наносекундной длительности импульсов возбуждения, такими характеристиками являются длительность импульсов излучения, их энергия и ширина линии излучения.

При изучении уширения спектра излучения РОС-лазера на красителях следует обратить внимание на следующие факторы: ширину спектра излучения накачки, расходимость излучения накачки, тепловое уширение спектра, уширения спектра, связанное с поглощением, изменение ширины спектра, связанное с инверсией населённости лазерных уровней [1]. Используя для накачки РОС-лазера одномодовое излучение возможно свести к минимуму влияние расходимости и спектрального состава накачки на ширину спектра генерируемого излучения.

Таким образом, если необходимо получить минимальную ширину спектра излучения РОС-лазера на красителях при заданном уровне возбуждения наносекундной длительности, следует обратить внимание на изменение поглощения и инверсии населённости в процессе генерации, а также на индуцируемую излучением накачки тепловую периодическую структуру. Поэтому исследование влияния указанных трёх механизмов на ширину спектра излучения РОС-лазера актуально и представляет интерес.

Ширина спектра излучения, генерируемого РОС-лазером на красителях

$$\Delta\lambda_g = \frac{\lambda_g}{n_s}\Delta n \ , \tag{1}$$

где Δn – изменение показателя преломления активной среды n_s.

$$\Delta n = \Delta n_A + \Delta n_E \ . \tag{2}$$

Величина Δn включает слагаемые, которые представляют собой добавку к показателю преломления из-за поглощения молекулами красителя – Δn_A и из-за усиления – Δn_E.

$$\Delta n_A = \frac{c(\nu_a - \nu)(N - N_1)\sigma_a(\nu)}{2\pi\nu \cdot \Delta\nu_a} \ , \tag{3}$$

где с – скорость света, N – концентрация молекул красителя в растворе, N_1 – населённость верхнего лазерного уровня, $\sigma_a(\nu)$ – сечение поглощения молекул красителя, частота ν_a соответствует максимуму $\sigma_a(\nu)$, $\Delta\nu_a$ – полуширина полосы поглощения.

$$\Delta n_E = \frac{-c(\nu_e - \nu)N_1\sigma_e(\nu)}{2\pi\nu \cdot \Delta\nu_e} \ , \tag{4}$$

где $\sigma_e(\nu)$ – сечение вынужденного излучения молекул красителя, частота ν_e соответствует максимуму $\sigma_e(\nu)$.

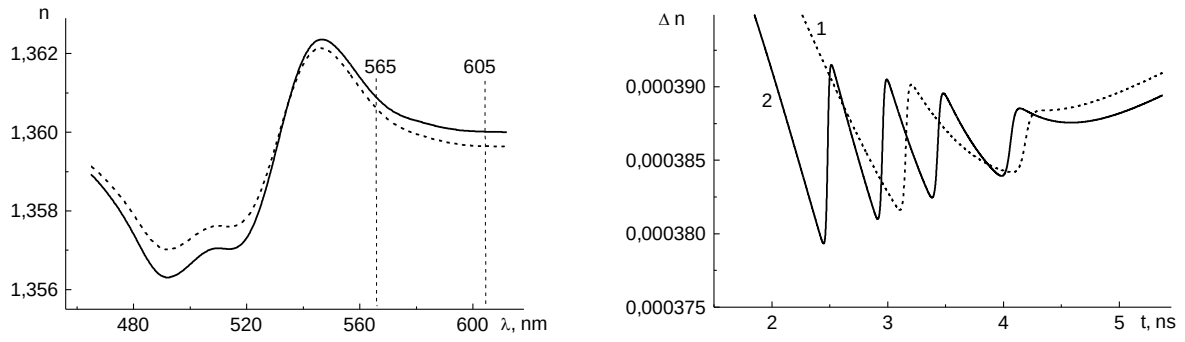
При выполнении численных исследований использовались параметры красителя родамин 6Ж: длина волны генерации – 575 нм, $\sigma_e(\nu_e)$ = 2,07·10^{-16} см^2, $\sigma_a(\nu_a)$ – 4,1·10^{-17} см^2, показатель преломления раствора – 1.36, время жизни возбужденного состояния красителя – 5.9 нс, длина РОС – структуры – 0,5 см. Длительность импульсов накачки гауссовой формы была выбрана равной 2,5 нс.

Поскольку уширение спектра излучения РОС-лазера, связанное с поглощением и усилением, обладает зависимостью от длины волны λ, а максимальные вклады данных механизмов соответствуют различным длинам волн, имеет смысл рассмотреть зависимость $n(\lambda)$. Данная зависимость приведена на рисунке 1.а) и была рассчитана для двух значений нормированной населённости верхнего лазерного уровня красителя: N_1 = 10^{-2} и 20·10^{-2}. Спектральный диапазон генерации РОС-лазера показан на графике двумя вертикальными пунктирными линиями. Следует отметить, что как максимальное значение величины $n(\lambda)$, так и её минимальное значение не совпадают по длинам волн с соответствующими максимумами $\sigma_e(\lambda)$ и $\sigma_a(\lambda)$, а смещены в область коротких длин волн.

Поскольку в процессе генерации РОС-лазера населённость верхнего лазерного уровня не остаётся постоянной, а существенно изменяется во времени, то это изменение приводит к изменению величины Δn, а следовательно, изменится и $\Delta\lambda_g$.

Изменение населённости верхнего лазерного уровня N_1 было найдено путём численного решения системы кинетических уравнений, описывающих работу РОС-лазера на красителях [2].

Зависимость N_1(t) была рассчитана при двух различных значениях накачки, нормированной на величину порога – γ = 1,35 и 2,1. В первом случае РОС-лазер генерирует импульс из двух пичков, а во втором случае импульс содержит четыре пичка. Резкому падению N1(t) соответствует генерируемый пичок пикосекундной длительности.



а) **б)**

Рисунок 1 а) спектральная зависимость *n* при различных значениях населенности верхнего лазерного уровня молекул красителя; б) изменение добавки к показателю преломления активной среды РОС-лазера в процессе генерации при различных значениях накачки. 1 соответствует γ = 1,35; 2 соответствует γ = 2,1.

Рассчитанные зависимости N1(t) позволяют вычислить изменение Δn в процессе развития генерируемого излучения (рисунок 1б) и согласно (2), определить Δλg при соответствующих значениях накачки.

При определении ширины спектра излучения, пользуясь зависимостью, приведённой на рисунок 1б). необходимо учитывать, что развитие генерируемых пичков импульса соответствует резким скачкам величины Δn на графике, поэтому интегральная ширина спектра излучения будет пропорциональна объединению проекций скачков Δn на ось ординат. Поскольку первый скачёк величины Δn наибольший, а его проекция перекрывает проекции всех оставшихся скачков Δn, то ширина спектра излучения РОС-лазера определяется изменением Δn, соответствующим первому пичку в импульсе.

Соответствующее увеличение ширины спектра излучения РОС-лазера, которое имеет место с ростом накачки, представлено на рисунок 2. Это минимальное уширение спетра, которое может быть достигнуто в данных условиях работы РОС-лазера на красителях.

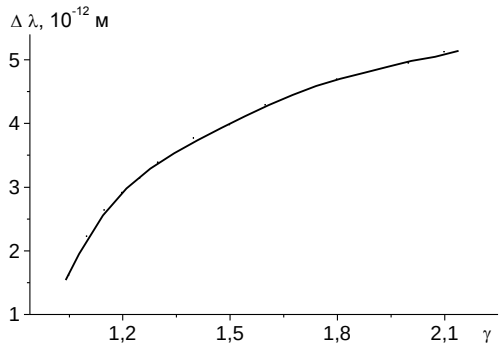


Рисунок 2 – Зависимость ширины спектра излучения РОС-лазера от величины нормированной накачки.

Список литературы

1. Курстак, В. Ю. Уширение спектра излучения РОС-лазера на красителях, при наносекундной длительности возбуждения / В. Ю. Курстак // Лазерная физика и оптические технологии: материалы IV междунар. конф. В 2 ч. Ч. 2. – Гродно: ГрГУ, 2006. – С. 130–131.
2. Курстак, В. Ю. Моделирование кинетики генерации РОС-лазера, возбуждаемого цугом ультракоротких импульсов / В. Ю. Курстак // Вест. ГрГУ им. Я. Купалы. Сер. 2. – 2002. – № 2. – С.46–51.

The breadth of a spectrum of radiation of the DFB dye laser because of change of a population inversion and absorbtion is numerically investigated during generation. It is established that the broading of a spectrum apparent with growth of quantity of pumping is caused by respective alteration of a population inversion of the active medium of the laser.

Дунаев Александр Артурович, студент 5-го курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы; Гродно, Беларусь; alex.d.9319@gmail.com.

Научный руковоитель – *Курстак Владислав Юзефович*, кандидат физико-математических наук, доцент, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь; vkurstak@tut.by.

УДК 535.317, 535-34

О. И. КРАВЧЕНКО, Л. К. МАШЛЯКЕВИЧ, Ю. Р. ЯСКЕВИЧ, П. В. ПЕТРОВ, Н. Н. КОЛЬЧЕВСКИЙ

РЕНТГЕНОВСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 2D И 3D ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СТРУКТУР

Рассматриваются различные 2D и 3D преломляющие структуры в качестве фокусирующих рентгеновское излучение систем с увеличенной апертурой и изменяющимся фокусным расстоянием. Исследуются рентгенооптические характеристики: фокусное расстояние, пропускание и апертура в зависимости от ориентации структуры или HKL индексов.

Рентгеновское излучение нашло широкое применение в различных областях науки за счет малых длин волн и большой энергии фотонов. В качестве искусственных источников рентгеновского излучения выступают синхротронные источники, рентгеновские трубки, способные испускать лучи в мягком либо жестком рентгеновском диапазоне. Рентгеновская оптика – отрасль прикладной оптики, использующая рентгеновские лучи вместо видимого света. Рентгеновская оптика в отличие от обычной оптики связана с электромагнитными волнами – собственно рентгеновскими лучами в диапазоне 10^{-4} до 10^{2} Å и гамма-излучения с длинами волн от 10^{-14} до 10^{-8} м . Одной из причин развития этого направления является возможность получения изображений объектов с невероятно малыми размерами, за счёт повышения разрешающей способности оптической системы.

Преломляющие линзы используются для фокусирования, коллимирования и создания изображений. Основные параметры преломляющих линз: апертура 5-500 микрон, количество преломляющих микролинз – 10-500, фокусное расстояние – 0,1–2 м, передача 0,1–90 %. Рентгеновская преломляющая оптика является изображающей. По сравнению с отражающей и дифракционной, рентгеновская оптика применима в более широком диапазоне энергий фотонов.

В настоящее время в рентгеновской оптике существует ряд ограничений: маленькая апертура, из-за вогнутой формы фокусирующей линзы и значительного поглощения излучения в материале линзы. Для уменьшения сферических аберраций линзам придают параболическую форму. Характеристики линз задаются в соответствии с геометрией эксперимента, в рентгеновских линзах отсутствует возможность изменения параметров системы, например, фокусного расстояния.

Целью работы является разработка рентгеновской линзы с большой апертурой и переменным фокусным расстоянием. Предлагается использовать двумерные 2D и трехмерные 3D преломляющие структуры.

Необходимо исследовать, как свойства 2D и 3D преломляющих структур зависят от направления падающего пучка или пространственной ориентации преломляющей структуры.

2D и 3Dструктуры состоят из периодически расположенных однотипных преломляющих элементов. Каждый отдельный элемент структуры должен обладать осевой симметрией, например круг или сфера. 2D линза может быть составлена из круглых цилиндрических отверстий. Известны конструкции преломляющих линз высверленных в пластинах Al, Li, Be. 3D линзу можно составить из полых шаров, которые будут являться фокусирующими линзами для рентгеновских лучей (рисунок 1). Известна 3D линза представляющая собой гексагональную систему на основе трехмерных рядов пузырей в полимере (рисунок 2).

Все возможные 2D и 3D структуры можно описать как решётка Бравэ. Все решетки Бравэ деляться на 7 сингоний для 3D решеток: триклинная, моноклинная, ромбическая, тетрагональная, кубическая, тригональная, гексагональная и 5 типов 2D решёток Бравэ: косоугольная, квадратная, гексагональная, примитивная прямоугольная, центрированная прямоугольная.

Для описания нашей структуры можно оперировать понятиями из кристаллографии: кристаллографические направления и плоскости. Кристаллографическим направлением называют направление прямой, проходящей, как минимум, через два узла решетки. Узлом решетки будем называть положение цента окружности или сферы. Индексы направлений рассчитываются как разность индексов узлов, через которые проходит прямая. Прямая, проходящая через узлы решётки будет характеризовать поворот 2D и 3D структуры. В 2D и 3D структурах узлы периодично располагаются в пространстве, причем по разным направлениям расстояния между узлами неодинаковы, что предопределяет свойства структуры. Зависимость рентгенооптических свойств от направления – анизотропией, проявляется в переменном фокусном расстоянии.

Для описания положения центров кругов или шаров внутри преломляющей рентгеновской линзы и соответственно ориентации плоскостей этих линз используются индексы Миллера, или HKL координаты. Для определения индексов кристаллографической плоскости необходимо: установить координаты точек пересечения плоскости с осями координат в единицах периода решетки; взять обратные значения этих величин; привести их к наименьшему целому кратному, каждому из полученных чисел. Полученные значения простых целых чисел, являются индексами Миллера для плоскости, указываются в круглых скобках (HKL).

Для проведения математических расчетов необходимо преобразовывать HKL индексы в декартовую систему координат XYZ. Для гексагональной сингонии уравнения преобразования имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= H + K\cos 60 \\ y &= K\sin 60 \\ z &= L \end{aligned} \qquad (1)$$

Основными параметрами, задающими 2D и 3D структуры, являются:

- положение центров шаров или окружностей, формирующих кристаллическую решетку (рисунок 1);
- соотношение между расстоянием между центрами и радиусами шаров или окружностей отдельных линз (рисунок 3).

Линзу в структуре можно описать следующими параметрами: фокусное расстояние, пропускание и угловая апертура.

Фокусное расстояние определяется количеством отдельных микролинз N:

$$F = R/2\delta N\ , \qquad (2)$$

где F – фокусное расстояние; где R – радиус отдельной линзы; δ – единичный декремент, равный:

$$\delta = E_{д}^{2}/2E_{ф}^{2}\ , \qquad (3)$$

где $E_п$ – характеристика вещества, принимает значения 15–80 эВ, $E_ф$ – энергия рентгеновских фотонов, 5-100 КэВ.

Пропускание определяет поглощение в материале линзы:

$$T = e^{-\mu dN}\ , \qquad (4)$$

где μ – показатель ослабления рентгеновских лучей в материале линзы; d- расстояние d1 или d2 на рисунке 3.

Под угловой апертурой понимается угол между крайними лучами канонического светового пучка, проходящего через линзу.

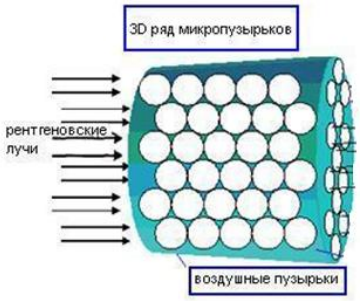


Рисунок 1 – Схематическое изображение преломляющей структуры

Рисунок 2 – Фотография 3D преломляющей гексагональной линзы

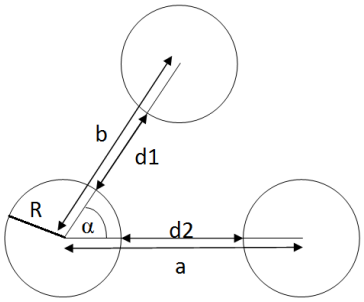


Рисунок 3 – Схема расположения отдельных узлов в 2D и 3D преломляющих структурах

Расчеты показывают, что, например, гексагональная структура содержит выделенные направлениях по которым излучение может фокусироваться и 3D линза работает как набор параллельно расположенных преломляющих линз. В особых направлениях гексагональная структура поглощает и рассеивает все падающее на нее излучение, что позволяет юстировать систему, или использовать 3D линзу в качестве порогового фильтра. Гексагональная структура 3D линзы приводит к упорядоченной структуре фокусных пятен, что позволяет использовать ее для целей рентгеновской литографии. Оптические системы на основе двухлинзовых 2D и 3D систем могут создавать реальные увеличенные изображения объекта. Применение двухлинзовых объективов позволяет получать большие коэффициенты увеличения оптической системы, что является важным для целей рентгеновской микроскопии и методов малоуглового рассеяния.

В работе будут представлены расчеты зависимости фокусного расстояния, пропускания, апертуры от угла поворота или индексов hkl для всех возможных типов 2D и 3D структур. Обсуждаются перспективы применения рентгеновских 2D и 3D структур для фокусировки и микроскопии.

Список литературы:

1. Пинскер, З. Г. Рентгеновская кристаллооптика / З. Г. Пинскер. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
2. Мишетт, А. Оптика рентгеновского излучения / А. Мишетт. – М.: Мир, 1989. – 353 с.

2D and 3D refractive structures as a focusing x-ray systems with a larger aperture and variable focal length are discussed. Properties of 2D and 3D refractive X-ray structures: focal length, the transmittance and aperture depending on the orientation of the structure or HKL indixes are investigated.

Кравченко Олег Игоревич, студент БГУ, Минск, Беларусь, black.olejka.kravchenko@gmail.com.
Научный руководитель – *Кольчевский Николай Николаевич*, доцент, кандидат физико-математических наук, доцент, БГУ, Минск, Беларусь, kolchevsky@bsu.by.

УДК 389

Д. С. КРИВЕЦ, Д. Р. ЛОБАН

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПРОВЕРКА КВАЛИФИКАЦИИ ЛАБОРАТОРИЙ

Изучены современные методы проверки квалификации лабораторий, на основе международных технических нормативных правовых актов (СТБ ISO 5725[1], СТБ ISO 13528[2]) предложен алгоритм проверки квалификации лабораторий, а также разработана программа автоматизированной проверки квалификации лабораторий.

Результаты измерений должны снабжаться едиными характеристиками качества измерений (например, прецизионность, повторяемость). Проверка квалификации лабораторий необходима для определения способности лаборатории выполнять измерения или испытания, а также для контроля их работы. Автоматизация процесса проверки квалификации лабораторий повышает эффективность и уменьшает вероятность ошибки.

Участие в программах проверки квалификации является одним из обязательных условий для подтверждения компетентности лаборатории в соответствии с рекомендациями СТБ ISO 13528-2011. Проверка квалификации включает использование межлабораторных сличений для определения характеристики функционирования лаборатории и проводится на соответствие требованиям основного международного документа, устанавливающим требования к проведению проверки квалификации [3]. В данной работе предложен алгоритм проверки квалификации лабораторий (рисунок. 1).

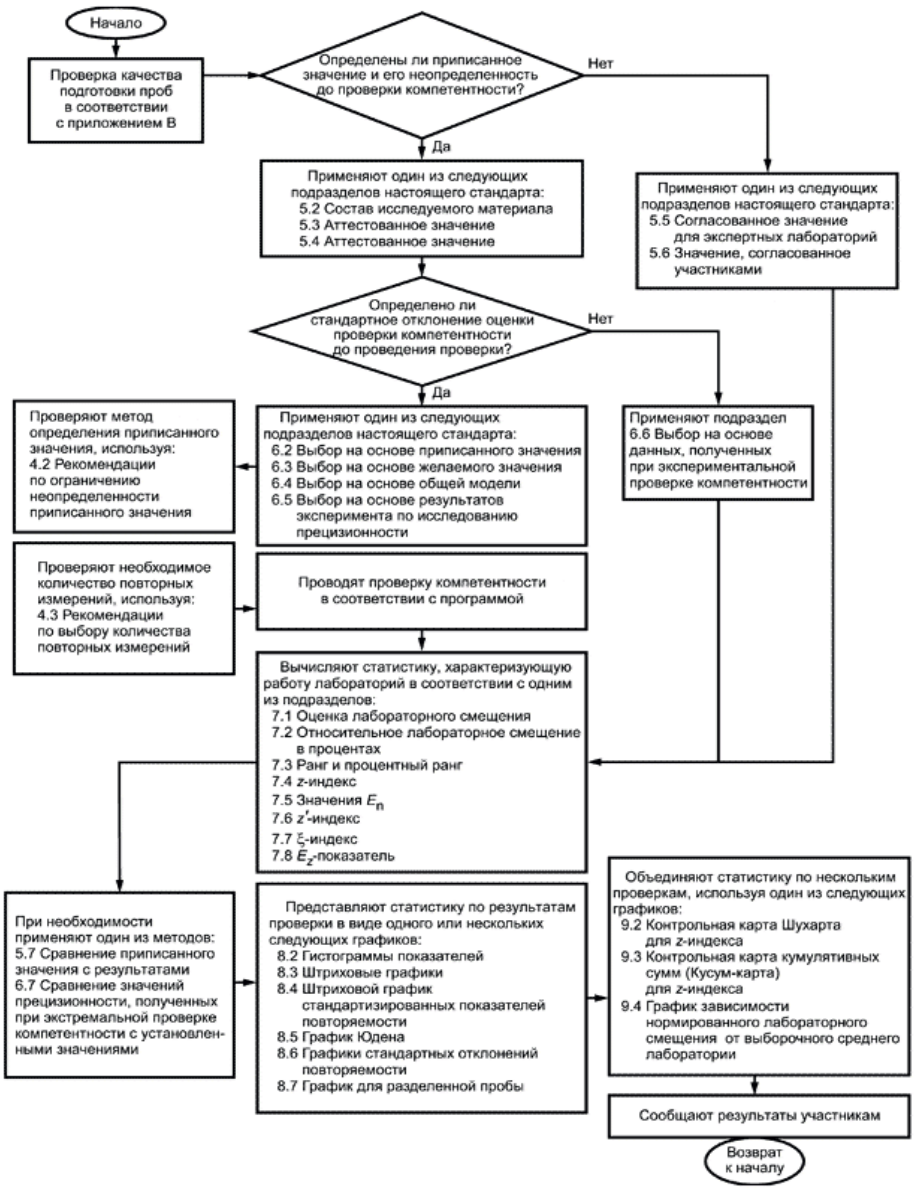


Рисунок 1. – Блок-схема применения статистических методов в программе экспериментальной проверки квалификации лабораторий

На основе данного алгоритма, разработана программа автоматизированной проверки квалификации лабораторий. Главный интерфейс программы представлен на рисунке 2.

Рисунок 2. – Главный интерфейс программы «Проверка квалификации лабораторий»

Изучены современные методы проверки квалификации лабораторий, на основе международных технических нормативных правовых актов (СТБ ISO 5725, СТБ ISO 13528) предложен алгоритм проверки квалификации лабораторий, а также разработана программа автоматизированной проверки квалификации лабораторий.

Список литературы

1. СТБ ИСО 5725-1-6-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений.
2. СТБ ИСО 13528-2011 Статистические методы. Применение при экспериментальной проверке компетентности посредством межлабораторных сравнительных испытаний.
3. Сергеев, А. Г. Метрология и метрологическое обеспечение: учебн. / А. Г. Сергеев. – М.: Высшее образование, 2008. – 575 с. – (Основы наук).

Studied modern methods of laboratory proficiency testing, on the basis of international technical regulations (STB ISO 5725, ISO 13528 STB) algorithm is proposed proficiency testing laboratories, as well as a program of automated laboratory proficiency testing.

Кривец Денис Сергеевич, студент 5 курса ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, denis-krivec@mail.ru.
Лобан Дмитрий Романович, студент 5 курса ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.
Научный руководитель – *Василюк Геннадий Тимофеевич*, доцент кафедры общей физики, кандидат физико-математических наук, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, vasilyuk@grsu.by.

УДК 531

В. Н. КРИВЕЦ, А. И. ПЕЦЕВИЧ

МЕТОДЫ КЛАССИЧЕСКОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Рассматривается разработка компьютерных демонстрационных и исследовательских моделей кластеров различными методами и подходами. Рассмотрен алгоритм и построены компьютерные модели взаимодействия атомов с помощью потенциала Ленард-Джонса.

Разработана компьютерная модель, с помощью которой методом вычислительного эксперимента можно определять геометрические и динамические характеристики кластера (рисунок 1). Данное приложение было разработано на основе статьи «Методы молекулярной динамики» [2].

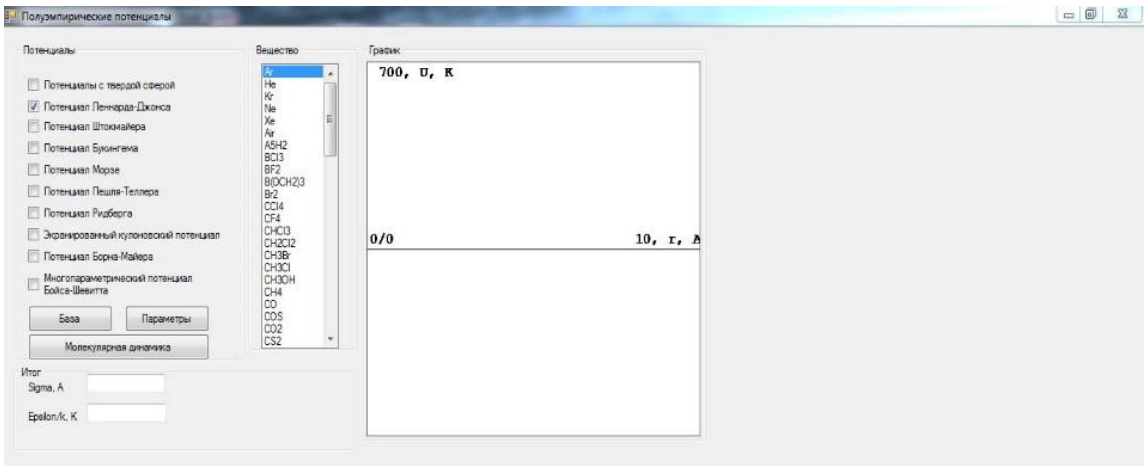


Рисунок 1 – Вход в программу

Интерфейс программы позволяет выбирать начальную конфигурацию атомов в кластере. Компактная упаковка, атомы располагаются автоматически – рисунок 2. Произвольная упаковка, расположение атомов задаётся произвольно пользователем кликом компьютерной мыши – рисунок 3.

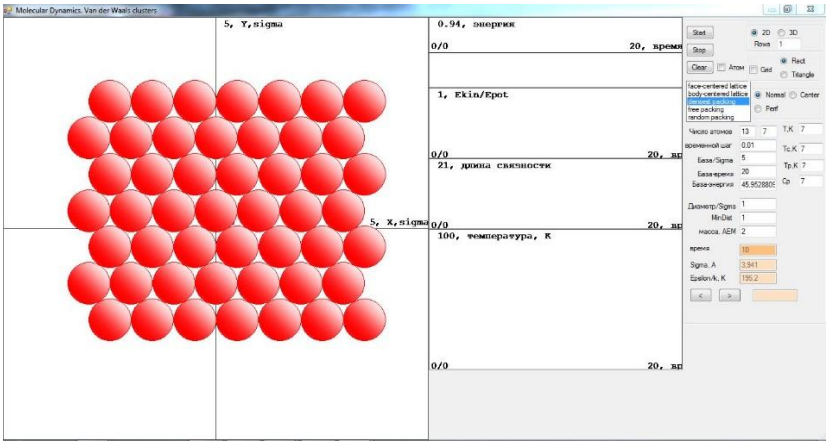


Рисунок 2 – Компактная упаковка

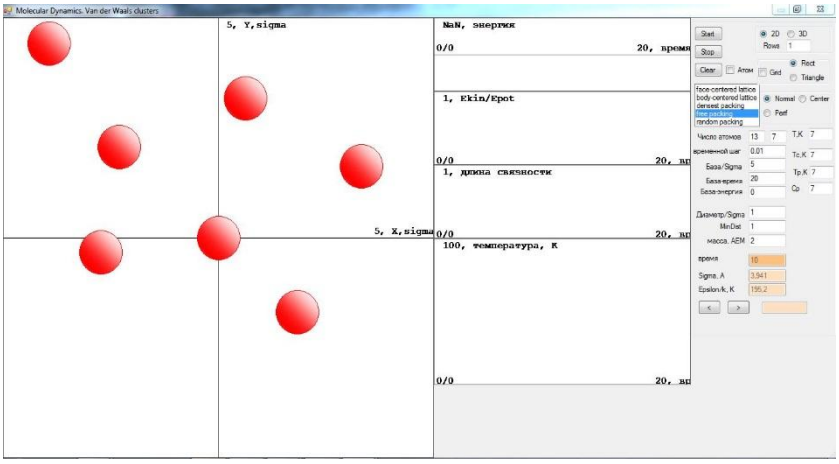


Рисунок 3 – Произвольная конфигурация атомов в кластере

Задается минимальное расстояние между атомами, которое определяет потенциальную энергию системы. Начальные скорости принимаются равными нулю. Устойчивость численного решения проверяется постоянством полной энергии системы.

Также возможно варьирование количества атомов, и их маркировка цветом для удобства отслеживания величины температуры.

Для определения неравновесности температуры в кластере воспользуемся возможностью маркировки атомов в центре и на периферии.

На рисунке 4 представлены различия в изменении температуры для кластера содержащего, 49 атомов.

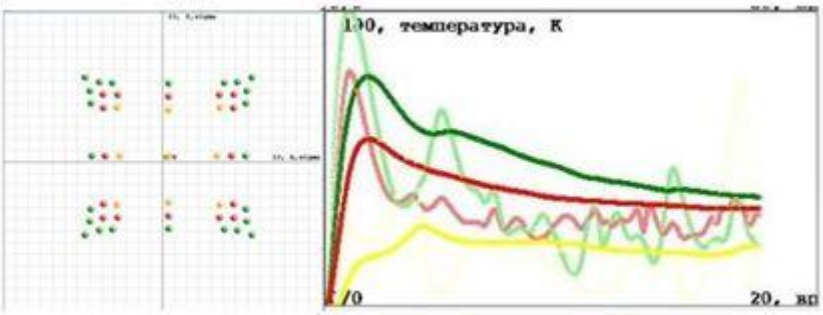


Рисунок 4 – Зависимость температуры различных точек кластера

На рисунке 5 представлен график зависимости температуры для 196 атомов, первоначально имеющих однотипную упаковку с кластером на рисунке 4.

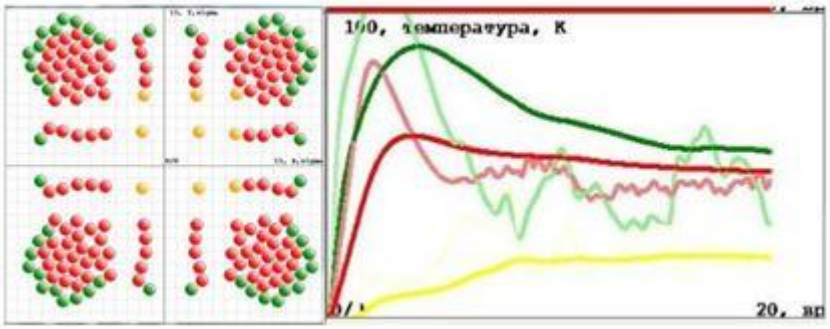


Рисунок 5 – Зависимость температуры различных точек кластера

На начальной стадии имеет место ярко выраженное отличие температуры на периферии кластера и внутри его. Сравнение вычислительных экспериментов показывает, что различие температуры на поверхности и внутри уменьшается с увеличением размера кластера.

Список литературы:

1. Хеерман, Д. В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике / Д. В. Хеерман. – М.: Наука, 1990. – 320 с.
2. Гаевский, С. В. Методы молекулярной динамики / С. В. Гаевский, Д. Н. Сях // Физика конденсированного состояния: материалы XXII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 17–18 апр. 2014 г. / Гродн. гос. ун-т; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2014. – С. 8
3. Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике: в 2 т. / Х. Гулд, Я. Тобочник. – М.: Мир, 1990.
4. Федоренко, Р. П. Введение в вычислительную физику/ Р. П. Федоренко. – М.: Изд. Моск. физ.-техн. ин-та, 1994, – 274 с.
5. Allen, M. P. Computer Simulation of Liguids / M. P. Allen, D. J. Tildesley. – Oxford; Oxford University Press, 1990. – 410 p.
6. Аксёнов, Е. В. Вычислительные методы исследования молекулярной динамики / Е. В. Аксёнов, М. С. Кшевецкий. – СПб.: СПбГУ, 2009. – 114 с.
7. Никитин, А. В., Компьютерное моделирование физических процессов / А. В. Никитин, А. И. Слободянюк, М. Г Шишаков. – М.: БИНОМ, 2010. – 697 с.

This paper describes the development of a computer demonstration and research models of clusters of different methods and approaches. The considered algorithm and built a computer model of the interaction of atoms with potential Lenard-Jones.

Кривец Владимир Николаевич, студент 5 курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.
Пецевич Андрей Иванович, студент 5 курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.
Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой теоретической физики, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 621.3.038

П. М. ЛОБАЦЕВИЧ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПОВЕРХНОСТНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ В ОБЛАСТЯХ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

В рамках предложенной ранее модели поляризационных компонент проведено моделирование формирования статистических характеристик поверхностно-излучающих полупроводниковых лазеров в областях поляризационной неустойчивости. Результаты численного моделирования показывают, что основную роль в формировании статистических характеристик играют не флуктуации спонтанного испускания, а флуктуации концентрации неравновесных носителей. В этом случае проявляются все основные особенности статистических распределений, которые регистрируются экспериментально.

Обычно считается, что статистические характеристики полупроводниковых лазеров определяются флуктуациями спонтанного испускания. Однако при исследовании поляризационных переключений в поверхностно-излучающих лазерах, высказывались предположения, что флуктуации спонтанного испускания не могут быть единственным доминирующим фактором в областях поляризационной неустойчивости. Эти области связаны с переключением поляризации, т. е. процессом быстрого изменения поляризации выходного излучения с фиксированной линейной поляризацией на ортогональную к ней при малом изменении инжекционного тока. В этом случае даже малые флуктуации параметров (например, тока инжекции) могут

существенным образом влиять на выходные характеристики. В данной работе и поставлена задача выяснения на основе численного моделирования влияния флуктуаций различных параметров на интенсивность и поляризацию выходного излучения.

В основу теоретической модели положен метод поляризационных компонент [1, 2], в рамках которого излучение рассматривается в виде некогерентной композиции линейно поляризованных компонент всевозможных ориентаций в плоскости волнового фронта, эволюция которых в активной среде лазера рассматривается независимо, а их связь реализуется через концентрацию неравновесных носителей и, следовательно, коэффициент усиления. Такой подход позволяет рассматривать процесс формирования поляризованного излучения как последовательную эволюцию частично поляризованного света, в котором конечное состояние поляризации определяется ориентационной анизотропией коэффициентов усиления и потерь.

Данный подход позволяет естественным образом учесть статистический характер спонтанного испускания, который имеет две стороны. Первая связана с тем, что фотон спонтанного испускания будет поляризован случайным образом, т. е., с позиции нашей теории, будет давать вклад только в одну компоненту. Другими словами случайность процесса спонтанного испускания будет отражаться в случайном задании исходного разброса в интенсивности поляризационных компонент. Второй фактор связан с тем, что общее число спонтанно испущенных фотонов в единице объема активной среды тоже будет меняться случайным образом, однако этот фактор, по нашему мнению является менее существенным для определения статистических характеристик. Таким образом, для проверки предположения о доминирующей роли спонтанного излучения в формировании статистических характеристик было исходно проведено моделирование, в котором другие источники флуктуаций были исключены.

Результаты численного моделирования показали, что, даже при чрезвычайно высокой дисперсии функций распределения флуктуаций компонент спонтанного излучения, дисперсия функции распределения для степени поляризации оказывается достаточно малой, причем её средние значения соответствовали стационарным значениям, что указывает на корректность процедуры моделирования. Более того, дисперсия функции распределения суммарной выходной интенсивности оказалась настолько малой, что функция распределения близка к дельта-функции Дирака.

Этот вывод совершенно не согласуется с имеющимися в литературе экспериментальными данными [3], поэтому, с точки зрения возможного устранения ошибок, была проведена корректировка модели, связанная в частности с малым вкладом спонтанного излучения в моду генерации, однако увеличение этого фактора даже на два порядка меняет среднее значение для степени поляризации (что вполне согласуется с качественной интерпретацией такого явления), но в то же время не меняет принципиально величины дисперсий функции распределения как поляризации, так и интенсивности.

Вторым фактором, который требовал интерпретации, было то, что широко распространенный в теории подход на основе поляризационных мод дает вполне приемлемые результаты для статистических характеристик. Этот подход основан на представлении, что поляризации выходного излучения определяется конкуренцией двух ортогонально поляризованных мод, которые формируются независимо. Поэтому было проведено моделирование с учетом уменьшения числа поляризационных компонент. Оно показало, что при уменьшении числа поляризационных компонент менее 10 дисперсии функций распределения начинают резко возрастать и в пределе перехода к двум компонентам стремятся к тем значениям, которые получаются в рамках модели поляризационных мод.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что флуктуации спонтанного испускания не являются доминирующим механизмом формирования статистических характеристик, а метод поляризационных мод не учитывает в полной мере специфику процесса спонтанного испускания. В плане выяснения влияния других механизмов флуктуаций были рассмотрены флуктуации плотности носителей и плотности инжекционного тока. Результаты моделирования показали:

— дисперсии функций распределения для суммарной интенсивности и степени поляризации оказываются сопоставимыми с результатами, наблюдающимися на эксперименте;

— функции распределения компонент выходной интенсивности поляризованных по ортогональным направлениям, соответствующим поляризационным модам, имеют явно выраженную асимметрию, что соответствует результатам работы [3];

— функция распределения степени поляризации взятых вблизи точки поляризационного переключения при увеличении флуктуации тока сначала расплываются, а затем в центре формируется провал, а максимумы уходят на края распределений и для достаточно большой величины флуктуаций эти значения стремятся к ±1, что соответствует так называемому процессу «перескоку мод».

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Основным источником флуктуаций в областях поляризационной неустойчивости поверхностно-излучающих лазеров можно считать флуктуации плотности неравновесных носителей, тем более что они вызывают соответствующие флуктуации коэффициентов усиления, что неизбежно существенным образом отражается на выходных характеристиках.

2. Можно считать, что метод поляризационных компонент достаточно адекватно описывает процесс формирования поляризованного излучения в полупроводниковых лазерах. Но тогда, следуя идеологии этого метода, процесс поляризационного переключения следует рассматривать как детерминированный переход (хотя и достаточно быстрый) от одного линейно поляризованного состояния к другому, ему ортогональному, а не как процесс конкуренции двух независимых ортогонально поляризованных состояний. Другими словами, процесс поляризационного переключения в поверхностно-излучающих лазерах не является по своей природе бистабильным.

Список литературы

1. Джадан, М. Динамика переключения поляризации излучения в одномодовом инжекционном полупроводниковом лазере / М. Джадан, Л. И. Буров, А. С. Горбацевич, Е. С. Соколов // Журн. прикл. спектр. – 2010. – Т. 77. – С. 74–81.
2. Джадан, М. Переключения поляризации излучения в одномодовом инжекционном полупроводниковом лазере / М. Джадан, Л. И. Буров, А. С. Горбацевич, Е. С. Соколов // Журн. прикл. спектр. – 2009. – Т. 76, № 5. – С. 717–724.
3. Garrison, T. W. S. Noise behavior of pulsed vertical-cavity surface-emitting lasers / T. W. S. Garrison, M. Beck, D. H. Cristensen // J. Opt. Soc. Am. B. – 1999. – Vol. 16, No 11. – P. 2124–2130.

In the frame of early propose the polarized component approach the modeling of VCSEL polarization parameters within polarization instability regions have been made. Simulation results shows that the main role plays not fluctuation of spontaneous emission but noise of currier density. In that case there are displayed all peculiarities of statistical distributions that are registrated in experiments.

Лобацевич Павел Михайлович, студент 5 курса БГУ, Минск, Беларусь, pavel.lobatsevich@mail.ru.
Научный руководитель – *Буров Леонид Иванович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физического факультета БГУ, Минск, Беларусь, burov@bsu.by.

УДК 628.15

А. Ю. ЛУЧИНА

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

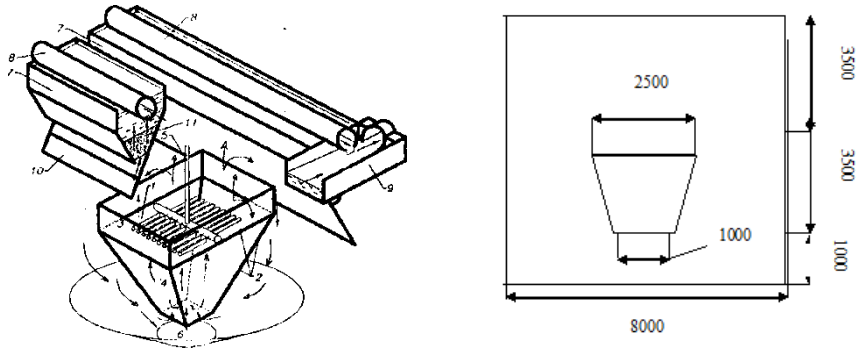
С помощью метода математического моделирования ставятся и решаются задачи, связанные с оптимальным проектированием очистных сооружений. Предложены рекомендации к модернизации и реконструкции канализационных очистных сооружений Донецкой области в Украине, которые предусматривают перенаправление гидродинамических потоков воды, обрабатываемой активным илом, и модернизацию отдельных сооружений и узлов.

Несмотря на значительные достижения в изучении динамики развития микробных популяций, при расчете основных технологических параметров очистных систем зачастую руководствуются эмпирическими соображениями. В ряде случаев это приводит либо к неоправданному завышению объема сооружений биологической очистки, либо, наоборот, объем сооружений оказывается недостаточным для того, чтобы обеспечить нужную степень очистки и надежность работы очистного комплекса.

В последнее время было проведено множество экспериментов по разработке технологий, позволяющих достичь действующих нормативов, а также по переносу существующих западных технологий на украинские очистные сооружения [1–5]. Сложность внедрения разработанных методов очистки сточных вод состоит в том, что большинство очистных сооружений, промышленных предприятий, городов и поселков в Украине уже построены до 1990-х гг. и в настоящее время нуждаются в реконструкции.

Целью данного исследования являлась разработка рекомендаций для реконструкции очистных сооружений на основе построенных векторного и скалярного поля скоростей гидродинамических потоков в системе аэротенк – аэрационно-циркуляционная колонна, а также анализа основных факторов, влияющих на распределение потоков жидкости и, соответственно, распределение хлопьев активного ила по объему биореактора.

Исследования проводились на промышленном аэротенке-смесителе шахтного типа общей производительностью 6 тыс. м^3/сутки на очистных сооружениях в пгт. Новый Свет (Украина). Основная часть реактора, где происходит микробиологическая очистка сточных вод, представляет собой цилиндр-стакан диаметром 8 м и глубиной 8 м, который расположен в земле и заполнен сточной водой и активным илом. Внутри цилиндра-стакана расположена затопленная аэрационно-циркуляционная колонна. Она представляет собой усеченную пирамиду общей высотой 3,7 м. Внутри колонны на глубине 4,8 м размещена аэрационная система из тканевых аэраторов трубчатой конструкции диаметром 100 мм, которая обеспечивает замкнутую вертикальную циркуляцию потока жидкости в аэротенке и растворение кислорода в жидкости.



1 – тканевые аэраторы; 2 – несущие элементы; 3 – зона смешения; 4 – зона всасывания; 5 – подача воздуха; 6 – днище аэротенка; 7 – отстойник ила; 8 – дырчатая труба отвода очищенной воды; 9 – сборный лоток очищенной воды; 10 – струенаправляющая пластина; 11 – взвешенный слой активного ила.

Рисунок 1 – Общий вид ПРНД и размещение в нем циркуляционной колонны

Для моделирования циркуляционных потоков используется математическая модель [6], позволяющая определить поле скоростей в зависимости от геометрических параметров, глубины расположения циркуляционной колонны в объеме сооружения, наполненной жидкостью, в зависимости от количества вносимого воздуха. При решении задачи предполагается: процесс стационарный; жидкость считается изотермической и несжимаемой; физические характеристики считаются однородными и изотропными; деформацией свободной поверхности можно пренебречь; процессы в установке считаются симметричными относительно оси; химические реакции не учитываются.

Для описания движения жидкости использована система уравнений, состоящая из уравнения неразрывности и уравнения Навье-Стокса:

$$\nabla\vec{u} = 0\,;$$

$$\rho\left(\vec{u}\cdot\nabla\right)\vec{u} = \nabla\left[-p\vec{I} + \left(\eta+\eta_T\right)\left(\nabla\vec{u} + \left(\nabla\vec{u}\right)^T\right)\right],$$

где $\vec{u}$, ρ и p – скорость, плотность и давление жидкости, η – коэффициент динамической вязкости, η_T – турбулентная вязкость, $\vec{I}$ – единичный тензор.

На нижней и боковых границах расчетной области использовалось условие прилипания; на верхней границе расчетной области выполняется условие скольжения.

Гидродинамическая обстановка в модели аэротенка при центральном расположении мелкопузырчатого аэратора характеризуется двумя контурами циркуляции с вращением по часовой (правый контур) и против часовой стрелки (левый контур) (рисунок. 2). При этом наблюдается: 1) зона восходящих потоков, находящихся вблизи колонны и обусловленных активной подачей из диспергатора воздушных масс; 2) зона нисходящих потоков, которые находятся на расстоянии 4-5 диаметров колонны; 3) застойные зоны в углах аэротенка и центральной части внешнего потока, где отсутствует перемешивание и вовлечение активного ила в поток.

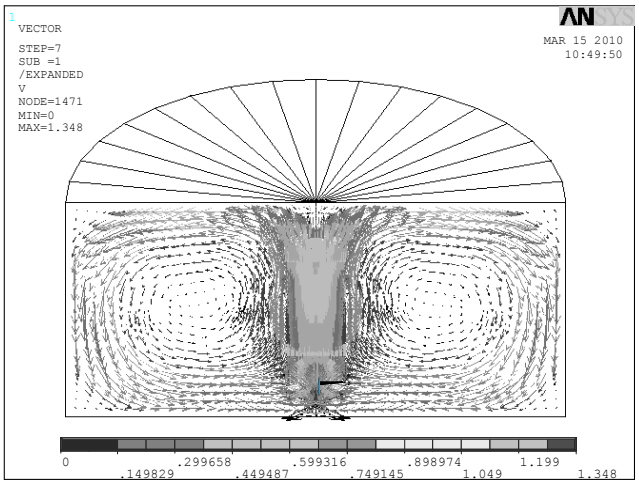


Рисунок 2 – Векторное поле скоростей в системе «аэрационная колонна – аэротенк», полученное в пакете программ ANSYS Flotran.

В результате проделанной работы предложены рекомендации к оптимизации работы существующих очистных сооружений, которые заключаются в следующем:

- переоборудование двухъярусных отстойников в аэротенки-отстойники;
- осуществление аэрации с помощью аэрационно-циркуляционной колонны;
- использование аэраторов определенной геометрической конструкции в качестве аэрационных устройств;
- создание более развитой (разветвленной) поверхности колонны для дополнительного неподвижного закрепления микрофлоры.
- проектирование аэротенков с закругленными углами, причем линия закругления должна соответствовать нулевой линии тока потока газожидкостной системы, для ликвидации застойных зон.

Список литературы

1. Lawrence K. Wang, Nazih K. Shammas. Single-Sludge Biological Systems for Nutrients Removal. Handbook of Environmental Engineering. 2009, no. 9, pp. 209–270.
2. Gao Shun Qiu, Ling Feng Qiu, Jian Zhang, Yi Ming Chen. Research on Intensive Nutrients Removal of the Low C/N Sewage. Advanced Materials Research. 2012, no. 550-553, pp. 2142–2145.
3. Cherlys Infantea, Ivan Leonb, July Florezb, Ana Zarateb, Freddy Barriosa, Cindy Zapataa. Removal of Ammonium and Phosphate Ions from Wastewater Samples by Immobilized Chlorella sp. International Journal of Environmental Studies. 2013, vol. 7, no. 1, pp. 1–7.
4. Endre Domokos, Viola Somogyi, Akos Redey, T. Yuzhakova. Adaptating dynamic simulation to a wastewater treatment plant reconstruction // Agriculture and Environment, 1 (2009) 38–45.
5. Нездойминов, В. И. Совершенствование технологий биологической очистки городских сточных вод / В. И. Нездойминов, О. В. Майстренко, В. С. Рожков // Водопосточання. – Р., 2008. – Вып. 3. – С. 11–13.
6. Bezkrovna M., Kazak O., Luchyna A. Recommendation of sewage treatment facilities and improvement of their efficiency // Interdisciplinary Integration of Science in Technology, Education and Economy. Monograph: edited by Shalapko J. and Zołtowski B. – Poland, 2013. – 646 p.

Recommendations to the modernization and reconstruction of sewage treatment facilities in Donetsk, which provide redirection hydrodynamic flows of treated water and modernization of individual buildings and sites, as well as audit and recovery of degraded non-standard equipment, are considered.

Лучина Анастасия Юрьевна, Донецкий национальный университет, Донецк, Украина, anastasiia.luchyna@gmail.ru.
Научный руководитель – *Недопекин Федор Викторович*, профессор, доктор технических наук; Донецкий национальный университет, Донецк, Украина.

УДК 535.317, 535-34

Е. А. МАЛАХОВСКИЙ, О. И. КРАВЧЕНКО, Л. К. МАШЛЯКЕВИЧ,
Ю. Р. ЯСКЕВИЧ, П. В. ПЕТРОВ, Н. Н. КОЛЬЧЕВСКИЙ

МАТРИЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛИНЗ

Проведен расчет фокусных расстояний короткофокусных микрокапиллярных и адиабатических преломляющих рентгеновских линз матричным методом.

В 1996 году была предложена идея использовать многоэлементную линзу для фокусировки жесткого рентгеновского излучения [1]. Применение многоэлементной линзы, состоящей из N отдельных линз, позволяет в N раз уменьшить фокусное расстояние системы по сравнению с отдельной линзой. Следующим шагом в развитии составной преломляющей линзы является адиабатическая линза [2]. Основным отличием от составной линзы является применение микролинз переменного радиуса, постепенно уменьшающихся по ходу следования пучка рентгеновского излучения (рис. 1). Адиабатично-фокусирующие линзы показывают относительно большую числовую апертуру, сжимая пучок жесткого рентгеновского излучения к поперечному размеру 2 нм, что значительно меньше теоретического предела, фокусируемого волноводами. Сегодня доступны несколько типо преломляющих рентгенооптических элементов, которые могут фокусировать рентгеновские лучи с поперечным размером в диапазоне 100 нм и меньше. Современные короткофокусные линзы содержат 100–500 отдельных микролинз.

Целью работы является расчет фокусного расстояния и кардинальных точек микрокапиллярных и адиабатических рентгеновских линз.

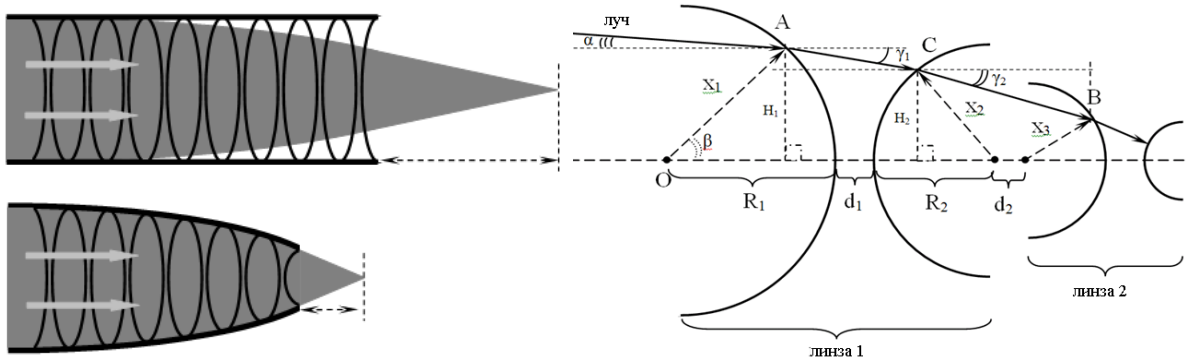


Рисунок 1 – Модель и схема расчета адиабатической и микрокапиллярной преломляющей линзы

Длина волны рентгеновского излучения много меньше линейных размеров преломляющих структур, что позволяет использовать методы геометрической оптики для расчета. Матричная оптика универсальный метод расчёта оптических систем центрированных оптических систем [3]. Рентгеновские преломляющие линзы являются центрированными оптическими системами (центры кривизны отражающих и преломляющих поверхностей лежат на одной прямой – на главной оптической оси (рис.1)). Если известно направление распространения светового луча перед оптической системы, тогда соответствующие координаты луча после прохождения оптической системы определяются матрицей оптической системы. Матричное преобразование – это приближенное линейное описание системы, когда выполняется параксиальное приближение, что должно выполняться для преломляющих рентгеновских линз. Зная матрицу оптической системы можно легко найти кардинальные точки оптической системы: передний и задний фокусы (F1 и F2) системы.

В работе будут представлены расчеты фокусных расстояний микрокапиллярных и адиабатических линз матричным методом. Результаты расчета будут сравниваться с результатами моделирования распространения тестовых лучей в преломляющих линзах. Анализ результатов позволяет предложить аналитические формулы для расчета фокусного расстояния короткофокусных микрокапиллярных и адиабатических линз.

Список литературы:

2. Snigirev, A. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays / A. A. Snigirev [et al.]. // Nature. – 1996. – V. 384. – P. 49–51.
3. Schroer, C. G. Focusing Hard X Rays to Nanometer Dimensions by Adiabatically Focusing Lenses / C. G. Schroer, B. Lengeler // Physical Review Letters. – 2005. – P. 054802–054802–4.
4. Матвеев, А. Н. Оптика. / А. Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1985. – 352 с.

For short focal microcapillary and adiabatic refractive x-ray lenses focal distance by matrix method are calculated.

Малаховский Евгений Алексеевич, студент БГУ, Минск, Беларусь, malahovskiyevgeniy00@gmail.com.
Научный руководитель – *Кольчевский Николай Николаевич*, доцент, кандидат физико-мктематических наук., доцент БГУ, Минск, Беларусь, kolchevsky@bsu.by.

УДК 004.896

Г. Е. НОВИКОВ

УПРАВЛЕНИЕ В СИМУЛЯТОРЕ ТРАНСПОРТНЫМ ПРИВОДОМ IROBOT CREATE

Разработан программный комплекс дистанционного управления роботом, работающий в двух режимах, одновременно считывающий показания с датчиков (сенсоров), подключенных к роботу, для анализа состояния и положения робота.

Необходимость разработки роботов, способных осуществлять интеллектуальную деятельность, крайне высока в силу возросших требований к робототехническим системам. Современные роботы могут выполнять различные операции, подчиняясь командам оператора или по заранее составленной программе. Организовано управление роботом, при этом производится считывание со всех датчиков, установленных на нем, а также анализ полученных данных, в целях полного контроля над роботом и его состоянием. Управление реализовано в интерактивном режиме – с использованием джойстика и в автономном – по заранее заданным траекториям. Решение данной задачи организовано в среде MRDS, в которой прототипом реального робота выступает iRobotCreate.

Для управления с помощью джойстика используется специальный сервис DesktopJoystick, который считывает положения положение центра джойстика по оси OX и OY и с каждым изменением координат отправляет уведомляющее сообщение на вход сервиса SimulatedGenericDifferentialDrive. После чего по

формулам (1) и (2) высчитывается количество подаваемой энергии на левый и правый приводы соответственно в значениях от -1 до 1. Знак минус соответствует вращению привода в противоположную сторону, то есть против часовой стрелки.

$$(-Y + X)/1000 \quad (1)$$

$$(-Y - X)/1000 \quad (2)$$

На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма управления робота с использованием джойстика и мыши.

По такому же принципу реализовано движение по заранее заданным траекториям, именно в способе приведения в движение двух приводов робота. Отличие состоит в том, как определяется количество энергии, подаваемой на приводы. При организации движения по кругу возможен выбор направления движения по часовой стрелке или против, выбор радиуса и выбор скорости движения. При движении роботом восьмеркой изменяемыми параметрами являются радиус и скорость. Для движения по траекториям создаются отдельные диаграммы и уже в них, на основании полученных значений направления, радиуса и скорости, определяется количество энергии, необходимое для осуществления движения роботом по выбранной траектории и выбранным параметрам. Результат работы показан на рисунке 2.

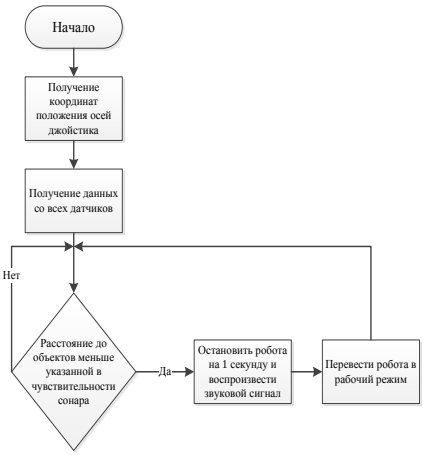


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма управления робота с использованием джойстика и мыши

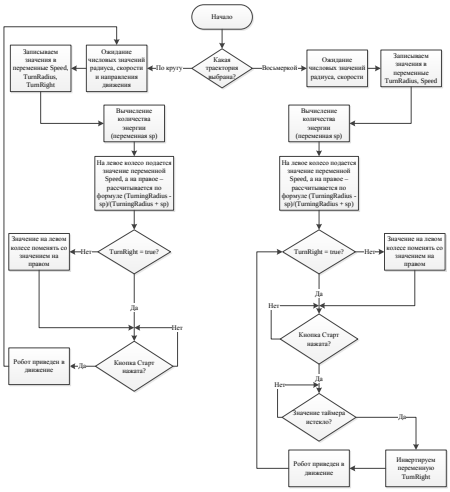


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма управления робота по заданным траекториям

Параллельно с организацией движения, роботом производится анализ данных, приходящих со всех датчиков (сенсоров), подключенных к нему. Для определения расстояния до объектов используются лазерный дальномер (дальность составляет 8 метров, угловой диапазон 180 градусов, угловое разрешение – 0,5 градуса.), инфракрасный сенсор (дальность – 0,762 метра, определение расстояния строго впереди датчика) и сонар (дальность – около 100 метров, угловой диапазон 120 градусов, угловое разрешение – 0,5 градуса). Необходимо понимать, что у каждого из датчиков есть свой ряд преимуществ и недостатков. Основополагающими параметрами являются погрешность и дальность, поэтому использование двух, трех датчиков на роботе является обусловленным.

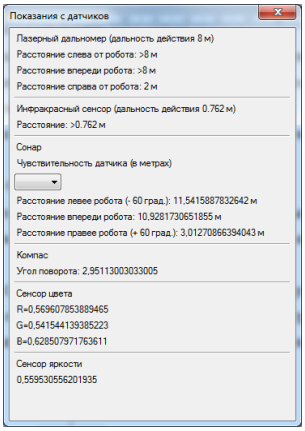


Рисунок 3 – Окно с показаниями датчиков

Так же на роботе установлен сенсор яркости и сенсор цвета, второй определяет присутствие света, а также цвет, попавший в поле зрения сенсора, в системе RGB.Они не могут использоваться для реализации зрения, так как не создают изображение. Сенсор цвета (света) может применяться при реализации различного поведения роботов, допустим такого робота, который ищет или избегает свет. Установленный компас, решает проблему ориентации робота в пространстве. Компас предоставляет абсолютные значения угла, то есть ошибка измерения угла поворота не накапливается со временем. Значение угла поворота измеряется на отрезке[-3,14; 3,14]. Вращение робота по часовой стрелке приводит к получению положительных значений угла, против часовой – к отрицательных.

Появление роботов позволило человеку не принимать участия в процессе обработки информации, поступающей с датчиков, но влиять на управления им и самостоятельно принимать решения, основываясь на полученных данных.

Список литературы

1. Гай, В. Е. Microsoft Robotics Developer Studio. Программирование алгоритмов управления роботами / В. Е. Гай. – М.: ЭКОМ Паблишерз, 2012. – 184 с.
2. Мартыненко, Ю. Г. Управление движением мобильных колёсных роботов / Ю. Г. Мартыненко. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2005. – С. 29–80.

Program complex remote control robot operating in two modes, while readings from sensors (sensors) connected to the robot, to analyze the condition and position of the robot.

Новиков Глеб Евгеньевич, студент 5 курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, hleb.novikov@gmail.com.
Научный руководитель – *Садовская Ольга Иосифовна*, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, ign_olga@mail.ru.

УДК: 535.317; 621.386

П. В. ПЕТРОВ, Ю. Р. ЯСКЕВИЧ, О. И. КРАВЧЕНКО, И. И. СОРОКО, Н. Н. КОЛЬЧЕВСКИЙ

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА CRL-ТИПА

Предлагается новый вид рентгеновской трубки CRL-типа. Данная трубка изготавливается на основе стандартной рентгеновской трубки путем модификации её анода или выпускного окна с помощью рентгеновской многоэлементной преломляющей линзы CRL. Анализируются свойства и характеристики получаемого излучения для предлагаемой трубки. Обсуждаются возможности изготовления прототипа такого источника.

Источники рентгеновского излучения представлены в основном четырьмя устройствами: рентгеновскими трубками, синхротронами, высокотемпературной плазмой, рентгеновскими лазерами. Современная рентгеновская трубка (РТ) представляет собой электровакуумный диод высокой мощности, размещенный в стеклянной вакуумной колбе с выпускным окном, изготовленным из слабо поглощающих материалов. Принцип действия такой трубки основан на торможении свободных электронов в материале анода. Через катод, изготовленный в виде спирали из тугоплавкого материала, пропускается электрический ток в несколько ампер. В результате термоэмиссии катод генерирует свободные электроны, которые ускоряются к аноду приложенной разностью потенциалов в несколько десятков киловольт. Торможение свободных электронов происходит в электростатическом поле атомных ядер материала анода. Анод рентгеновской трубки может представлять собой как массивный материал, изготовленный, например, из меди, так и тонкую пленку, нанесенную на поверхность выпускного окна. Выпускное окно может быть расположено в торце трубки или на её боковой поверхности, а рабочий участок анода при этом располагается либо перпендикулярно пучку свободных электронов, либо под некоторым углом к нему. Современные рентгеновские трубки различаются по способу генерации излучения (с отражательным анодом, прострельным анодом, жидким анодом), способу получения пучка электронов (термоэмиссионные, автоэмиссионным, радиоактивным (β) источником электронов), вакуумированию (отпаянные, разборные), охлаждению анода (с водяным, воздушным, масляным охлаждением), размерам (макрофокусные, острофокусные, микрофокусные) и форме фокуса (кольцевой, круглой, линейчатой формы), времени излучения (непрерывного действия, импульсные) и др. [2]

Новыми элементами рентгеновской техники, получившими бурное развитие за последние 20 лет, являются составные рентгеновские линзы (в англ. Compound Refractive Lens, CRL)[3]. На сегодня известно более десятка разработанных конструкций составных преломляющих линз (одномерные и двумерные параболические линзы, линза-аллигатор, клессидра, микрокапиллярная линза, адиабатическая линза, 3D линза и др.) [4]. Типичная линза CRL представляет собой массив из двояковогнутых микролинз, центрированных на одной оптической оси. Составная линза может состоять от десятков до нескольких сотен отдельных микролинз, выполненных из материалов с малым атомным номером. Данные линзы обладают хорошим пропусканием (до

18 %), отличаются от традиционных рентгенооптических элементов своей короткофокусностью (единицы сантиметров), имеют компактный размер (радиус микролинзы 500–50 мкм) и форму, удобную для отвода тепла. Данные линзы продемонстрировали хорошие возможности использования в качестве концентраторов и объективов для синхротронных источников третьего поколения и микрофокусных рентгеновских трубок [5].

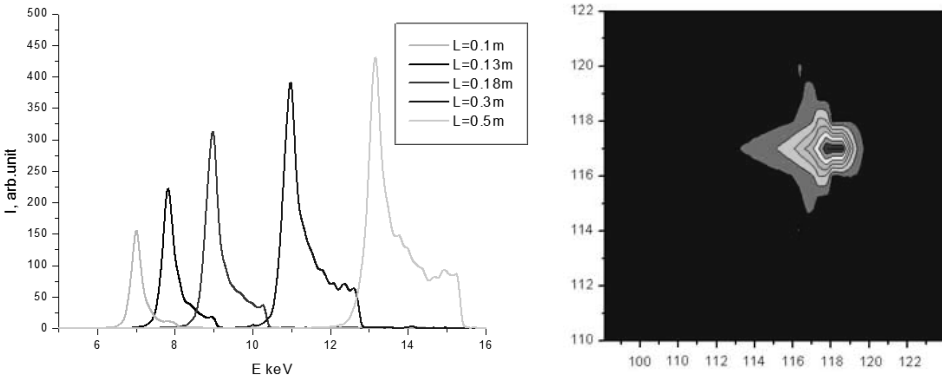
Целью доклада является изучение возможностей использования CRL структур в качестве анода трубки и/или выпускного окна. В работе методами численного моделирования в приближении геометрической оптики анализируется спектральный состав и угловая расходимость излучения на выходе рентгеновской трубки CRL-типа. Обсуждается оптимальная форма активной области источника, генерирующая рентгеновские фотоны и позволяющая получить сфокусированные пучки на выходе CRL размером менее 50 мкм.

CRL линза может быть интегрирована в рентгеновскую трубку в качестве прострельного анода. Электронный пучок будет проникать внутрь первых микролинз CRL-структуры. Процесс рождения рентгеновских фотонов будет происходить непосредственно в первых микролинзах. Размер активной области ограничивается длинной свободного пробега электронов в веществе. Сгенерированное рентгеновское излучение распространяется в режиме преломления по CRL структуре. Параметры CRL структуры определяют спектральные и угловые характеристики выходного излучения. Рентгеновская трубка CRL-типа будет характеризоваться минимальным расстоянием между фокусным пятном и областью генерации фотонов, если длина L равна двум её фокусным расстояниям F, так как фокусное пятно является изображением области генерации фотонов. Из данного условия можно оценить предельные размеры CRL линзы для различных длин волн и радиусов.

$$M = \frac{D^2}{D-F} \cong 4RN \cong 2L \ ,$$

где M – минимальное расстояние от источника до изображения, D – расстояние от линзы до фокусного пятна, N – количество микролинз в CRL, R – радиус микролинз.

CRL-линза может быть использована в рентгеновской трубке вместо выпускного окна. Тогда источник рентгеновских фотонов (анод) расположен на расстоянии 0,5–1 см от CRL структуры. В зависимости от параметров CRL структуры рентгеновская трубка такого типа на выходе будет создавать действительное или мнимое изображение источника. Для существующих типов CRL структур можно получать действительное изображение источника на расстоянии 20–50 см от линзы или формировать пучок диаметром 50–300 мкм с малой угловой расходимостью. Из-за хроматических аберраций CRL линза выполняет спектральную фильтрацию, выходящего сфокусированного излучения, с шириной спектрального пика ΔE = 1 кэВ (рис.1а). Таким образом, если за рентгеновской трубкой с интегрированной CRL линзой расположить щель, перемещаемую вдоль оптической оси можно получить перестраиваемый рентгеновский источник. Для трубок, характеризующихся тормозным спектром, такая структура является хроматическим фильтром. Спектральный состав фокусного пятна зависит от фокусного расстояния для заданной CRL линзы [6].



а) б)

Рисунок 1 – а) спектральное распределение интенсивности в фокусном пятне рентгеновской трубки CRL-типа; б) распределение интенсивности в фокальном пятне источника рентгеновских фотонов, размеры в мкм

Отличительной особенностью обоих подходов изготовления нового типа рентгеновских CRL трубок является то, что коллиматор пучка (CRL линза) и источник рентгеновских фотонов будут выполнены в едином корпусе и юстированы вдоль общей оптической оси. Характеристики CRL структур будут определять спектральные и угловые характеристики рентгеновского излучения. Применение CRL рентгеновских трубок даст возможность получать сфокусированные микропучки для сканирующих методов рентгеновской микроскопии и спектроскопии. Использование короткофокусных CRL структур адиабатического типа позволяет управлять формой и размерами области, из которой возможен выход излучения (рис.1б). Взаимная ориентация области возбуждения фотонов (фокусировка электронного пучка) и области, из которой возможен

выход излучения (фокусировка рентгеновских фотонов), позволит создавать микрофокусные рентгеновские источники CRL-типа.

В работе будут рассматриваться численные расчеты параметров CRL структур и характеристики излучения на выходе рентгеновской трубки CRL-типа на основе моделирования методом Монте-Карло распространения рентгеновского излучения в приближении геометрической оптики. Расчеты основаны на выполненных экспериментальных исследованиях микрокапиллярных линз и теоретических расчетах с использованием суперкомпьютера СКИФ-БГУ [7].

Список литературы

1. Мишетт, А. Оптика рентгеновского излучения / А. Мишетт. – М.: Мир, 1989. – 353 с.
2. Большая энциклопедия: в 62 томах. Т. 41. – М.: ТЕРРА, 2006. – 592 с.
3. Snigirev, A. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays /A. Snigirev [et al.]. // Nature, V. 384., 1996. – P. 49.
4. Петров, П. В. Рентгеновская преломляющая оптика: состояние и перспективы / П. В. Петров, И. Л. Мудрецов, Ю. Р. Яскевич, Н. Н. Кольчевский. – VIII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика – 2013», Санкт-Петербург, Россия, 12–16 октября 2013 г. – С. 28–30.
5. Дудчик, Ю. И. Многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы – новый элемент рентгеновской техники / Ю. И. Дудчик. // 9-ая Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, Беларусь, 20–22 сентября 2011 г. – С. 409–410.
6. Kolchevsky, N. N. X-ray filter on the base of refractive compound lenses / N. N. Kolchevsky, P. V. Petrov // VII National Conference RSNE, Moscow. – 2009.
7. Яскевич, Ю. Р. Моделирование преломляющей рентгеновской линзы на суперкомпьютере СКИФ-БГУ / Ю. Р. Яскевич [и др.]. – VIII Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика – 2013», Санкт-Петербург, Россия, 12–16 октября 2013. – С. 188–191.

CRL X-ray tube as the novel source is proposed. The novel tube is a combination of a X-ray tube and a compound refractive lens (CRL). The CRL can be used as anode or as x-ray tube window. The properties and limitation of the CRL x-ray tube are discussed.

Петров Павел Васильевич, старший преподаватель, БГУ, Минск, Беларусь, piatrou@yandex.ru.
Научный руководитель – *Кольчевский Николай Николаевич,* кандидат физико-математических наук, доцент БГУ, Минск, Беларусь, kolchevsky@bsu.by.

УДК 530.1

А. И. ПЕЦЕВИЧ, В. Н. КРИВЕЦ

МОДЕЛИРОВАНИЕ АГРЕГАЦИИ ФРАКТАЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Разработаны компьютерные модели генерирования фрактальных кластеров. Представлены различные модели – регулярные, стохастические – построения фрактальных кластеров.

Целью работы является составление математической модели, алгоритма решения, а также разработка самой программы, предназначенной для демонстрации и исследования моделей генерирования фрактальных кластеров.

В последние годы наблюдается резкое возрастание интереса к неравновесному росту и процессам агрегации. В частности, интенсивно исследуются модели, приводящие к образованию фрактальных структур. Значительная часть этой работы была стимулирована качественным анализом моделей, как влияет фрактальная размерность на структуру фракталов [1].

Можно выделить большое число физических объектов, где фрактальная размерность служит основной характеристикой системы. Теория фракталов сегодня находит применение в физике, биологии, экономике, компьютерной графике[3]. 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 [2].

Разработанная программа позволяет выполнить построение традиционных регулярных фракталов (Кох, Серпинский), алгебраических (Мандельброт), стохастических (Виттен). Наиболее интересны стохастические фракталы, так как по способу генерации очень похожи на реальные физические объекты: деревья, кристаллы, природные узоры. Их построение выполняется методом агрегации ограниченной диффузией (DLA) либо его модификациями. Методами вычислительного эксперимента для стохастических моделей определены размеры сеток, обеспечивающие заданную точность расчетов.

В работе рассмотрены алгоритмы и построены компьютерные модели генерирования фрактальных кластеров. В первую очередь программа имеет образовательное предназначение, в то же время возможность

варьирования большим числом исходных параметров позволяет ее использовать для проведения вычислительных экспериментов.

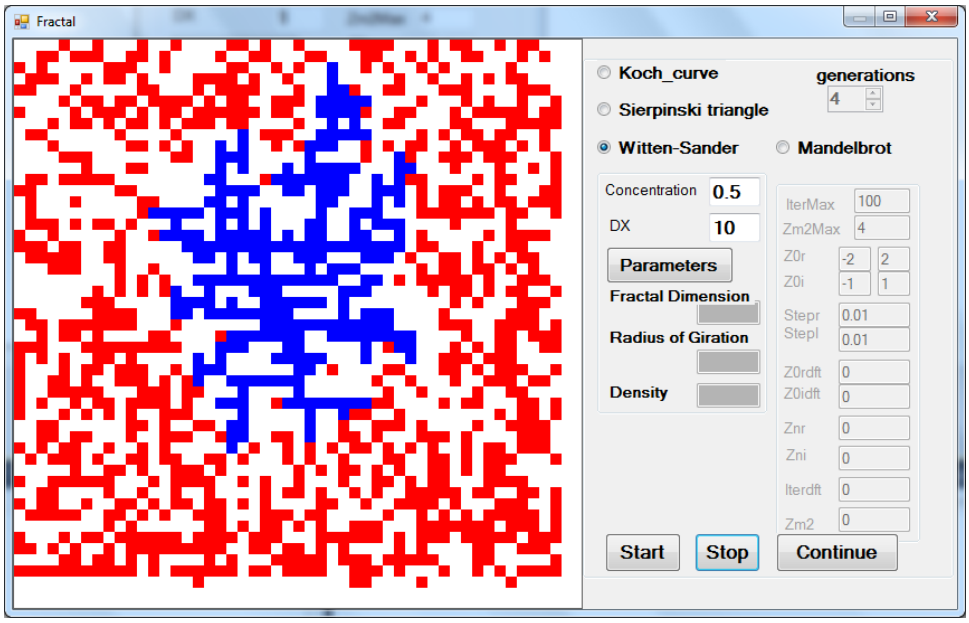


Рисунок 1 – Пример генерирования стохастического фрактала

Интерфейс программы представлен на рисунке 1.

Программа апробирована при изучении дисциплины «Моделирование физических процессов».

Список литературы

1. Фракталы в физике / под ред. Л. Пьетронеро, Э. Тозатти. – М.: Мир, 1988, – 672 с.
2. Никитин, А. В. Компьютерное моделирование физических процессов / А. В. Никитин, А. И. Слободянюк, М. Г. Шишаков. – М.: БИНОМ, 2010. – 697 с.
3. Пецевич, А. И. Моделирование фрактальных кластеров / А. И. Пецевич, В. Н. Кривец // Физика конденсированного состояния: материалы XXII междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 17–18 апр. 2014 г. / Гродн. гос. ун-т; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2014. – С. 236–237.

The example of practical use of a measuring arrangement «Tehnolab» for studying dependence of a current from a pressure on p-n transition is resulted at direct inclusion of the diode in a circuit of a source of a current and definition on the basis of these measurements of Boltzmann constant.

Пецевич Андрей Иванович, студент 5 курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.
Кривец Владимир Николаевич, студент 5 курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.
Научный руководитель – *Никитин Александр Викторович*, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой теоретической физики, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, nik@grsu.by.

УДК 669.018.6

Р. В. ПОЛИКАРПОВ

О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИИ СМЕЩЕНИЯ В РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКЕ

Предложена формула для численных оценок пороговой энергии смещения E_d атомов из узлов решетки при радиационном воздействии на твердые тела. Структура E_d определена на основе анализа процессов, сопровождающих подпороговое движение выбитого из узла решетки атома (когда энергия W, полученная атомом, не превышает E_d). Показана связь E_d с физическими свойствами твердых тел и параметрами их кристаллических решеток.

Как известно, пороговая энергия смещения E_d – это минимальная энергия, необходимая для создания устойчивой пары Френкеля с учетом угловой зависимости дифференциального сечения рассеяния налетающей частицы на атоме решетки. E_d характеризует радиационную повреждаемость материала. От её величины зависит число смещённых атомов при облучении.

В настоящей работе предлагается структура E_d с физической интерпретацией ее слагаемых, дается теоретическая оценка этой величины для некоторых металлов и показывается связь с физическими свойствами веществ.

В ряде сообщений (см., например, [1]) было показано корреляционное поведение E_d с модулем упругости Юнга E, энергией сублимации E_s, температурой плавления $T_{пл}$, температурой Дебая T_D и энергией связи $U_{св}$ атомов в решетке. На рисунке 1 приведен один из таких графиков для модуля упругости Юнга E и энергии связи $U_{св}$. Это не физические зависимости, а значения $U_{св}$, E и E_d различных элементов (Al, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Mo, Cd, Ta, W, Au, Bi), расположенных в порядке возрастания их зарядового числа Z.

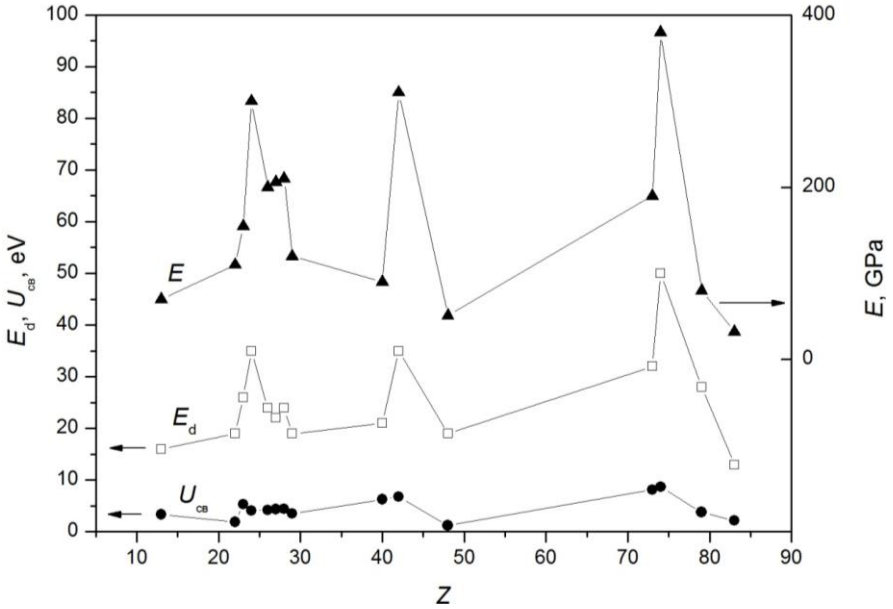


Рисунок 1 – Корреляционные кривые пороговой энергии смещения (E_d), энергии связи ($U_{св}$) и модуля Юнга (E) для ряда металлов. Значения E_d взяты из [2].

Данные корреляционные отношения между E, E_s, $T_{пл}$, T_D и E_d обусловлены тем, что эти величины прямо пропорциональны энергии связи $U_{св}$. Корреляция между $U_{св}$ и E_d, в свою очередь, свидетельствует о том, что первым слагаемым в структуре E_d можно считать энергию связи атомов в узле решетки.

Структура E_d и физическая природа ее слагаемых могут быть определены путем анализа динамики неустойчивых пар вакансия – междоузельный атом, возникающих в материале при радиационном воздействии [3, 4]. Если атом решетки получил энергию W меньшую E_d, то выйдя из узла, он через некоторое время вернется в свое исходное положение. Рассматривая его динамику как движение в среде с сопротивлением, характеризуемым коэффициентом внутрикристаллического трения ξ, можно оценить как размеры области зоны неустойчивости R, так и время τ ее прохождения. Закон сохранения энергии в этом случае может быть записан следующим образом [4, 5]:

$$E_d = E_1 + E_2 + E_3, \tag{1}$$

где $E_1 \equiv U_{св}$, $E_2 = |A_{эл}| + |A_{упр}|$, $A_{эл}$ – работа сил электростатического поля, совершаемая над движущимся междоузельным атомом, $A_{упр}$ – работа упругих сил взаимодействия вакансии и междоузельного атома при его удалении

$$E_3 = m\xi \int_0^{\tau} \mathrm{v}^2(t)dt, \tag{2}$$

Время τ определяется из решения динамического уравнения для движения выбитого из узла решетки атома, получившего энергию W ($W \le E_d$).

$$m\frac{d^2\rho}{dt^2} + m\xi\frac{d\rho}{dt} = F(\rho)\chi\left[F(\rho) - \frac{2E_a}{a_0}\right], \tag{3}$$

где ρ – удаление атома от узла решетки, $F(\rho) = -\dfrac{d\Pi(\rho)}{d\rho}$, $\chi(z)$ – функция Хевисайда, E_a – энергия миграции междоузельного атома.

$$\Pi(\rho) = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q_i q_v}{\rho} + G\frac{\Delta V_i \Delta V_v}{\rho^3}, \tag{4}$$

Для полупроводников и диэлектриков доминирует электрическая составляющая $\Pi(\rho)$, а для металлов – упругая [3].

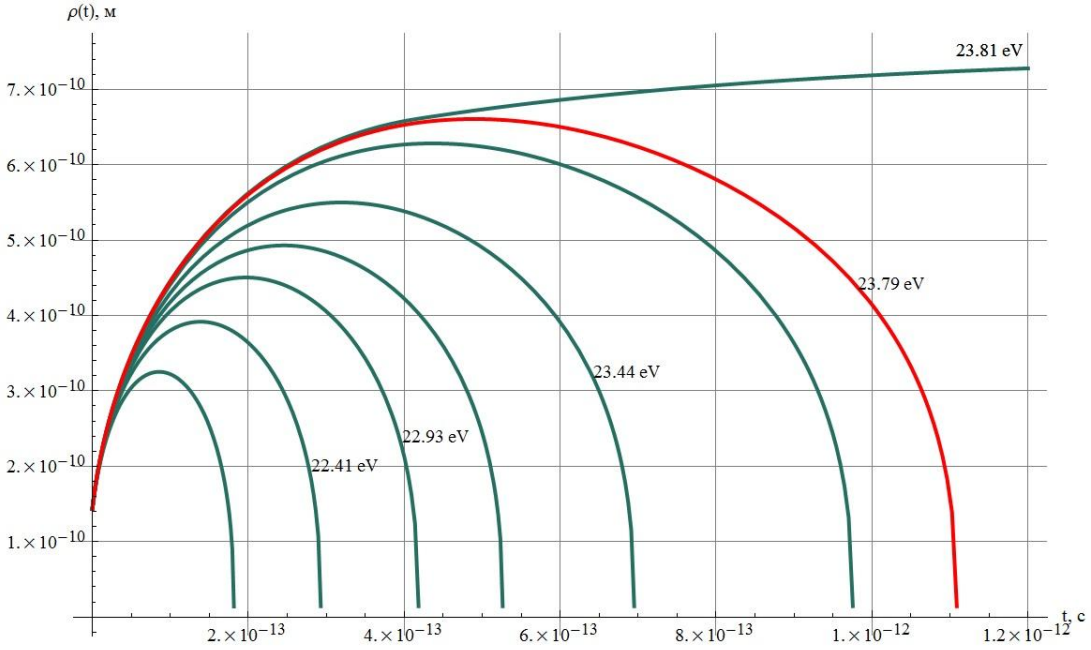


Рисунок 2 – Зависимости ρ(t) для атома в кристаллической решетке железа

На рисунке 2 в качестве примера представлены зависимости $\rho(t)$ для кристаллической решетки железа. Время τ определяется в точке качественного различия в поведении зависимости $\rho(t)$, когда атом получил энергию W в точности равную E_d.

Как показывают численные расчеты, значение E_3 не превышает 8 % от E_d для металлов и 21 % для полупроводников, в связи с чем становится понятной четкая корреляция E_d и $U_{св}$ для различных материалов (хотя, как указывалось выше, сама $U_{св}$ составляет в среднем 20 % от E_d). Доминирующая роль энергии E_2 в формуле (1) указывает способы повышения E_d.

Список литературы

1. Uglov, V. V. Radiation stability of nanoparticles / V. V. Uglov, G. E. Remnev, N. T. Kvasov, V. I. Shymanski // 26th International conference on atomic collisions in solids (ICACS-26). – Hungary, 2014. – P. 213 – 214.

2. Зеленский, В. Ф. Радиационные дефекты и распухание металлов / В. Ф. Зеленский, И. М. Неклюдов, Т. П. Черняева. – Киев: Наукова думка, 1988. – 294 с.

3. Кошкин, В. М. Зоны неустойчивости и короткоживущие дефекты в физике кристаллов / В. М. Кошкин // Физ. низ. темп. – 2002. – Т. 28. – № 8/9. – С. 963 – 977.

4. Uglov, V. V. Dynamical defects in irradiated materials and radiation stability of solids / V. V. Uglov , N. T. Kvasov, V. I. Shymanski, G. E. Remnev // Book of Abstracts International Congress on Energy fluxes and Radiation Effects. – Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2014. – P. 432.

5. Углов, В. В. О взаимодействии частиц с твердым телом (некоторые вопросы теории) / В. В. Углов, Н. Т. Квасов, Н. Н. Дорожкин, И. В. Сафронов // Тезисы докладов XLIV Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – М.: МГУ, 2014. – С. 21.

In this paper we suggest an approach for the theoretical determination of the threshold displacement energy (E_d). The components of the proposed expression are defined on the basis of analysis of processes accompanying the subthreshold movement of the atom ejected from the lattice site. It was shown that the threshold displacement energy is related to the physical properties of solids.

Поликарпов Роман Владимирович, магистрант кафедры физики твердого тела физического факультета БГУ; Минск, Беларусь, polysider@mail.ru.

Научный руководитель – *Квасов Николай Трофимович*, доктор физико-математических наук; профессор, главный научный сотрудник НИЛ ионно-плазменной модификации твердых тел кафедры физики твердого тела БГУ, Минск, Беларусь, kvasov@bsu.by.

УДК 62-519

Д. С. СИНКЕВИЧ

ЭМУЛЯТОР PC-СОВМЕСТИМОГО КОНТРОЛЛЕРА ADAM 5510M

В материале предлагается решение, представляющее программное обеспечение, позволяющее заменить реальное вычислительное ядро модели АСУ, в качестве которого используется PC-совместимый контроллер ADAM 5510M (Advantech). Разработка представляет собой синтаксический анализатор С кода и графический терминал, эмулирующий работу модулей ввода-вывода.

PC-совместимый контроллер ADAM 5510M имеет широкое практическое применение в АСУ в качестве вычислительного управляющего ядра, вместе с тем, это хороший инструмент для обучения работе с программируемыми логическими контроллерами. Лабораторное оборудование, представляющее собой комплекс моделей АСУ (контроллер ADAM5510M и периферийное оборудование) в ряде случаев целесообразно заменить на их виртуальную копию. Это позволит снизить риск выхода из строя контроллера при многократной загрузке в него пользовательского ПО с одной стороны, а с другой предоставит студентам полнофункциональное рабочее место при дистанционном выполнении лабораторных работ. Идея реализации эмулятора контроллера показана на рисунке 1. Она заключается в представлении эмулятора в виде совокупности двух программных компонент: конвертера С-кода и эмулятора модульной панели контроллера (ЭМПК), фактически представляющего собой приложение с интерфейсом, имитирующим внешний вид контроллера.

Рисунок 1 – Структура эмулятора PC-совместимого контроллера ADAM 5510M

Код прикладного программного обеспечения (ППО) в виде С-файла (среда разработки Turbo C 3.0 Borland) является входным для программы ADAM.exe. Входной файл обрабатывает *конвертер* С-кода, его задачей является выделение из инструкций С-файла значений переменных, которые должны определять состояние элементов управления ЭМПК. Программно конвертер реализован таким образом, чтобы решать следующие задачи: распознавать элементы библиотечных функций Advatnech, распознавать типы переменных языка С, распознавать многоразрядные переменные, распознавать комментарии, понимать структуры языка С, распознавать форматы операторов С, распознавать указатели.

Блок-схема алгоритма работы конвертера показана на рисунке 2. Принцип работы алгоритма конвертера следующий. Из С-файла происходит считывание строк и если достигнут конец файла, определяется точка входа в программу. Если не достигнут конец файла, проверяется, находится ли в строке функция. Если в строке функция, то определяются её параметры и происходит считывание следующей строки. Если в строке не функция, проверяется, происходит ли в строке объявление переменной. Если переменная объявляется, происходит выделение памяти для неё и считывается следующая строка файла. Если в

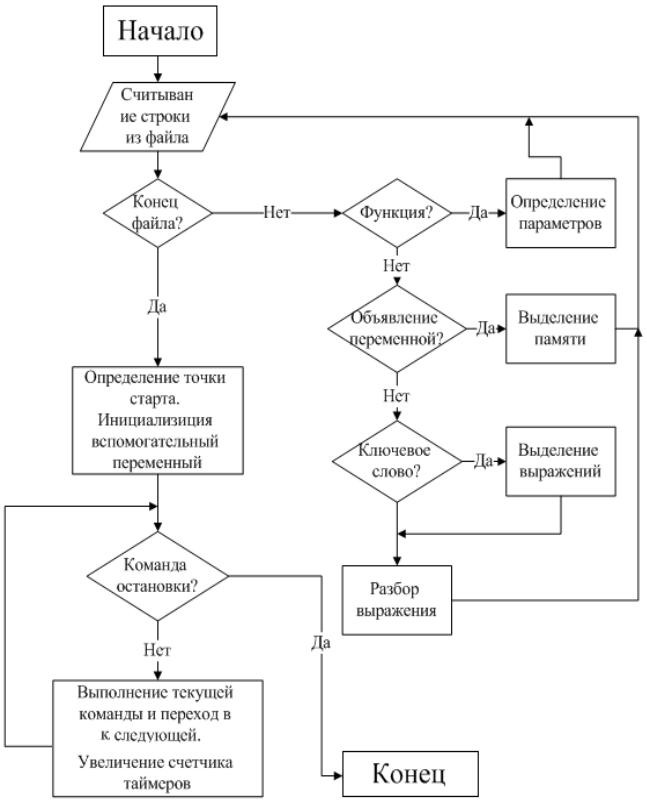


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма работы конвертора С-кода

строке нет объявления переменной, проверяется, присутствует ли в строке ключевое слово. Если ключевое слово присутствует, происходит выделение выражений, после этого разбор выражения и считывание следующей строки из файла. Если в считанной строке нет ключевого слова, происходит разбор выражения, после этого – считывание следующей строки из файла.

Окно приложения ЭМПК показано на рисунке 3. Оно практически полностью повторяет внешний вид контроллера ADAM 5510M. Как и в реальном контроллере, в его эмуляторе четыре модуля ввода/вывода, каждый из моделей в соответствии со своим функциональным назначением имеет определенное количества контактов.

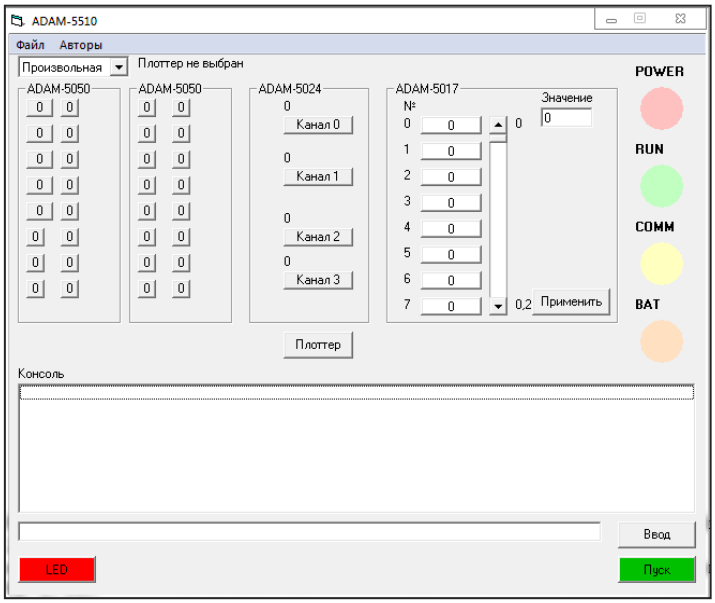


Рисунок 3 – Интерфейс эмулятора модульной панели контроллера

В интерфейс включены следующие элементы управления:

1. Меню с пунктами Файл и Авторы, пункт Файл содержит подпункты Открыть и Плоттер.
2. Панель модулей. Панель содержит графическое представление двух модулей Advantech ADAM5050 с 16-ю аналоговыми портами ввода-выхода с индикаторами состояния в данный момент времени, модуль ADAM5024 и ADAM5017. Модуль ADAM5024 содержит 4 кнопки, по нажатию на которые открываются экраны осциллографов, и индикаторы уровня сигнала на этих осциллографах в данный момент времени. Модуль ADAM5017 содержит 8 цифровых портов ввода-вывода с индикаторами их значений в данный момент времени.
3. Панель светодиодов-индикаторов POWER, RUN, COMM, BAT.
4. Консоль для ввода и вывода информации.
5. Кнопка Плоттер, открывает окно с полотном плоттера.
6. Кнопка Пуск, запускает выполнение программы.

Таким образом, пользователь получает в свое распоряжение полнофункциональный эмулятор контроллера с возможность проведения как отладки программного обеспечения, так и проведения виртуального моделирования при его работе с периферийным оборудованием.

Список литературы

1. Microsoft Visual Basic 6.0 для профессионалов. Шаг за шагом: практ. пособие / пер. с англ. – М.: Изд-во ЭКОМ, 2004. – 720 с.: илл.
2. Эллис, М. Справочное руководство по языку C++ с комментариями: пер. с англ. – М.: Мир, 1992 – С. 445.
3. Бруно Бабэ. Просто и ясно о Borland C++: пер. с англ. – М.: БИНОМ, 1994. – С. 400.
4. Подбельский, В. В. Язык C++: учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 1995. – С. 560.
5. Jesse Russell. Advantech Corporation – Книга по Требованию, 2013. – С. 124.

The article proposes a solution, which is a software that allows you to replace the actual processing core model of ACS, which is used as a PC-compatible controller ADAM 5510M (Advantech). Development of a parser C code and graphic display terminal, emulates IO modules.

Синкевич Денис Сергеевич, студент 5 курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.

Научный руководитель – *Себровская Галина Петровна*, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, galina_sebrovskaya@mail.ru.

УДК 539.2:546.8:546.04

В. А. СКАЧКОВА, М. С. ЗЕЛЕНИНА, О. А. КОЗЛОВА

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ZnO, ЛЕГИРОВАННОГО ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ (Co, Fe, Ni, Cu)

Представлены результаты моделирования магнитных свойств оксида цинка, легированного переходными металлами. Проведен анализ исследования, итог которого выливается в заключение по оптимальному структурному распределению примеси и оценке магнитного момента в системах.

Исследования проводились с целью выявления физических особенностей свойств кристаллов ZnO с примесями переходных металлов посредством *ab initio* моделирования для целенаправленного поиска условий и параметров оптимальной технологии создания материалов с требуемыми функциональными свойствами для прибор спинтроники и сенсорики.

Оксид цинка широкозонный полупроводник, который проявляет свойства высокотемпературного ферромагнетика, как в чистом виде, так и при наличии магнитных примесей, которыми является ряд переходных элементов с недостроенной d-оболочкой (Fe, Co, Ni, Cu и др.).

В качестве программного средства моделирования свойств ZnO использовался пакет VASP [1, 2], реализующий методы квантовой механики и молекулярной динамики.

Для моделирования фундаментальных электронных свойств материалов использовались современные методы зонных расчетов, основанных на теории функционала электронной плотности. Получаемые результаты касаются распределения энергетических зон, плотностей состояний и характера их спинового расщепления, величин магнитных моментов атомов-компонентов в дефектных системах. Важным элементом расчетов являются сравнительные энергетические оценки магнитного и немагнитного состояний системы, позволяющие судить об энергетической выгодности формирования магнитного состояния.

Моделирование проводилось с учетом эффектов структурной релаксации систем. Поскольку энергетическая неустойчивость примесных или нестехиометрических систем связана с высокой плотностью состояний на уровне Ферми и переход в устойчивое состояние может протекать как вследствие спинового расщепления прифермиевских зон, так и за счет структурного фактора.

Построена суперячейка оксида цинка. Для образования твердых растворов атомы цинка замещались на атомы переходных металлов (Fe, Co, Ni, Cu).

Для статического расчета использовалась локальная аппроксимация электронной плотности с коэффициентом Хаббарда 7,5 эВ для *d*-орбитали цинка и 2 эВ для *p*-орбитали кислорода. Также установлена команда, отвечающая за расчет спиновой поляризации.

Анализ полученных значений магнитных моментов рисует неоднозначную картину. Если в случае с Ni и Fe магнитный момент монотонно возрастает с количеством внедряемых атомов, то в случаях с Co и Cu при переходе от трех к четырем внедряемым атомов на суперячейку наблюдается понижение значения магнитного момента. Причем существование кластеров из трех и четырех атомов Cu и четырех атомов Co энергетически не выгодно в случае заданного ферромагнетного состояния.

Интересным представляются случаи ZnO:Fe(3,13), ZnO:Co(2,34), поскольку данные системы обладают наибольшими магнитными моментами (9,5 $\mu_Б$, 8,1 $\mu_Б$ на суперячейку из 128 атомов соответственно) при этом каждая в своем классе является самой стабильной среди изучаемых систем.

В отличие от ферромагнетиков, антиферромагнетики не обладают результирующей или остаточной намагниченностью. Минимум энергии антиферромагнетика в отсутствии магнитного поля достигается тогда, когда спины полностью компенсируются. Намагниченность у них возникает при наложении внешнего поля.

В ходе моделирования систем ZnO:Ni(x) с разными вариациями значения *x* установлено, что системы стабильны при установке антиферромагнитного состояния.

На рисунке 1 изображен график, отображающий DOS системы ZnO:Ni(1,56). Легко заметить, что узкие d – зоны зеркальны относительно оси абсцисс. Небольшое возмущение, в виде асимметрии двух кривых, заметно на границе sp-зоны. Предполагаем, что это можно связать с нарушением стехиометрии при введении атома примеси. Поскольку sp-электроны участвуют в образовании связи, а сколь бы ни был один атом похож на другой, идеального соответствия, без локального искажения связей в области примесного атома, быть не может.

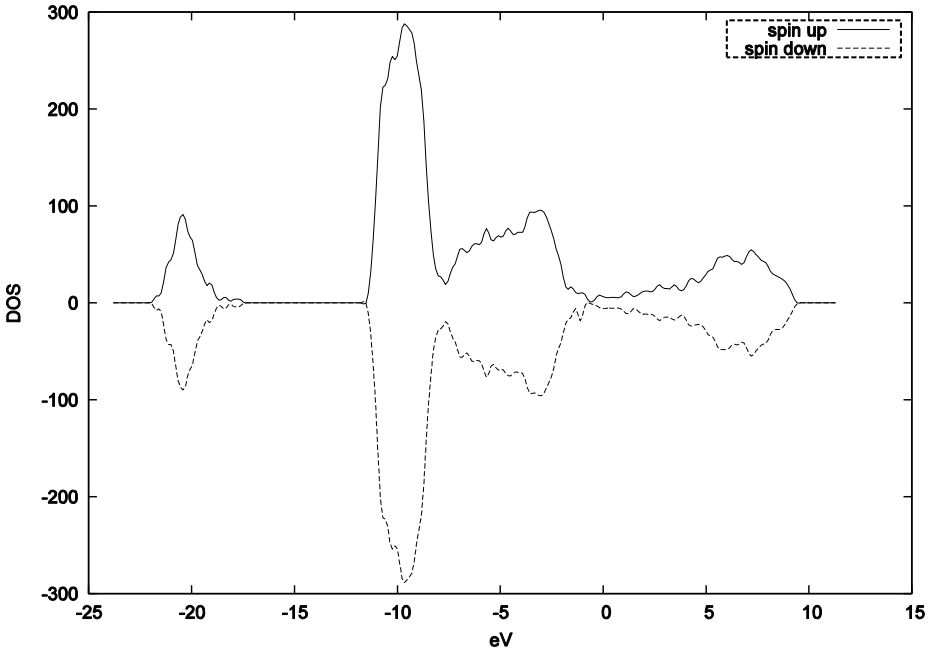


Рисунок 1 – Плотность электронных состояний ZnO:Ni (1,56)

Работа проводилась в рамках гранта БРФФИ на тему «Изучение структурных, электронных и магнитных свойств дефектных соединений ZnO и $ZnSnAa_2$, легированных переходными 3d – элементами посредством ab-initio (из первых принципов) моделирования».

Список литературы

1. Kresse, G. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method / G. Kresse, J. Joubert // Phys. Rev. B. – 1999. – Vol. 59 – P. 1758–1765.
2. Kresse, G. VASP the guide: tutorial / G. Kesse // Austria, University of Vienna. – 2003.

Research have been performed with the aim to detect physical features of properties of ZnO crystals with transition metal impurities. It was carried out via ab initio simulation for seeking the conditions and parameters of the optimal technology for creation of the materials with required functional properties for spintronics and sensor devices.

Скачкова Вероника Андреевна, магистрант БГУИР, Минск, Беларусь, veranika.burko@gmail.com.

Зеленина Мария Сергеевна, выпускница БГУИР, Минск, Беларусь pooliateen@mail.ru.

Козлова Ольга Александровна, аспирант БГУИР, Минск, Беларусь olga.bsuir@gmail.com.

Научный руководитель – *Стемпицкий Виктор Романович*, кандидат технических наук, доцент, факультет радиотехники и электроники, БГУИР, Минск, Беларусь, vstem@bsuir.by.

УДК 537.311.322

К. А. СОЛЯНИКОВА

ВЛИЯНИЕ ИЗОВАЛЕНТНОЙ ПРИМЕСИ КРЕМНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ДОНОРОВ В ТВЁРДЫХ РАСТВОРАХ GeSi

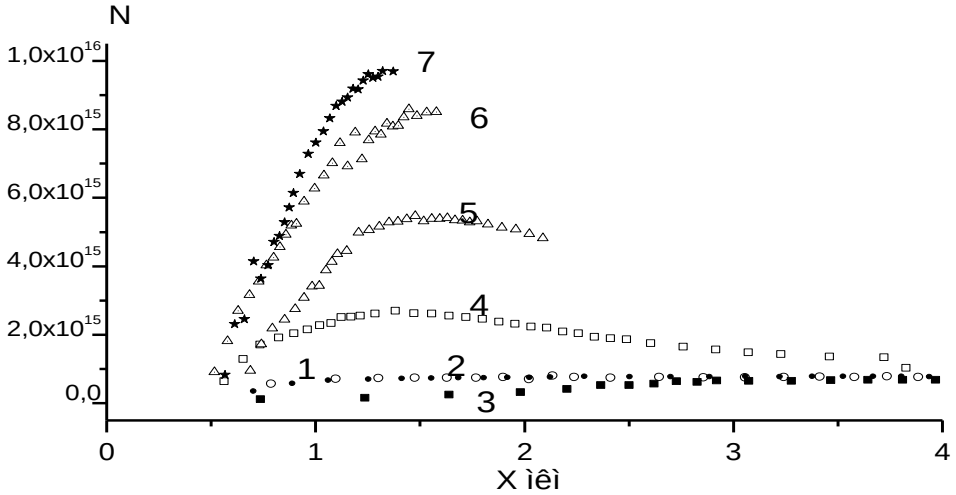
Показано, что термообработка кристаллов $Ge_{1-x}Si_x$, имплантированных протонами с энергией 300 кэВ, приводит к образованию низкоомного n^+-слоя водородосодержащих доноров толщиной, локализованного вблизи проецированной длины пробега ионов. Наблюдаемое снижение концентрации Н-доноров с увеличением примеси кремния в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$, с захватом внедренных ионов водорода атомами кремния.

Водород является одной из важнейших неконтролируемых примесей в кристаллах полупроводников, а также широко используется в технологии производства приборов. Например, имплантация протонов позволяет получать тонкие пленки полупроводников с помощью Smartcut-процесса или, при более низких дозах, формировать после термообработки низкоомные слои за счет образования водородосодержащих доноров (Н-доноров) [1]. Большинство работ посвящено исследованию свойств водорода в кремнии. Однако возможность получения тонких пленок полупроводников и относительная легкость встраивания Smartcut-

процесса в кремниевую технологию приводит к мысли о замене кремния другим полупроводниковым материалом, обладающим более высокой подвижностью носителей заряда. Оказалось, что наиболее подходящим для этих целей материалом является германий.

Исследования были проведены на образцах твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \le x \le 0{,}031$), выращенных модифицированным методом Чохральского с низким ($< 10^{15}$ см$^{-3}$) содержанием кислорода. Кристаллы были легированы фосфором в пределах от 10^{15} до $3{\cdot}10^{15}$ см$^{-3}$. Для измерений были изготовлены диоды Шоттки путем напыления золота через маску на полированную поверхность кристаллов. Толщина слоя золота составляла 200 нм. Образцы были имплантированы протонами (H^+) с энергией 300 кэВ через слой золота при комнатной температуре потоком $1{\cdot}10^{15}$ см$^{-2}$. Проецированная длина пробега H^+ ионов с энергией 300 кэВ в германии с учетом потерь в металлическом контакте составляет около 1 мкм. Профили концентрации H-доноров измерялись методом вольт-фарадных (C–V) характеристик.

На рисунке 1 представлены профили распределения концентрации электронов для образца $Ge_{1-x}Si_x$ (x = 1,2 ат. %), имплантированного протонами, при различных временах отжига 275 ^{0}C.



Время отжига, мин.: 1 – исх., 2 – после облучения, 3–80, 4–160, 5–240, 6–320, 7–400.

Рисунок1 – профили распределения концентрации электронов для образца $Ge_{1-x}Si_x$ (x = 1,2 ат. %), имплантированного протонами, при различных временах отжига 275 ^{0}C

Из анализа полученных данных следует, что однородное распределение концентрации электронов в базе диодов до облучения (кривая 1) после имплантации характеризуется уменьшением этой величины в приповерхностной области. Это связано с введением компенсирующих радиационных дефектов. Действительно, отжиг облученных образцов при 275 ^{0}C в течение 80 мин полностью восстанавливает исходную концентрацию электронов. Дальнейший отжиг приводит к появлению избыточной концентрации электронов в области локализации внедренных атомов водорода. Предельная концентрация электронов достигается при времени термообработки t= 400 мин (рисунок 2). По аналогии с кремнием [1] можно заключить, что этот эффект связан с формированием водородосодержащих доноров.

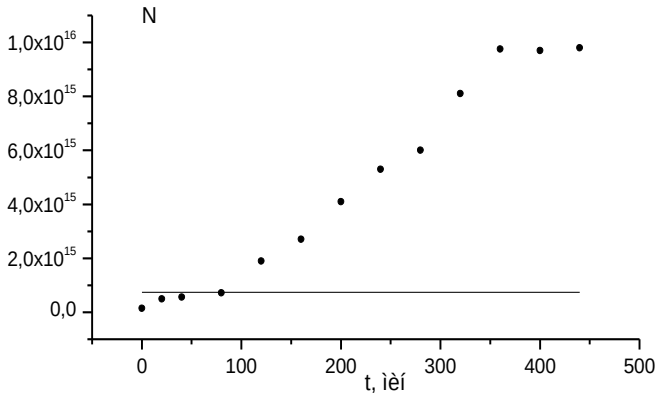


Рисунок 2 – Кинетика накопления избыточной концентрации электронов при термообработке.

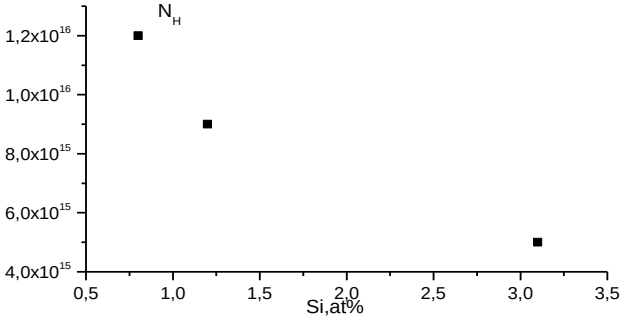


Рисунок 3 – Зависимость предельной концентрации водородосодержащих доноров N_H от концентрации Si в твердом растворе $Ge_{1-x}Si_x$.

Из анализа данных (рисунок 3) следует, что увеличение примеси кремния подавляет формирование водородосодержащих доноров. Это может быть, по нашему мнению, связано с захватом внедренных при имплантации ионов водорода атомами кремния.

Список литературы

1. Покотило, Ю. М. Формирование водородсодержащих доноров в эпитаксиальном кремнии, имплантированном протонами / Ю. М. Покотило, А. Н. Петух, В. В. Литвинов, В. Г. Цвырко // Неорганические материалы. – 2009. – Т. 45, № 11. – С. 1286.

We showed, that heat treatment of implanted protons with energies of 300 keV crystals Ge1-hSih leds to the formation of low-resistance n + -layer thickness of hydrogen-donor localized near the projected length of the path of the ions. The observed decrease in the concentration of H-donors with increasing silicon impurities in crystals Ge1-hSih, with capture of the hydrogen ion implanted silicon atoms.

Соляникова Кристина Анатольевна, физический факультет БГУ, Минск, Беларусь, tina10893@mail.ru.
Научный руководитель – *Покотило Юрий Мефодьевич*, доцент, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры атомной физики и физической информатики, Минск, Беларусь, pokotilo@bsu.by.

УДК 537.528

П. Н. СТАХЕЙКО

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В ВОДЕ

Представлены результаты исследования по реализации оптимальных условий взрыва проводников различного типа в воде. Показано, что для всего многообразия оптимальных режимов взрыва проводников в воде для каждого из металлов удельная энергия, введённая в проводник, не зависит ни от размеров проводника, ни от параметров контура, а является константой свойств материала проводника.

В настоящее время электрогидравлические технологии находят всё более широкое применение в различных отраслях реального сектора экономики [1]. Очень важным представляется определение оптимальных условий электрического взрыва тонкого проводника в жидкости. В данной работе рассматривается эмпирическая модель описания данного явления.

Условия реализации оптимального взрыва проводников из алюминия и меди в воде получены эмпирическим путём для известных энергетических параметров разрядного контура – емкости конденсаторной батареи C, индуктивности разрядного контура L и напряжения на конденсаторной батарее U_0, задаются соотношениями из оптимальных параметров проводника [2]:

$$d_{опт} = \left[\frac{W_0}{h^* \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

$$l_{опт} = 2 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt[4]{LC}, \quad (2)$$

где $d_{опт}$ и $l_{опт}$ – оптимальные диаметр и длинна проводника; W_0 – энергия, запасенная в конденсаторной батарее; h^* – константа материала проводника с размерностью удельного действия равная:

$$h^* = \rho_n \delta_{пр} \left(\lambda_{пр} + \gamma_{пр} \right), \tag{3}$$

где ρ_n – плотность проводника; $\delta_{пр}$ – удельная электропроводность; $\lambda_{пр}$ – удельная теплота плавления; $\gamma_{пр}$ – удельная теплота парообразования проводника.

По данным соотношениям (1, 2) было проведено численное моделирование оптимальных параметров проводника для ряда элементов (Al, Fe, Au, Mg, Cu, Ni, Sn, Ag, W) при U_0 = 5000В, L = 0,00000326 Гн и С от 0,0001 до 0,0005 Ф с шагом 0,00002 Ф, полученные данные представлены на рисунках 1 и 2

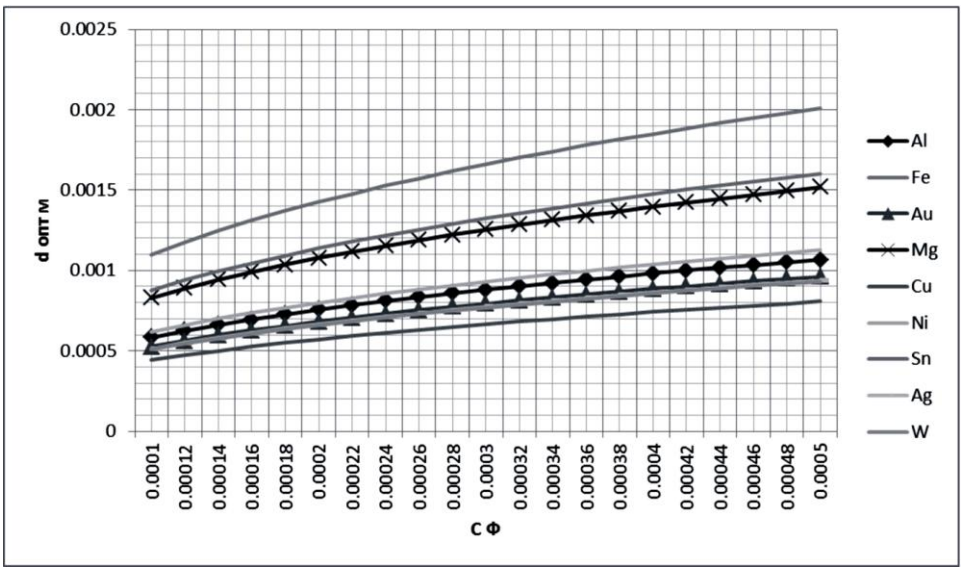


Рисунок 1 – Зависимость величины оптимального диаметра проводника от заряда конденсаторной батареи

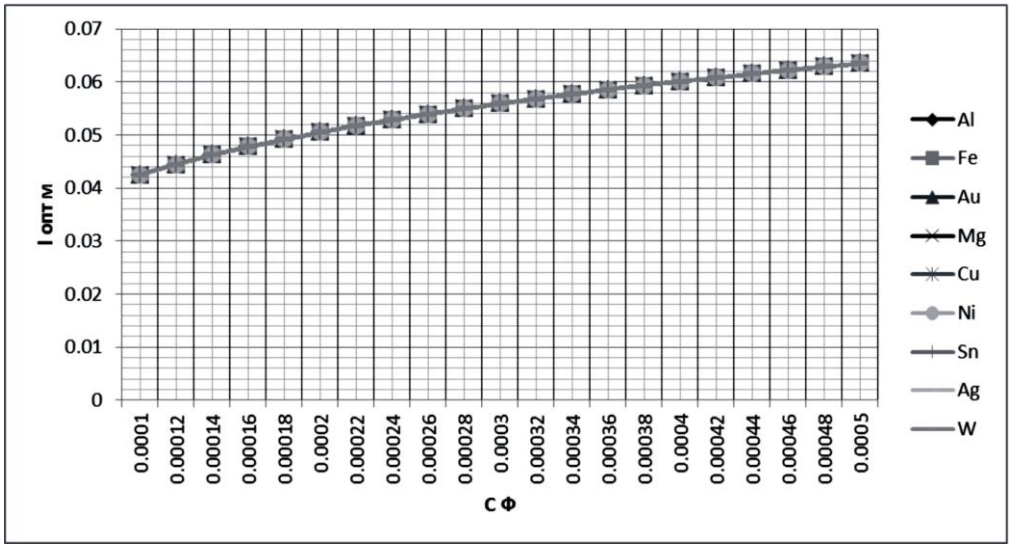


Рисунок 2 – Зависимость величины оптимальной длины проводника от заряда конденсаторной батареи

Зависимости показывают, что оптимальная длинна проводника является функцией, зависящей только от параметров разрядного контура, и одинакова для различных проводников. Оптимальный диаметр проводника напротив, варьируется благодаря наличию в (1) константы учитывающей параметры материала. Так, минимальный диаметр будет у меди (0,004 – 0,008 м). Следом идут вольфрам (0,005 – 0,009), золото (0,005 – 0,009) и серебро (0,005 – 0,009). Наибольший оптимальный диаметр имеют олово (0,008 – 0,0016) и железо (0,011 – 0,002).

Зная $d_{опт}$ и $l_{опт}$ для определения объёма проводника и данных из работы [3] можно найти удельную энергию, введённую в проводник:

$$w_{опт} = \left(\frac{W_0}{m}\right)_{опт} = \left[\frac{\delta_{пр}\left(\lambda_{пр} + \gamma_{пр}\right)}{8\pi^2 \rho_{пр}}\right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Отсюда видно, что для всего многообразия оптимальных режимов взрыва проводников в воде для каждого из металлов удельная энергия, введённая в проводник $\left(\frac{W_0}{m}\right)_{опт}$, не зависит ни от размеров проводника, ни от параметров контура, а является константой свойств материала проводника. Так для алюминия $w_{опт}$ ≈41 кДж/кг, меди $w_{опт}$ ≈22 кДж/кг, магния $w_{опт}$ ≈31 кДж/кг, олова $w_{опт}$ ≈6,6 кДж/кг, вольфрама $w_{опт}$ ≈7,5 кДж/кг, золота $w_{опт}$ ≈7 кДж/кг. Таким образом, количество энергии на единицу массы проводника, необходимое для реализации одиночного режима взрыва, для различных материалов разное, и не зависит от параметров источника или проводника, а только от его свойств.

Список литературы

1. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
2. Кривицкий, Е. В. Динамика электровзрыва в жидкости / Е. В. Кривицкий. – Киев: Наук. думка, 1986. – 206 с.
3. Bennett, F. D. Correlated Electrical and Optical Measurements of Exploding / F. D. Bennett, H. S. Burden, D. D. Shear // Phys. of Fluids. – 1962. – V. 5, N 1. – P. 102–113.

The results of the studies on the implementation of the optimal conditions for the explosion of different types of conductors in the water are presented. It is shown that for all variety of optimal modes of the explosion of conductors in the water, for each of the metals, the specific energy introduced into the conductor does not depend on the size of the conductor or the parameters of the circuit, and it is a constant of the properties of the conductor material.

Стахейко Павел Николаевич, магистрант физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.
Научный руководитель – *Тарковский Викентий Викентьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.

УДК 621.383.5

Д. В. СТРЕМОУС

ДИНАМИКА И ПАРАМЕТРЫ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ОКСИДАХ МЕТАЛЛОВ

Предоставлены результаты моделирования динамики роста проводящей нити, порогового напряжения переключения и сопротивления элемента резистивной памяти с произвольным доступом (RRAM) в зависимость от скорости развертки и рабочей температуры, а также динамики электронного переключения би-стабильных центров в оксидах металла.

В настоящее время интенсивно изучаются элементы резистивной памяти (RRAM) на основе оксидов металлов как наиболее конкурентоспособных кандидатов для будущих энергонезависимых устройств памяти из-за простой структуры, быстрого переключения и отличной масштабируемости.

Электрохимическое перемещение ионов может рассматриваться как движущий механизм медленного переключения сопротивления элемента RRAM [1]. Быстрое электронное переключение обеспечивается синхронизированным процессом захвата и освобождения подвижных носителей заряда на бистабильные ловушечные состояния в области разрыва и восстановления проводящих нитей диаметром порядка 50 нм. Эти центры характеризуются наличием зарядовой би-стабильности.

Динамика проводящих нитей определяется движением составляющих их ионов в электрическом поле. Темп прироста длины проводящего шнура l определяется скоростью дрейфа подвижных ионов, величина которой зависит от вероятности прыжков ионов через энергетический барьер [2]:

$$dl/dt = 2dv\exp\left(-qU/kT\right)\sinh\left(qVd/2kT(h-l)\right), \quad (1)$$

где d – длина прыжков ионов; v – частота прыжков; U – потенциал активации; k – постоянная Больцмана; T – температура; q – заряд электрона; h – толщина диэлектрика, V – внешнее смещение.

Моделирование переключения бистабильных ловушечных состояний в оксиде металла проводим с использованием модели бистабильного осциллятора в предположении, что его переключение индуцируется шумом и описывается уравнением [3]:

$$dy/dt = ay - by^3 + A\cos(\Omega t + \varphi) + \sqrt{2D}\xi(t), \quad (2)$$

где y – обобщенная координата ловушечного состояния, характеризующая вид его потенциальной энергии, a, b – параметры, A, Ω, φ – амплитуда, частота и фаза колебаний центра, D – интенсивность шума, $\xi(t)$ – функция, генерирующая белый шум.

Проведенные расчеты по уравнению (1) показали, что длина нити растет экспоненциально, а величина внешнего смещения определяет характерное время ее роста, рисунок 1. Значительное увеличение скорости роста нити (филамента) достигается при величине внешнего смещения 2–2.5 В.

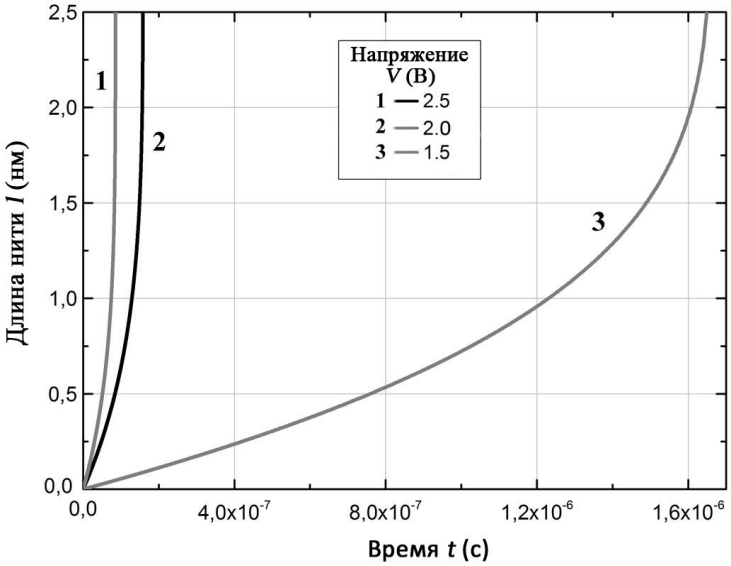


Рисунок 1 – Динамика роста длины проводящей нити при разном внешнем смещении

Моделирование электронного переключения бистабильных ловушечных состояний проводили на примере диоксида гафния: энергия термической ионизации ловушек 0.5 эВ, частота колебаний 10-12 ГГц, концентрация ловушек 10^{19} см$^{-3}$, интенсивность шума – 0.08-0.15. Установлено, что бистабильный потенциал ловушечного центра под действием слабой периодической модуляции совершает переход из одного состояния в другое только под действием шума.

Показано, что воздействие шума приводит к переключению ловушечного состояния в диоксиде гафния из одного метастабильного состояния в другое за время порядка нескольких наносекунд. С увеличением интенсивности шума растет разброс значений выходного сигнала $y(t)$, происходит переключение и образуются метастабильные состояния. С увеличением амплитуды периодического воздействия частота переключений из одного состояния в другое растет. С ростом частоты периодического воздействия увеличивается частота переключений, а с увеличением фазы увеличивается время нахождения ловушечного центра в метастабильном состоянии.

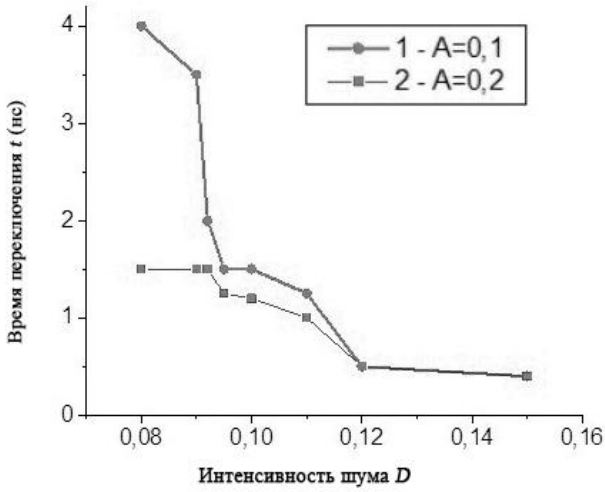


Рисунок 2 – Зависимость времени переключения от интенсивности шума при разных амплитудах периодической силы

Проведенное моделирование времени электронного переключения ловушечных состояний из одного метастабильного состояния в другое показало, что время переключения составляет порядка единиц наносекунд, а его величина снижается (становится меньше 1 нс) с ростом амплитуды периодического воздействия и интенсивности шума, рисунок 2.

Список литературы:

1. Pan, F. Recent progress in resistive random access memories: Materials, switching mechanisms, and performance / F. Pan [et al.]. // Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 83. – P. 1–59.

2. Sheridan, P. Device and SPICE modeling of RRAM devices / P. Sheridan [et al.]. // Nanoscale. – 2011. – Vol. 3, № 9. – P. 3833–3840.

3. Gammaitoni, L. Stochastic resonance / L. Gammaitoni [et al.]. // Reviews of modern physics. – 1998. – Vol. 70, №1. – P. 223–287.

We provided simulation results of growth dynamics in a conductive filament, switching threshold voltage and resistance of a resistive memory cell and its dependence on sweep rate and operating temperature, as well as the dynamics of electronic switching of bi-stable centers in metal oxide-based resistive random access memory (RRAM).

Стремоус Дмитрий Владимирович, БГУИР, Минск, Беларусь, stremous@list.ru.

Научный руководитель – *Данилюк Александр Леонидович,* кандидат физико-математических наук, доцент, БГУИР, кафедра микро- и наноэлектроники, БГУИР, Минск, Беларусь, danilyuk@nano-center.org.

УДК 62-519

А. С. УДОТ

БИБЛИОТЕКА УТИЛИТ ЭМУЛЯЦИИ ПЕРИФЕРИИ МОДЕЛЕЙ АСУ НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА ADAM 5510M

Предлагается решение, представляющее собой библиотеку программных утилит для эмуляции работы периферийного оборудования лабораторных моделей АСУ. Показаны особенности разработки эмулятора входных воздействий, интерфейсы и блок-схемы алгоритмов работы утилит.

Как правило, комплекс лабораторного оборудования, моделирующего автоматизированные системы управления представляет собой совокупность достаточно сложных и дорогостоящих компонентов. Процесс же тестирования и отладки разработанного прикладного программного обеспечения для вычислительного микропроцессорного ядра таких моделей, а следовательно и многократная его перепрошивка может привести к потере его работоспособности. С другой стороны обеспечение студентов полнофункциональным рабочим местом для организации дистанционного выполнения лабораторных работ возможно только при наличии виртуальных моделей лабораторных комплексов.

Реальные модели АСУ представляют собой совокупность управляющего микропроцессорного ядра – PC-совместимого контроллера ADAM5510M и периферийного оборудования. На рисунке 1 показана структурная схема взаимодействия элементов, эмулирующих учебные модели АСУ. В зависимости от конкретной конфигурации периферии эта совокупность может рассматриваться как АСУ «Двухкоординатная система управления шаговым приводом» (утилита Плоттер.exe), АСУ «Управление движением» (утилита СУД.exe), АСУ «Микроклимат» (утилита СУМ.exe). В данной работе предлагается реализация утилит Плоттер.exe и СУД.exe.

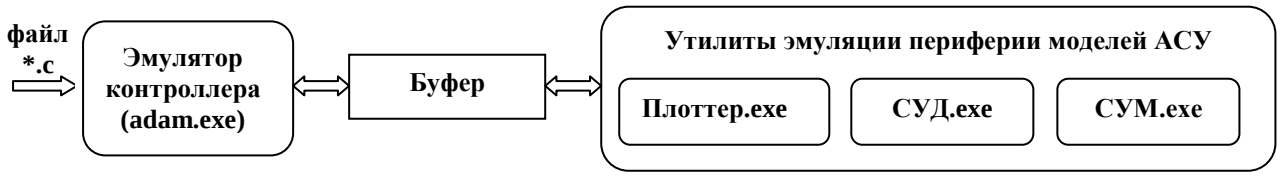


Рисунок 1 – Схема взаимодействия компонентов виртуальных моделей АСУ

Входным для эмулятора контроллера является с-файл – код прикладного программного обеспечения, алгоритм которого управляет работой периферийного оборудования моделей АСУ. Решение задачи организации программного взаимодействия adam.exe и утилит периферии предполагает использование некоторого буфера – файла. Его содержимое – это значения 44 переменных (их количество определено исходя из конструктивных особенностей стендовых моделей АСУ), выделяемых специальной частью эмулятора контроллера – конвертором с-кода. Состояние буфера должно определять состояние элементов интерфейса утилит эмуляции периферии, и одновременно быть готовым принять с их стороны воздействия, отражающие

возможные действия пользователя утилит, т. е. обеспечить обратную связь – от утилиты к эмулятору контроллера.

Поскольку реализация утилит проводилась без эмулятора контроллера (это сделано для обеспечения независимости начального этапа разработки виртуального комплекса моделей АСУ), то для их тестирования и отладки было разработано специальное ПО, выполняющее задачу *генератора входных воздействий*, а по сути являющееся эмулятором контроллера в его отсутствие. Оптимальным вариантом взаимодействия оказался файл, в который будет дописываться каждый новый такт работы контроллера в режиме реального времени. В свою очередь программа эмулятора стенда проверяет изменение размера файла. Если размер изменился (появился новый такт), то программа забирает для анализа последнюю строку из файла. Интерфейс генератора входных воздействий для работы с утилитой Плоттер.exe показан на рисунке 2.

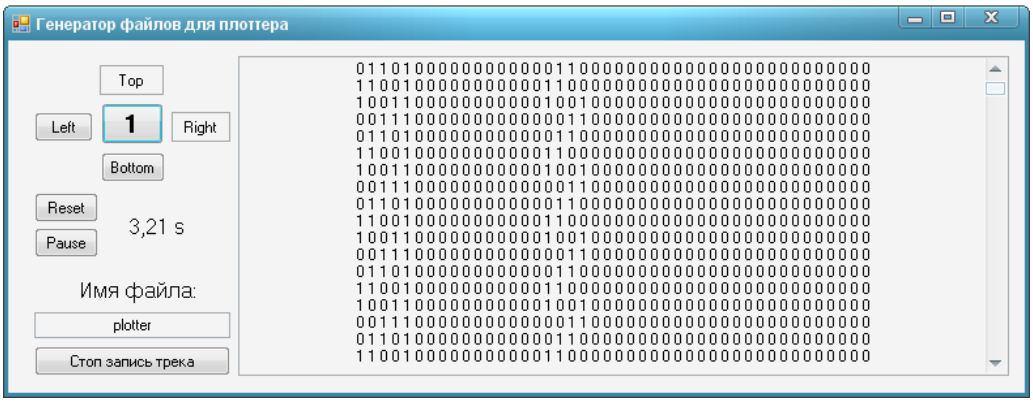


Рисунок 2 – Интерфейс генератора входных воздействий для работы с утилитой Плоттер.exe

Разработка утилит эмуляции периферии моделей АСУ предусматривает два этапа: этап разработки интерфейса с учетом аппаратных особенностей реальных моделей и этап разработки программного кода утилиты.

В данной работе представлена разработка утилиты Плоттер.exe, ее интерфейс показан на рисунке 3. В окне утилиты кроме основной части – рабочего полотна, отображаются координаты положения *пера*. Предусмотрена возможность сохранения результатов работы «Двухкоординатная система управления шаговым приводом» в виде отдельного png.файла – кнопка «Сохранить результат».

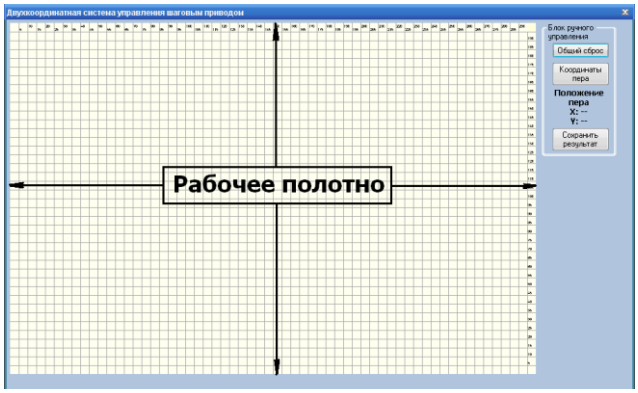


Рисунок 3 – Окно утилиты Плоттер. exe

На рисунке 4 приведена блок-схема алгоритма работы утилиты Плоттер.exe.

После запуска программы выполняется начальная подготовка перед работой: создание битмапа, прорисовка рабочего полотна плоттера, автонастройка элементов управления, задание стартовых параметров переменных. Далее программа переходит в режим проверки файла на признак изменения размера. Как только происходит изменение сканируемого файла – программа копирует из файла последнюю строку и анализирует её, выделяя необходимые переменные и обрабатывая их. Если необходимо, визуализирует результат. При последующем изменении файла цикл повторяется.

Подобным образом разрабатываются две другие утилиты, эмулирующие работу периферийного оборудования в составе виртуального комплекса моделей АСУ.

Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма кода утилиты Плоттер. exe

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://msdn.microsoft.com/ru-RU/
2. Уоллес Вонг. Microsoft Visual Basic .NET для "чайников". – М.: Диалектика, 2003. – С. 336.
3. Джеффри П. Мак-Манус, Джеки Голдштейн, Кевин Т. Прайс. Обработка баз данных на Visual Basic .NET. – М.: Вильямс, 2003. – С. 416.

The article proposes a solution, which is a library of software tools for emulation of the peripheral laboratory models of ACS. The features of the development of the emulator input actions, interfaces and flowcharts of the utilities.

Удот Артем Сергеевич, студент 5 курса физико-технического факультета ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь.
Научный руководитель – *Себровская Галина Петровна*, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий, ГрГУ им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь, galina_sebrovskaya@mail.ru.

УДК 544.722.3:546.62:621.785.6

Ю. С. ЯКОВЕНКО, М. А. ГОДУНОВА

ТОПОГРАФИЯ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЁНОК Al И СПЛАВА Al-1,0 ат. % Cr, НАНЕСЁННЫХ НА СТЕКЛЯННЫЕ ПОДЛОЖКИ

Представлены результаты изучения топографии и смачиваемости пленок чистого Al (99,995 %) и сплава Al-1,0 ат. % Cr, осажденных на стеклянную подложку в условиях ассистирования собственными ионами.

Объем производства алюминия и сплавов на его основе намного опережает выпуск всех остальных цветных металлов и уступает только производству стали. Решение многих практических задач предъявляет к объемным и поверхностным свойствам материалов требования, которые трудно совместить в одном материале. При этом рациональным путем решения проблемы часто оказывается не разработка нового материала, сочетающего в себе все требуемые свойства одновременно, а модифицирование поверхностных свойств имеющегося материала [1, 2].

Одним из перспективных методов модифицирования свойств поверхности является осаждение покрытий, при ассистировании собственными ионами (ОПАСИ) [3]. В работах [4, 5] показано, что нанесение металлов на кремний методом ОПАСИ дает возможность увеличивать твердость поверхности, изменять ее шероховатость и смачиваемость.

В силу большой доли производства алюминиевых изделий в промышленности и научному интересу к изучению поверхностных свойств микроструктурированных материалов, эти вопросы представляют как практический, так и теоретический интерес [6, 7].

При проведении эксперимента были исследованы поверхности тонких пленок Al (99,995 %) и сплава Al-1,0 ат. % Cr, нанесенных на стеклянную подложку, полученные методом ОПАСИ. Для осаждения покрытий на стеклянную подложку использовали резонансный источник вакуумной дуговой плазмы (вакуум 10^{-2} Па) [3]. В ионном источнике в качестве электродов установки использовали материалы Al (99,995 %) и сплав Al-1,0 ат. % Cr. В результате гиперскоростной кристаллизации были получены пленки, скорость охлаждения расплава при получении которых составила ~ 10^{11}–10^{12} К/с за счет выделения энергии в каскаде атомных столкновений при торможении ускоренного ассистирующего иона в осаждаемой пленке.

Изучение топографии поверхности образцов и определение ее шероховатости было выполнено с применением атомно-силового микроскопа (АСМ) NT-206. Значение шероховатости определялось по данным, полученным с 7 площадок, выбранных произвольным образом. Для обработки данных, полученных на АСМ, использовалась программа Surface Explorer [8].

Равновесный краевой угол смачивания (РКУС) исследуемых поверхностей определен методом покоящейся капли с использованием дистиллированной воды [5].

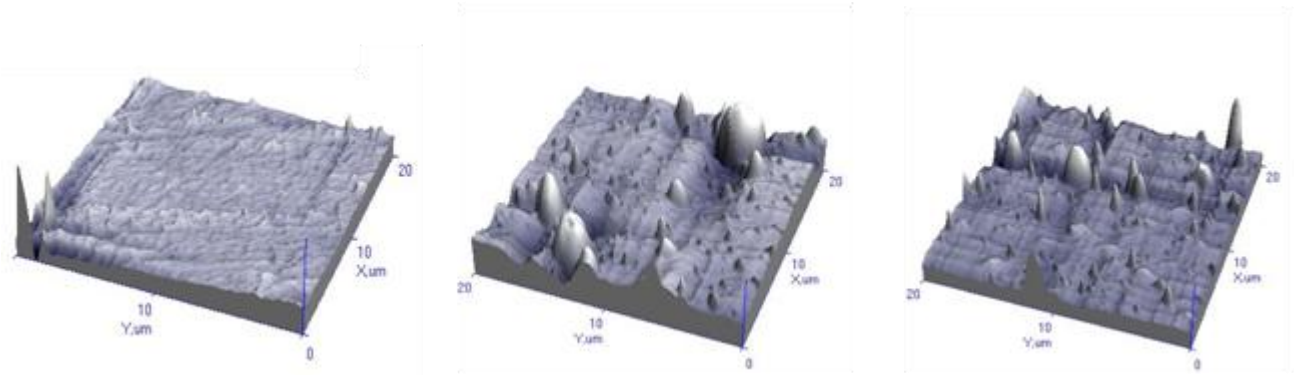
При изучении топографии образцов пленка/подложка и подложка и определении ее параметров были выбраны площадки 20×20 мкм^2. Экспериментальные результаты значений краевых углов смачивания и шероховатости исследуемых осажденных пленок представлены в таблице.

Таблица 1– Результаты измерения краевых углов смачивания и шероховатости поверхности для исследованных образцов

Параметр	Образец		
	Стекло исходное	Al (99,995 %)	Al – 1,0 ат. % Cr
Время процесса ОПАСИ, ч	-	10	10
Средняя шероховатость, нм	1.37	26.32	11.59
Отношение полной площади к проективной	1.00	0.94	0.96
РКУС, град	20.65	83.62	75.02

Полученные 3D изображения топографии поверхностей рассматриваемых образцов демонстрируют качественно подобные изменения рельефа поверхностей, полученных методом ОПАСИ. Модифицированные поверхности обнаруживают наличие конусообразных структур. Образцы демонстрируют увеличение шероховатости поверхности по сравнению с исходной стеклянной подложкой.

Как следует из приведенных в таблице данных, модифицированные поверхности образцов обладают гидрофильными свойствами. В связи с тем, что полученные значения РКУС<90°, можно заключить, что при контакте жидкости (дистиллированной воды) с модифицированной поверхностью не наблюдается воздушной подушки, т. е. отсутствуют внутри полостей рельефа пузырьки воздуха и жидкость заполняет собой все полости [9].



a b c

(a) – исходная стеклянная подложка, (b) – пленка Al (99,995 %), (c) – пленка сплава Al-1,0 ат. % Cr

Рисунок 1 – 3D АСМ – изображения топографии поверхностей

Ранее нами в работах [10, 11] были установлены гидрофобные свойства быстрозатвердевших фольг Al-1,0 ат. % Cr. Значения РКУС составили 101.1° для поверхности, контактирующей при получении фольги методом центробежной закалки с поверхностью цилиндра, и 95.0° для поверхности, контактирующей с воздухом [12].

Анализ полученных предварительных результатов позволяет сделать вывод о возможности управления гидрофобностью и гидрофильностью поверхности алюминиевых материалов путем модификации их поверхностей как методом центробежной закалки, так и методом ОПАСИ. Также стоит отметить, что быстрозакаленные материалы могут стать своеобразной моделью для подбора оптимального дизайна рельефа поверхности с целью получения материала с выраженными гидрофобными (гидрофильными) свойствами.

Список литературы

1. Ташлыков, И. С. Структура и повреждение кремния, модифицированного ионно-ассистированным нанесением тонких пленок / И. С. Ташлыков, С. М. Барайшук, О. М. Михалкович, И. П. Антонович // Przeglad Elekrotechniczny. – 2008. – № 3. – С. 111.

2. Сажин, В. Б. Иллюстрации к началам курса «Основы материаловедения» / В. Б. Сажин. – М.: Теис, 2005. – 78 с.

3. Ташлыков, И. С., Белый, И. М. Патент РБ №2324. 1С1 ВУ, С23 С4/12. С4/18, С14/16. Опубл. 1999. офиц. бюл. гос. пат. ведом. Респ. Беларусь №1.

4. Барайшук, С. М. Изучение поверхности структур металл/кремний, приготовленных ионно-ассистированным покрытием / С. М. Барайшук, В. Ф. Гременок, В. В. Тульев, И. С. Ташлыков // ФХОМ. – 2011. – № 1. – С. 66.

5. Ташлыков, И. С. Элементный состав, топография и смачиваемость поверхности графита, модифицированного ионно-ассистированным осаждением покрытий / И. С. Ташлыков, С. М. Барайшук // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2008. – № 1. – С. 30–35.

6. Belyaev, A. V. Hydrodynamic interaction with super-hydrophobic surfaces / A. V. Belyaev, O. I. Vinogradova // Soft Matter. – 2010. – Vol. 6. – P. 4563–4570.

7. Boinovich, L. B. Anti-icing potential of superhydrophobic coatings / L. B Boinovich, A. M. Emelyanenko // Mendeleev Communications. – 2013. – No.23. – P. 3–10.

8. Typical methods of assessment of software measurement tools and procedures for its implementation. State system for ensuring unity of measurements of RF. RECOMMENDATION MI 2955, 2005. Federal State Unitary Enterprise of registered VNIIMS November 21, 2005.

9. Зимон, А. Д. Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1994. – 413 с.

10. Ташлыкова-Бушкевич, И. И. Элементный состав, морфология и смачиваемость поверхности фольг сплавов алюминия / И. И. Ташлыкова-Бушкевич, В. С. Куликаускас, С. М. Барайшук, В. Г. Шепелевич, И. С. Ташлыков, Ю. С. Яковенко // Тезисы докладов XLIV международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 27–29 мая 2014 г. / под ред. проф. М. И. Панасюка. – М.: Университетская книга, 2014. – С. 116.

11. Яковенко, Ю. С. Топология поверхности фольг алюминия и его сплавов, полученных сверхбыстрой закалкой / Ю. С. Яковенко, И. И. Ташлыкова-Бушкевич // Физика конденсированного состояния: материалы XXI республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 18–19 апреля 2013 г. / ГрГУ; редкол.: Е. А. Ровба – Гродно, 2013. – С. 148–150.

12. Мирошниченко, И. С. Закалка из жидкого состояния / И. С. Мирошниченко. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.

This work discusses a topography and wettability of pure Al (99,995 %) and Al-1,0 ат. % Cr alloy films deposited onto glass substrate by self-ion deposition.

Яковенко Юлия Сергеевна, аспирант БГПУ им. М. Танка, Минск, Беларусь, panta_07@mail.ru.

Годунова Мария Анатольевна, студентка 5 курса физического факультета БГПУ им. М. Танка, Минск, Беларусь, prostomary02@gmail.com.

Научный руководитель – *Ташлыкова-Бушкевич Ия Игоревна,* кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики БГУИР, Минск, Беларусь, iya_tb@mail.ru.