

Компьютерная микроскопия при изучении предмета микроэлектроники

Галеева Луиза Хамитовна
доцент, к.ф.-м.н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования
электронных средств,
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ)
ул. К.Маркса, 10, г. Казань, 420111, (843)2384110

Сайфуллина Дана Вахитовна
студент-магистрант кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем,
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ)
ул. К.Маркса, 10, г. Казань, 420111, (843)2384110
Email:foton.kai@kstu-kai.ru

Аннотация

Статья посвящена вопросам использования метода анализа изображений в учебном процессе при изучении предмета микроэлектроники. Процесс обучения студентов технических ВУЗов невозможен без демонстрации микроизображений образцов, сопровождающейся необходимыми пояснениями преподавателя. Просмотр микрообъектов полезно дополнить лекционным и практическим курсом применения методов компьютерного анализа изображений.

That article is devoted to questions of using of a method of the analysis of images in educational process of microelectronics subject. Process of students education in technical colleges is impossible without demonstration of microimages of samples which is followed by necessary explanations of the teacher. It is useful to add viewing of microobjects with a lecture and practical course of application of methods of the computer analysis of images.

Ключевые слова

микроэлектроника, компьютерный анализ изображений, обучение;
microelectronics, computer analysis of images, training;

Введение

Предмет микроэлектроники, изучаемый на втором курсе бакалавриата Института технической кибернетики и информатики в КНИТУ-КАИ, состоит из двух частей. Первая часть “Физические основы микроэлектроники” включает физику твердого тела и физику полупроводниковых приборов, которые являются основой построения интегральных микросхем. Вторая часть рассматривает “физико-химические основы технологии электронно-вычислительных средств”. Обучение опирается на знания таких фундаментальных дисциплин, как физика, математика, химия, биология и информатика. Вырабатываемые компетенции заключаются в следующем. Будущий специалист в профессиональной деятельности использует основные законы естественнонаучных дисциплин, применяет методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования; осваивает методики использования программных средств для

моделирования мультифизических задач микроэлектроники, анализа изображений тонких пленок и элементов электронных схем.

Учебная лаборатория микро- и нанотехнологий.

Междисциплинарный характер предмета, проблемно ориентированный подход и сложные вырабатываемые компетенции требуют создания специализированной учебной лаборатории (рис 1).



Рис. 1 Фотография учебной лаборатории микро- и нанотехнологий.

В лаборатории, созданной на кафедре систем автоматизированного проектирования электронных средств в ИТКиИ, происходит чтение лекций с презентациями, проведение практических занятий и лабораторных работ, компьютерное тестирование. Лаборатория оснащена вычислительной техникой в виде локальной сети из восьми персональных компьютеров, принтера, проектора и смарт-доски. На компьютерах установлены специализированные программы: COMSOL Multiphysics 3.5 для мультифизического и химико-технологического моделирования, Matlab 7.0, расширяющий возможности COMSOL Multiphysics и Image PRO plus 6.0 для анализа изображений. Это позволяет создать современную среду обучения для формирования у студентов требуемых компетенций. Проведение экспериментальных лабораторных работ возможно лишь при наличии технологического и контрольно-измерительного оборудования. В лаборатории для получения тонких пленок электрохимическими методами и методами золь-гель технологии установлены двухместный химический шкаф и потенциостат P8, вакуумная установка ВУП-2К для получения пленок термовакуумным напылением и катодным распылением, дистиллятор для очистки воды, используемой для приготовления различных растворов. Контрольно-измерительное оборудование для измерения электрических характеристик включает осциллографы, вольтметры, источники питания, измеритель RLC и лабораторные стенды. В лаборатории активно используются оптические методы: эллипсометрия, спектрометрия и компьютерная микроскопия. Для реализации компьютерной микроскопии студенты должны знать основные возможности и характеристики микроскопов.

Качество микроскопа определяется его увеличительной и разрешающей способностью. Коэффициент увеличения микроскопа определяют по формуле: $D=K \cdot V$, где K - увеличение окуляра, V - увеличение объектива. Теоретически, световой микроскоп может обеспечить увеличение $\times 2000$ раз и более. Однако пределы полезного увеличения в обычно используемых микроскопах достигают

только $\times 1400$ раз. При превышении границы полезного увеличения проявляют себя некоторые нежелательные явления (например, дифракция света), приводящие к ошибкам в зоне «бесполезных» увеличений. Например, для объектива 40х полезное увеличение составляет $\times 325$ -650. Такое увеличение позволяет уверенно различить все структуры, разрешаемые данным объективом. Чтобы получить общее увеличение в пределах полезного для объектива $\times 40$, следует использовать окуляры $\times 10$ и $\times 15$. Окуляр большего увеличения (например, $\times 20$) не поможет выявлению более тонких деталей объекта. Поле зрения и разрешающая способность микроскопа также зависят от увеличения используемого объектива. Объективы с увеличением 20х, 40х, 60х имеют, соответственно, убывающие поля зрения 0,9; 0,45 и 0,3 мм. Разрешающая способность у объективов 20х, 40х равна 0,55 мкм. Максимальная разрешающая способность светового микроскопа составляет 0,2 мкм. У объективов с малым увеличением расстояние от фронтальной линзы до препарата (рабочее расстояние) больше, чем у объективов с большим увеличением. Электронное масштабирование, которое производится при передаче изображения с матрицы камеры на монитор компьютера, также является «бесполезным», поскольку оно не увеличивает разрешение объекта и не прибавляет дополнительной информации о его строении, однако позволяет видеть разрешаемые микроскопом элементы объекта более крупно.

Перефразируя известное изречение «многого глазами не увидишь ..» можно сказать, что в микроэлектронике зорко лишь компьютерное зрение плюс интеллект исследователя. Зрительное восприятие в основе своей представляет творческий познавательный процесс («лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать»). По Арнхейму [1] главной особенностью этого процесса является не воспроизведение объекта, а создание виртуальных моделей при ответе на вопросы: что это?, почему?, каким образом? и т. д. Именно создание моделей свидетельствует о понимании любого явления. Первая ступень исследования объекта микроэлектроники обычно связана со световой компьютерной микроскопией [2]. При этом часто исследователь (студент) встречается с решением обратных задач, когда «дракона нужно нарисовать по его следам». В связи с высокой степенью микроминиатюризации студенты сталкиваются с квантовыми объектами, электрофизические свойства которых в сильной степени зависят от их размеров, строения и технологии синтеза. В микроэлектронике при исследовании свойств тонких пленок важно найти взаимосвязи типа «структура – свойство» и «структура – технология изготовления». Выявив эти закономерности можно, регулируя технологические параметры создавать пленки с заданными электрофизическими свойствами. Большую помощь в исследовании оказывает постановка прямой задачи, моделирующей ожидаемый результат исследования под микроскопом. Сокращение времени познавательного процесса и повышение его эффективности возможно на основе предварительных знаний о свойствах применяемых материалов, о методе синтеза и его технологическом режиме.

Обучение студентов работе с программным пакетом Image Pro Plus.

На сегодняшний день существует достаточно много литературы и программных продуктов [2 – 6], назначение которых определяется термином «Image-analyse», т.е., «анализ изображений». *Image-Pro Plus (IPP)* компании *Media Cybernetics* [3] представляет собой наиболее полный программный пакет для профессиональной обработки и анализа изображений в научных исследованиях, контроля качества, анализа материалов и многих других медицинских, биологических и промышленных приложениях. Программа разрабатывалась более 20-ти лет и на сегодняшний день включает в себя все необходимые профессионалам функции и возможности обработки изображений и извлечения из них количественной информации. За счет своей функциональности, расширяемости и

программируемости, *Image-Pro Plus* в настоящее время является стандартом программного обеспечения анализа изображений. Программа отличается простым, дружелюбным и интуитивно понятным интерфейсом и интегрирует в себе текст, данные вычислений и измерений (в том числе статистические) и графику. Встроенный Visual Basic-совместимый макроязык позволяет легко адаптировать пакет под специфические задачи и расширить его возможности. Данная программа позволяет проводить как простые (вручную), так и сложные автоматизированные измерения. Абсолютная геометрическая калибровка, тесно связанная с конкретным устройством получения изображений, обеспечивает получение данных в нужных единицах измерения.

Уникальные технологии фильтрации и сегментации позволяют разделить перекрывающиеся объекты, продлить «рваные» края и распознать кластеры. После проведения операции сегментации, каждой группе объектов может быть сопоставлен определенный цвет для лучшей визуальной идентификации и классификации. Полученные данные можно сравнивать, анализировать, визуализировать с использованием таблиц с произвольной сортировкой, гистограмм, диаграмм рассеяния, линейных профилей, псевдо окрашивания. Программа обладает инструментами для сложения, вычитания и маскирования изображений с логическими и арифметическими функциями, а также мощными геометрическими преобразователями для пространственной обработки. Для удобного архивирования, документирования и дальнейшего статистического анализа, результаты можно передать в *Excel* или другие электронные таблицы через *Direct Data Export*.

Ниже приведено цифровое изображение гетероструктуры опаловидной пленки кремнезема, синтезированной методом золь-гель технологии, открытой в рабочей области программы IPP (рис.2).

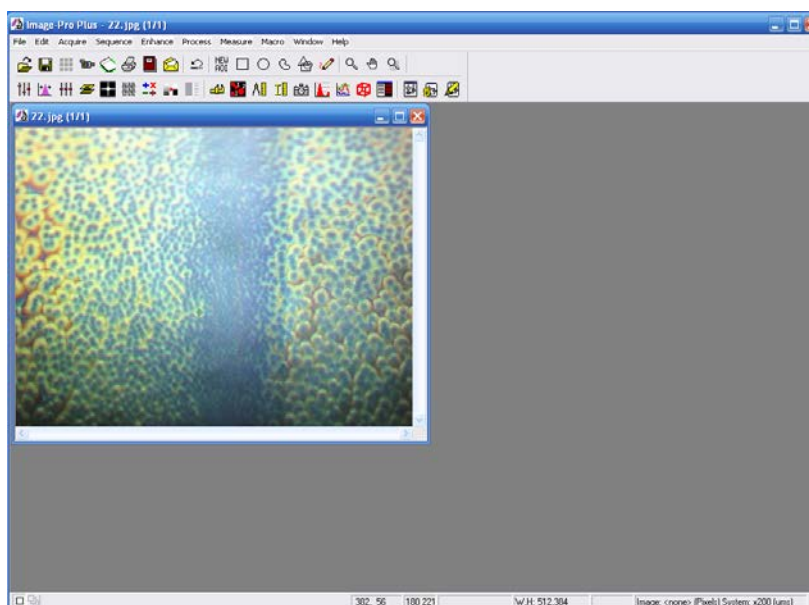


Рис. 2 – Рабочая область Image-Pro Plus

Подобные изображения могут быть использованы в качестве заданий при выполнении лабораторных работ и курсовой работы, связанных с изучением методов обработки цифровых изображений. В учебной лаборатории имеется пополняемая база данных, включающая более 500 микроскопических снимков тонких пленок, полученных имеющимися технологиями. Это позволяет в процессе обучения наиболее полно показать возможности пакета и способствовать индивидуализации заданий и развитию творческих способностей студентов.

В работе рассматривается одна из методик количественного анализа в **Image-Pro Plus**, выполняемая в нижеследующей последовательности. Изображение открывают с помощью меню **File>Open**. При этом в открывшемся диалоговом окне выбирают тип файлов - **All Format**. При необходимости выделить интересующие объекты изображения создают активное оптическое изображение (AOI) с помощью двух инструментов **Rectangular AOI** или **Ellipse AOI**. Для цветных изображений выполняется преобразование AOI в серое изображение из меню **Edit>Convert to>Gray scale 8**. Исходное изображение желательно сохранять в рабочем пространстве после каждого этапа обработки. Для этого используют опцию **Tile Images** из меню **Window**. Для разделения объектов в кластерах можно использовать опцию **Filters>Enhancement>HiGauss** (с параметрами: размер ядра фильтра 9x9, passes=1) из меню **Process** (рис.3).

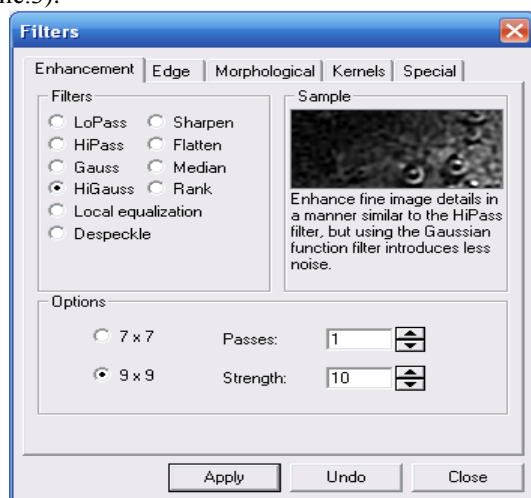


Рис.3 Диалоговое окно выбора фильтра для улучшения изображения

Фильтр Собеля выбирают в том же окне по вкладке **Edge**, если нужно улучшить только основные контуры изображения (рис.4). Этот фильтр использует математическую формулу к окрестности 3x3, чтобы определить и выделить контуры повышенной яркостью.

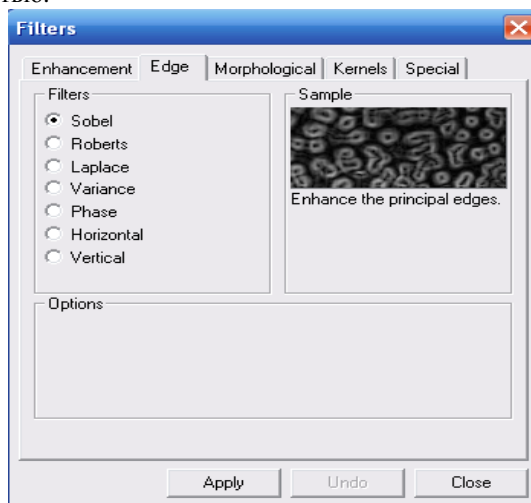


Рис.4 Диалоговое окно Edge Filters

Фильтр Робертса выбирают для выделения тонких контуров. Он не является фильтром свертки и применяет математическую обработку в окрестности 4x4.

Фильтр Лапласа применяют для выделения всех контуров изображения. Выбор конкретного фильтра или последовательности фильтров для улучшения изображения определяется характером объекта исследования и является индивидуальным. Для определения значимой области изображения из меню **Process** выбирают опцию **Threshold** (порог), которая открывает диалоговое окно **Segmentation** (рис.4). В открывшемся окне при помощи мыши меняют положение вертикальной линии уровня таким образом, чтобы области соответствующие интересующим объектам максимально четко дифференцировались друг от друга. Центральным вопросом в сегментации по порогу становится методика выбора порога. Если изображение с очень высокой контрастностью, на котором объекты очень темные, а фон однороден и светлый или наоборот, то выбор фиксированного порога 128 по шкале от 0 до 255 может быть достаточно точным. В большинстве случаев сегментация выполняется по гистограмме яркости изображения путем выбора нескольких порогов. Важно понимать, что нет универсальной и совершенной техники сегментации, которая будет работать для всех изображений.

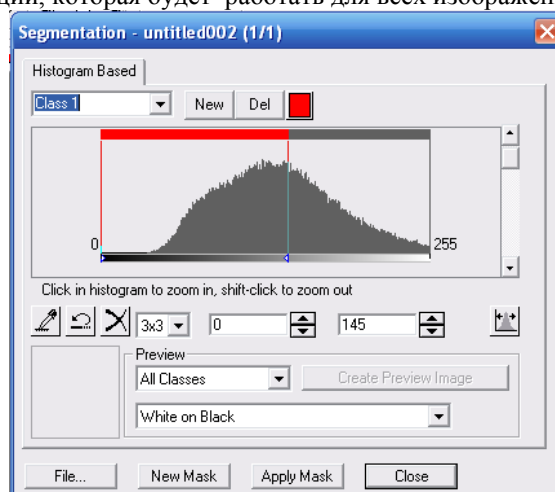


Рис.4 Определение значимой области **Threshold**.

В качестве варианта контрастирования (маски) можно использовать вариант по умолчанию **White on Black**. Для завершения операции нажать кнопку **Apply Mask** и закрыть окно **Threshold**. Для подсчета и измерения выделенных объектов используется опция **Count/Size** из меню **Process>Measure** (рис.5).

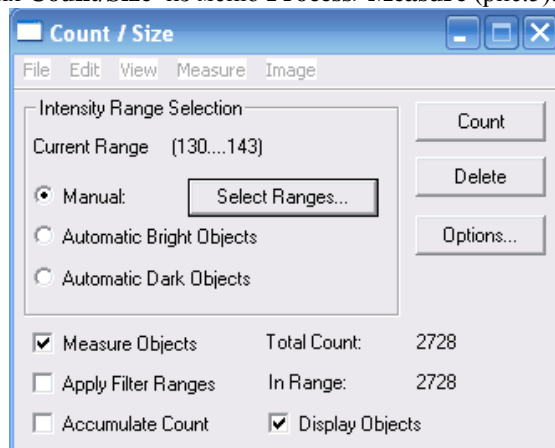


Рис.5 Диалоговое окно для подсчета и измерения выделенных объектов.

В приведенном диалоговом окне выделение объектов происходит в области **Intensity Range Selection** и может выполняться вручную **Manual** или автоматически для светлых **Automatic Bright Objects** и для темных объектов **Automatic Dark Objects**. Для более успешного измерения и подсчета объектов применяются опции меню **Image**. Опция **Flatten Background** удаляет фоны, которые содержат в себе интенсивности, содержащиеся в объектах и усложняющие изоляцию объектов.

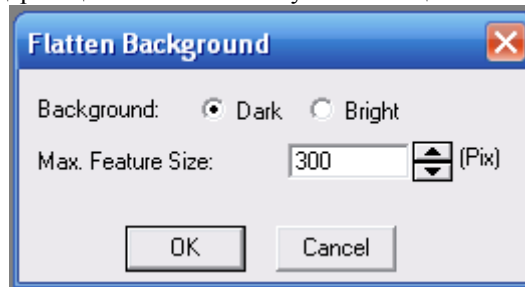


Рис. 6 Выбор опций удаления фона.

Команда **Flatten Background** фильтрует фон и уменьшает колебания интенсивности внутри его. В диалоговом окне выбирают опции **Dark** или **Bright**, которые описывают фон изображения. Обычно необходимо выбрать интенсивность характеризующую поле, на котором лежат объекты. В области **Max. Feature Size** вводится приближенный диаметр самого большого объекта изображения или AOI. Его лучше выбрать высоким, чтобы не было вредного влияния на изображение, хотя оно увеличивает время обработки. Измеряемые параметры объектов задаются в меню **Measure** по опции **Select Measurement** (Рис.7). В списке измеряемых параметров изображения насчитывается 58 наименований. Среди них можно выделить следующие типы измеряемых параметров: морфологические, оптические, характеристики цвета, топологические, стереологические и пользовательские.

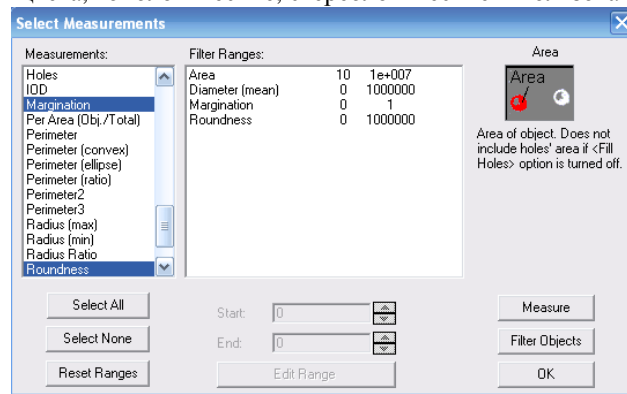


Рис.7 Окно для выбора измеряемых параметров.

После выбора измеряемых параметров окно закрывают нажатием кнопки **ОК**. В открытом диалоговом окне **Count/Size** после нажатия кнопки **Count** появится количество выделенных объектов. Из меню **View** можно получить измеренные параметры каждого объекта в виде таблицы или гистограммы (рис.8).

С помощью диаграммы рассеяния **Scattergram** из этого же меню можно выявить корреляционные связи между измеряемыми параметрами изображения. Современные подходы к исследованию микроскопической структуры объектов электроники требуют нахождения взаимосвязей между строением изучаемого объекта и другими его свойствами.

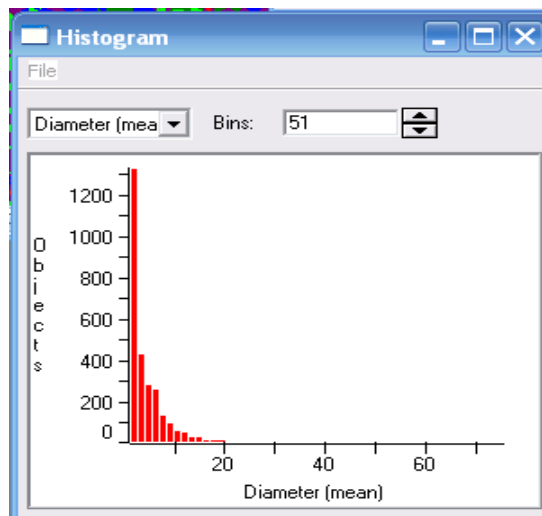


Рис.8 Гистограмма распределения объектов изображения по диаметру.

В окне **Histogram** указывается измеряемый параметр и число бинов. Результаты статистической обработки представляются в виде таблицы. При большом количестве объектов можно выполнить их классификацию, используя меню **Measure** по опции **Auto-Classification**, диалоговое окно которой расположено ниже (рис.9).

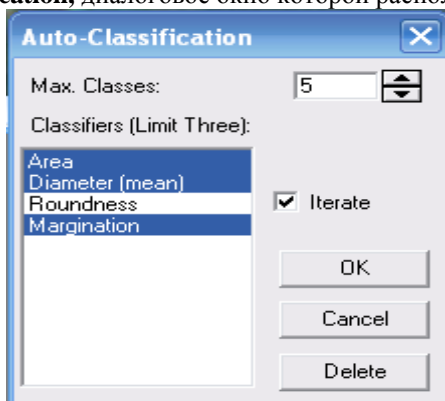


Рис.9 Диалоговое окно классификации.

В нем устанавливается максимальное число классов, на которые делятся результаты измерений и выбираются типы измерений в качестве классификаторов. Следует заметить, что можно выбрать до 16 классов, но число классов никогда не превысит указанное значение в “Max Classes”. Если выбрано **Iterate**, то процесс классификации повторяется, пока не будут изменяться результаты.

Class	Objects	% Objects	Mean Area	Mean Diameter (mean)	Mean Roundness	Mean Margination
1	1945	71.297653	4.5732646	2.2045319	1.1061484	.33333334
2	549	20.124634	41.664845	7.3449507	2.2070646	.50047410
3	219	8.0278597	203.03653	13.854895	5.2955227	.40551496
4	13	.47653958	697.38464	30.928085	33.041187	.41712373
5	1	.03665689	41121	215.74371	679.60052	.34638845
6	1	.03665689	70027	322.16452	765.45026	.35063970

Рис 10. Таблица с результатами классификации объектов.

Анализ таблицы (рис.10) в нашем случае обнаруживает два класса по одному объекту. Можно эти классы не рассматривать или попробовать объединить с другими, изменяя классификаторы и число классов, вновь возвращаясь в программу к опции **Auto-Classification**. Полученные результаты принимаются или отклоняются самим студентом, имея перед глазами исходное изображение, путем изменения фильтров улучшения изображений и меняя пороги сегментации. После того, как студент подберет последовательность функций, необходимых для получения нужного результата, он может записать ее в виде методики.

Таким образом, создается индивидуальная методика анализа конкретного изображения.

Заключение

В данной статье показаны обучающая среда и основные возможности использования программного пакета IPP в учебном процессе для исследования объектов микроэлектроники и получения количественной информации. Применение этого пакета в экспериментальных исследованиях чрезвычайно актуально, имеет большие перспективы и развивает творческие способности студентов. На этой основе студенты могут выполнять исследовательские курсовые и дипломные работы. Статистическая обработка данных и особенно сегментация по гистограмме предполагает возможность постановки практических занятий и в дисциплине “Управление качеством электронно-вычислительных средств”.

Литература

1. R. Arnheim *Visual Thinking*», London, 1970
2. В. Пантелеев, О.Егорова, Е.Клыкова *Компьютерная микроскопия*. М: Техносфера, 2005. – 304с.
3. Image Pro Plus Version 6.0 (<http://support.mediacy.com/ipp701.asp>)
4. Б. Яне *Цифровая обработка изображений*. М: Техносфера, 2007. – 584с.
5. Р. Гонсалес, Р. Вудс *Цифровая обработка изображений*. М: Техносфера, 2005. – 1072с.
6. В.П. Дьяконов *МАТЛАБ 7.0*/R2006/R2007 Самоучитель*. М: ДМК Пресс., 2008. – 708с.