

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ БИОМЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ

С.Кузьмин, к.биол.н. smkuzmin@mtu-net.ru
В.Матвеев, д.ф-м.н. synchrotron@yandex.ru

Вторая характерная черта научного развития на данном этапе — это сближение органического мира, мира живой природы, с неорганическим...

М.В.Ковальчук [1]

Уже не только научного развития. В современной медицине это практическая необходимость. Медицина массированно внедряется в организм человека искусственными объектами: это имплантаты, протезы, стимуляторы, искусственные сосуды, нанокапсулированные лекарства, диагностические и терапевтические наночастицы, а в будущем – внутриорганизменные роботы-хирурги. Для всех этих объектов требуется биосовместимость. Это многогранное понятие, включающее гемосовместимость, т.е. отсутствие тромбостимулирования, тканесовместимость (отсутствие отторжения ткани), иммуносовместимость (отсутствие атаки со стороны иммунной системы), интегрируемость в ткани (возникновение связи с определенными тканями). Продуктивной теории биосовместимости в настоящее время нет. И для того, чтобы сформулировать адекватные этим медико-биологическим требованиям конкретные физико-химические требования к искусственным внедряемым объектам, необходима большая комплексная экспериментальная работа, которая предложит максимально возможное многообразие синтетических структур, изготавливаемых при помощи самых разных технологий.

ВНИИ физических проблем им. Ф.В.Лукина в течение ряда лет велись работы по изготовлению гемосовместимых имплантатов с помощью технологий, традиционных для микроэлектроники [2-4]. При изготовлении имплантатов с модифицированной поверхностью предпринимались также попытки использовать источники УФ-излучения для избирательной

(по спектру излучения) модификации и "репарирования" поверхностей биомедицинских материалов, т.е. для радиационного управления фотохимическими процессами на поверхности материала.

Более широкие возможности для подобных медицинских целей [5] предоставляет источник синхротронного излучения "Зеленоград" – базовый элемент Центра высоких технологий НИИФП.

Излучение синхротрона (СИ) имеет три важные характеристики – высокую интенсивность, широкий и легко перестраиваемый спектр в диапазоне от жесткого рентгеновского излучения до излучения с длиной волны примерно 1 мкм, а также возможность получения квазимонохроматического когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны в области 1–100 нм. Эти характеристики позволяют, во-первых, осуществлять избирательные по спектру (селективные) фотохимические процессы на поверхности медицинских материалов в области оптимальной радиационной стимуляции той или иной фотохимической реакции и, во-вторых, осуществлять пространственное или поверхностное наноструктурирование биомедицинских материалов с помощью когерентного пространственно-структурированного синхротронного излучения (электромагнитного поля, формируемого в результате интерференции). Рассмотрим эти вопросы более подробно.

СИ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ НА ПОВЕРХНОСТИ БИОМЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Практически вся современная химия является тепловой. Химическое превращение заключается в перестройке электронных орбит, происходящей за счет воздействия теплового движения, имеющего широкий энергетический спектр и распределенного по многим электронным структурам.

Специфичность, направленность химической реакции обеспечивается принципом самоорганизации, т.е. свойствами участвующих в процессах молекул и атомов при заданных макроскопических условиях. Инструменты управления тепловой реакцией ограничены и в целом малоспецифичны: это состав реакционной смеси, концентрация–давление, температура и катализатор. Результат проведенного химического процесса обычно характеризуется разнообразием продуктов, поскольку управляющие воздействия не отличаются высокой специфичностью.

В лазерной химии возникла концепция управления перестройкой электронной системы путем прямого адресного специфического воздействия на конкретный электрон электромагнитным излучением [6]. Монохроматичность лазерного излучения позволяет селективно возбуждать молекулы одного вида, при этом молекулы других видов остаются невозбужденными. Селективность возбуждения в этом процессе ограничена лишь степенью перекрытия полос в спектре поглощения вещества. Эта концепция существовала уже давно, начиная

с изучения спектров веществ, но перспектива ее реализации появилась только с появлением мощных источников электромагнитного излучения.

Синхротронное излучение для этих целей имеет преимущество перед лазерным излучением – очень широкий непрерывный спектр, и из этого спектра можно выбрать любые частоты, или комбинацию частот, или спектр частот для целенаправленного воздействия на электронную систему и ее перестройки. Выделение из непрерывного спектра СИ нужной частоты или области частот можно, конечно, осуществлять с помощью монохроматора или набора фильтров. Однако неизбежные потери мощности излучения при такой фильтрации могут ограничить области реального технологического использования СИ для рассматриваемых целей. Еще более универсальным и более мощным инструментом является узкополосное (квазимонохроматическое) излучение с перестраиваемым спектром, так называемое ондуляторное излучение. Оно генерируется специализированными устройствами – ондуляторами, встраиваемыми в прямолинейные участки синхротрона (в том числе синхротрона "Зеленоград"), или ондуляторами, используемыми в качестве конечных устройств накачки и генерации излучения в первых рентгеновских лазерах на свободных электронах (РЛСЭ) [7]. Фактически ондуляторное излучение – это просто один из возможных типов СИ, характеристики которого формируются при движении электронов в периодических магнитных полях, создаваемых магнитной системой ондулятора.

Возможно также менее селективное неспецифическое возбуждение электронных систем излучением с широким рентгеновским спектром. Оно при воздействии на оболочки атомов будет приводить к возмущению обширного ряда электронных орбит атомов конкретного элемента и может оказаться эффективным для проведения некоторых электронных перестроений молекулярных (валентных) орбит.

СИ КАК ИНСТРУМЕНТ РАДИАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Важнейшим технологическим применением СИ в медицине может стать пространственное или поверхностное наноструктурирование биомедицинских материалов. Реализация технологии радиационного наноструктурирования возможна только при использовании когерентного ондуляторного излучения. Степень когерентности излучения в основном связана с качественными параметрами электронного

пучка в синхротроне или РЛСЭ. Синхротрон "Зеленоград" обеспечивает достаточную для технологии наноструктурирования когерентность пучка ондуляторного излучения только по одному направлению (1D-когерентность) [8]. Модернизированный синхротрон "Зеленоград" или синхротроны с очень высокими параметрами (например, синхротрон SLS, Швейцария) [9], а также РЛСЭ [7] обеспечивают 2D-когерентность. Суть радиационного наноструктурирования заключается в создании из пучка ондуляторного излучения с помощью схем интерференционной рентгенолитографии периодического 1D или 2D пространственного распределения электромагнитного поля с достаточно большой глубиной резкости. Такое пространственно структурированное поле воздействует на любой объект, помещенный в область действия этого поля, и вызывает модификацию малых областей объекта в периодической структуре.

Модификация – это:

- во-первых, локальная деструкция резиста с последующей обработкой (в том числе радиационной) биомедицинского материала через периодический массив нанотверстий в резистной маске (собственно интерференционная рентгенолитография);
- во-вторых, непосредственная радиационная деструкция материала с созданием перфорированной объемной структуры (фототравление) [11];
- в-третьих, физико-химические изменения свойств материала с созданием на поверхности упорядоченной гетерогенной или "зародышевой" структуры нанобластей с характеристиками, отличными от характеристик матрицы (в частности, для последующего выращивания на поверхности упорядоченных массивов наноэлементов или формирования самоорганизующихся наноструктур).

СХЕМЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

На ондуляторном излучении синхротрона "Зеленоград" в принципе могут быть реализованы две схемы интерференционной литографии – зеркальная и решетчатая, обусловленные двумя способами разделения исходного пучка излучения на вторичные интерферирующие пучки. Причем для наноструктурирования биомедицинских материалов практически пригодна только решетчатая схема.

В зеркальной схеме интерферируют два когерентных пучка, формируемые из одного исходного когерентного ондуляторного пучка отражением от двух плоских зеркал (рис.1).

Если θ – угол между интерферирующими пучками и λ – длина волны излучения, то, как известно [10], в области перекрытия пучков (в частности, в резисте) формируется стоячая электромагнитная волна с периодом

$$d = \lambda / 2 \sin(\theta/2). \tag{1}$$

В соответствии с этой формулой даже в мягком рентгеновском диапазоне, например при $\lambda = 10$ нм и $\theta = 45^\circ$ интерференционная рентгенолитография легко обеспечивала бы разрешение ~10 нм. Однако в рентгеновском диапазоне коэффициент отражения излучения от всех материалов очень мал и достигает близких к единице значений только при малых скользких углах падения $\alpha < \alpha_c$, где α_c – критический угол полного внешнего отражения. Типичное значение этого угла на длине волны 1 нм составляет 1° [10]. Поэтому, как видно из рис.1, максимальный возможный угол между интерферирующими пучками не превышает величины $2\alpha_c$ и достижимое разрешение (по периоду d бинарной 1:1 структуры)

$$d > \lambda / 2 \alpha_c. \tag{2}$$

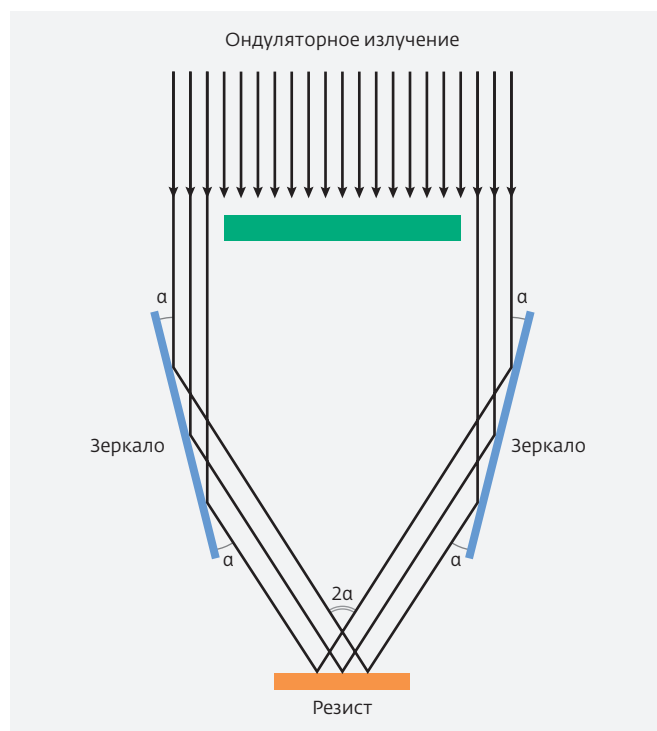


Рис.1. Схема зеркальной интерференционной рентгенолитографии с использованием геометрии скользкого падения пучков ондуляторного излучения

Возможный ассортимент материалов для медицины, изготавливаемых с применением синхротронного излучения

Продукт	
Название	Технические характеристики
Нанофильтры [11]	Размер проходного отверстия поры 1–100 нм, пористость до 0,6, толщина 10 нм, расходная характеристика в 50 000 раз больше имеющихся аналогов. Материалы: углерод, полиэтилентерефталат, полиимины, полисилоксаны, полиимид, поликарбонат, полисилоксан, углерод, золото, платина, палладий, титан, цирконий, хром, нитрид кремния, карбид кремния, нитрид бора, карбид бора, нитрид титана
Имплантаты с наноструктурированной гетерогенной биосовместимой поверхностью* [11]	Периодическая структура из пространственно, физически и химически однородных участков одинаковой формы и размера от 5 до 100 нм
Имплантаты с биосовместимой* однородной поверхностью [5]	Пространственно, химически и физически однородная поверхность площадью с характеристическим размером от 10×10 нм, т.е. любой наугад выбранный участок поверхности образца будет обладать одинаковыми указанными свойствами с любым другим таким же участком
Наноструктурированные рентгенографические экраны высокого разрешения	Разрешение 250 нм – 20 мкм, диаметр экрана 300 мм, материал матрицы для рентгенолюминофоров – кремний или металлы
Лекарственные, диагностические и рентгенотерапевтические нанокapsулы [5]	Нанокapsулы с изолирующим, маскировочным** или векторным*** покрытием

* Биосовместимость – широкое понятие, включающее гемосовместимость, т.е. отсутствие тромбостимулирования, тканесовместимость (отсутствие отторжения ткани), иммуносовместимость (отсутствие атаки со стороны иммунной системы), интегрируемость в ткани (возникновение связи с определенными тканями).

** Маскирующее покрытие – всякое инородное тело, попав в организм подвергается атаке со стороны защитных систем (например, иммунной) организма. Для предотвращения этого конфликта имплантат или нанокapsулы следует замаскировать покрытием, не идентифицируемым системами защиты как инородное, например покрыть объект собственными белками "хозяина".

Назначение	Технологические процессы, необходимые для изготовления Продукта	Станция синхротрона "Зеленоград"
<p>Компонент (диализная мембрана) для изготовления портативной искусственной почки (в перспективе имплантируемой). Отсекающие фильтры большой пропускательности для "мягкого" рентгена и жесткого ультрафиолета. Наночастицы для нанотехнологий и нанобиотехнологий. Мембраны для диффузионного разделения изотопов</p>	<p>Тонкопленочные, в том числе многослойные Ленгмюра-Блоджет-технологии. Интерференционная литография, ЛИГА-технология [11]</p>	<p>Станция интерференционной литографии. Станция интерференционного наноструктурирования и травления материалов. Станция глубокой литографии</p>
<p>Нанобиофильтры, заменители сосудов, клапанов, искусственные опорные и соединительные конструкции, ожоговые покрытия с биосовместимой поверхностью*</p>	<p>Тонкопленочные, в том числе многослойные Ленгмюра-Блоджет-технологии. Прямое фототравление полимерных материалов. Интерференционная литография по полимерным покрытиям имплантатов с последующим химическим травлением через полученную маску.</p>	<p>Станция интерференционного наноструктурирования и травления материалов. Станция интерференционной литографии</p>
<p>Нанобиофильтры, заменители сосудов, клапанов, искусственные опорные и соединительные конструкции, ожоговые покрытия с биосовместимой поверхностью*</p>	<p>Радиационная обработка медицинских материалов, радиационно-химическое стимулирование взаимодействия нанесение биосовместимых* нанопокровов</p>	<p>Станция "мягкой" радиационной обработки и модификации материалов</p>
<p>Рентгенографические экраны для визуализации рентгеновского излучения в рентгенографии, рентгеновской микроскопии, рентгеновской литографии и других задач</p>	<p>Тонкопленочные технологии, интерференционная литография. Фотонно-стимулированное травление полимерных пленок, литография металлических и неметаллических тонких пленок</p>	<p>Станция формирования функциональных слоев технологического комплекса фотонно-стимулированных процессов. Станция радиационного структурирования и нанотравления материалов. Станция интерференционной литографии</p>
<p>Адресная доставка**** лекарственных и рентгенотерапевтических средств [5]</p>	<p>Рентгеностимулированная полимеризация на твердой поверхности наночастиц с образованием полимерной капсулы из полимеров с биоактивными для прививки белков группами</p>	<p>Станция фотохимической и ионно-лучевой очистки технологического комплекса фотонно-стимулированных процессов. Жесткий рентген</p>

*** Векторное покрытие (или молекулярный адрес, или директор) – например, покрытие наночастиц антигенами к раковым тканям, обеспечивающим адсорбцию наночастиц в определенной ткани организма (адресная доставка).

**** Адресная доставка диагностического или терапевтического средства – адсорбция последнего определенной тканью организма.

***** Рентгеновский микроскоп имеет особые преимущества в биологии и медицине, поскольку позволяет исследовать живые (нативные) водные клетки в отличие от электронного микроскопа, позволяющего наблюдать структуры только "фиксированных" тканей, структура которых не обязательно должна совпадать со структурой нативных.

Отсюда следует, что при использовании излучения с $\lambda = 1$ нм могут быть сформированы структуры с периодом всего лишь примерно 30 нм. И хотя использование многослойных интерференционных зеркал (например, Mo/Si-зеркал) позволяет сдвинуть границу литографического разрешения примерно до 10 нм, имеется важный фактор, ограничивающий использование зеркальной схемы в реальной технологии. Этот фактор – необходимость сильной монохроматизации рабочего пучка излучения ондулятора. Квазимонохроматический пучок со спектральной шириной $\Delta\lambda/\lambda$ позволит сформировать не более $\lambda/\Delta\lambda$ отчетливых интерференционных полос [10]. Таким образом, ондуляторное излучение с типичной шириной спектра 2,5% ($\Delta\lambda/\lambda = 0,025$, $\lambda/\Delta\lambda = 40$) позволит сформировать не более 40 полос (или матрицу 40×40 в случае 2D-литографии), что явно недостаточно для реальных технологических приложений. Дополнительная монохроматизация спектра ондуляторного излучения нежелательна из-за существенного уменьшения мощности излучения.

Более эффективной оказывается схема решеточной интерференционной рентгенолитографии (рис.2). В этой схеме роль зеркал, формирующих два вторичных интерферирующих пучка, выполняют две дифракционные решетки (см. рис.2). Важной особенностью схемы решеточной интерференционной литографии является ее полная ахроматичность, т.е. независимость периода стоячего электромагнитного поля от длины волны. В отличие от зеркальной схемы для каждой спектральной

компоненты пучка формируется интерференционное поле с одним и тем же периодом. Эта особенность позволяет использовать всю ширину спектра ондуляторного излучения и формировать периодические структуры с очень большим числом элементов ($\sim 10^6$ периодов по одному направлению). Ахроматичность схемы обусловлена тем, что изменение угла дифракции пучков α на решетках при изменении длины волны λ приводит к такому изменению углов θ между интерферирующими пучками, при котором остается неизменной результирующая интерференционная картина.

Действительно, угол α дифракции пучков 1-го порядка определяется известным выражением

$$\sin \alpha = \lambda/PX, \tag{3}$$

где PX – период решеток, λ – длина волны. Поскольку угол между интерферирующими пучками $\theta = 2\alpha$, то в соответствии с (1) имеем

$$DX = \lambda/2 \sin(\theta/2) = \lambda/2 \sin \alpha. \tag{4}$$

Из равенств (3) и (4) следует

$$DX = PX/2.$$

Таким образом, в схеме решеточной интерференционной 1D-литографии независимо от длины волны формируется одномерное стоячее электромагнитное поле, период которого вдвое меньше периода дифракционных решеток квазишаблона.

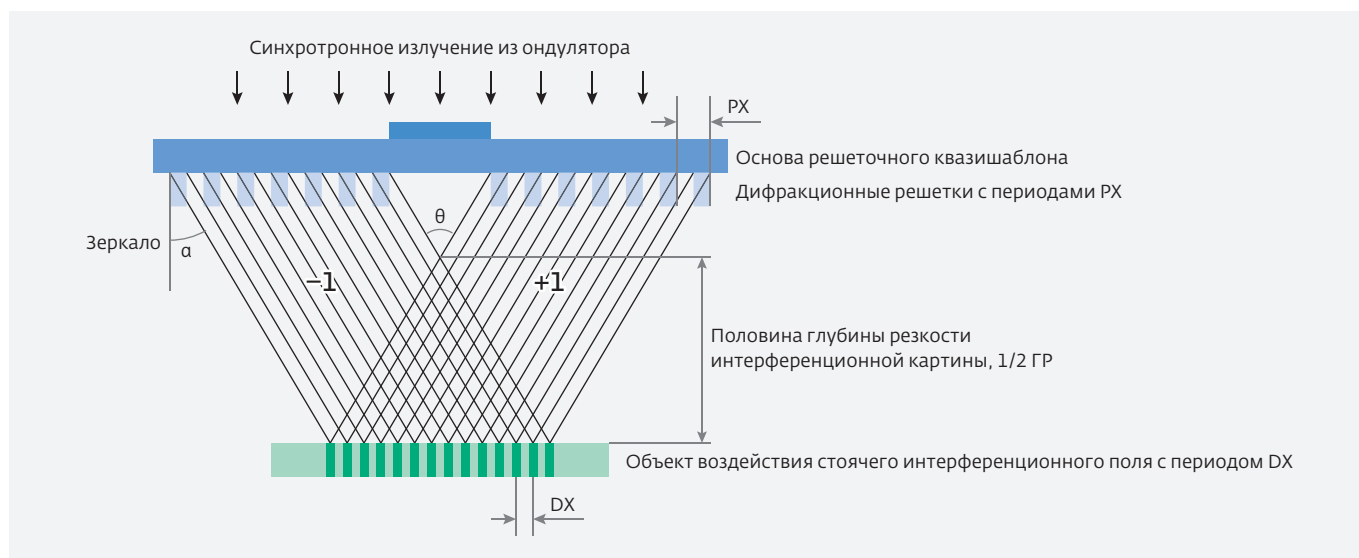


Рис.2. Схема решеточной интерференционной 1D-литографии. Обозначения: θ – угол между интерферирующими пучками $+1$ и -1 ; α – угол дифракции пучков $+1$ и -1 на дифракционных решетках квазишаблона

Очевидно, что при использовании дифракционных пучков 2-го порядка получаем еще большее разрешение:

$$DX = PX/4.$$

При добавлении в схему, приведенную на рис.2, еще одной пары дифракционных решеток, расположенных перпендикулярно, получается оптическая схема интерференционной решеточной 2D-литографии, где интерферируют сразу четыре вторичных дифракционных пучка [11]. В результате формируется двумерное стоячее электромагнитное поле, которое является инструментом наноструктурирования обрабатываемого биомедицинского материала или его поверхности в различных технологических вариантах (собственно литография, фототравление и т.д.), о которых говорилось выше. Очень важное технологическое достоинство интерференционной рентгенолитографии – большая глубина резкости (более 100 мкм) – позволяет обходиться без динамической фокусировки в процессе наноструктурирования и снижает требования к планарности резистов и обрабатываемых биомедицинских материалов.

СИНХРОТРОН КАК АНАЛИТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Хотя выше речь шла о технологических применениях СИ для обработки и изготовления биомедицинских материалов, не нужно забывать, что СИ – мощный инструмент аналитических исследований, которые в основном и ведутся в главных синхротронных центрах мира [12]. Если, например, говорить о наноструктурировании и стимуляции определенных физико-химических превращений, то СИ является, образно говоря, не только легко масштабируемым "радиационным резцом", с помощью которого можно изготовить многие типы наноструктурированных биомедицинских объектов, но также и своеобразной эталонной линейкой, ценой деления которой является длина волны излучения или его энергетические и временные параметры. Последнее обеспечивает прецизионную диагностику используемых технологических методов и сертификацию готовых биомедицинских изделий, особенно важную в силу специфичности проблемы взаимодействия биологических и небиологических поверхностей, связанной с методологическим затруднением описать живую и неживую материю в одних и тех же физических терминах (переменных) [13]. Хотя решения практических медицинских задач, по-видимому, еще долго будут находиться в области эмпирических знаний, очевидно, что для успешного развития последних необходимо

развивать как можно более полное описание каждой из взаимодействующих частей в специфических для нее переменных, поскольку успех эмпирического подхода определяется способностью обеспечить воспроизводимость существенных условий проведения процесса, в частности физико-химических характеристик поверхности.

Иначе говоря, без использования мощных аналитических возможностей СИ (спектроскопических, дифракционных, микро- и наноскопических и других методов анализа свойств биомедицинских материалов и поверхностей) технология изготовления таких материалов, как и сами материалы, могут оказаться слишком "физичны" для медицины. Универсальность Центра высоких технологий на базе синхротрона "Зеленоград" позволяет организовать весь цикл изготовления, исследований и сертификации биомедицинских материалов в одном месте на одном технолого-аналитическом оборудовании. В этом случае снимаются все препятствия, связанные с хорошо известным тезисом "если нельзя изменить, то невозможно сделать".

Вообще, синхротрон может соединять в себе всю неразрывную технологическую триаду: собственно технологию, аналитику и метрологию – и представлять из себя универсальный инструмент для технологических исследований с целью построения изысканных физико-химических структур для биомедицинских материалов.

Перечисленные выше технологические возможности синхротрона "Зеленоград" могут, естественно, быть реализованы только в каких-то конкретных изделиях. Возможный перечень этих изделий представлен в таблице.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ковальчук М.В.** Конвергенция наук и технологий – прорыв в будущее. – Нанотехнологии и наноматериалы, федеральный интернет-портал, 2011, http://www.portalnano.ru/read/infrastructure/russia/nns/kiae/convergence_kovalchuk.
2. **Алехин А.П., Врублевский А.И., Маркеев А.М., Романов Р.И., Неволин В.Н.** О структуре и свойствах аморфных углеродсодержащих пленок, формируемых магнитоактивным СВЧ-плазменным осаждением. – Поверхность, 1996, №10, с.47.
3. **Алехин А.П., Кириленко А.Г., Лапшин Р.В.** Морфология поверхности тонких углеродных пленок, осажденных из плазмы на полиэтилен низкой плотности. – Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2004, №2, с.3-9.
4. **Алехин А.П., Маркеев А.М., Тетюхин Д.В., Козлов Е.Н., Степанова М.А.** Влияние физико-

- химических свойств поверхности титановых имплантатов и способов их модификации на показатели остеоинтеграции. – Клиническая стоматология, 2009, №3, с.3–5.
5. **Безручко С.М., Кузьмин С.М., Сергеев О.В., Спинко Н.В.** Взаимодействие биологических и небологических поверхностей, новые возможности исследований и технологий с применением синхротронного излучения. – Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, №1, с.1–10.
 6. **Petrov A.K.** Laser control of chemical reactions. Chemical application of free electron laser. – Keynote Reports in World Chemistry Congress, Brisbane, Australia, 2001, p.44–47.
 7. **John N. Galayda, John Arthur, Daniel F. Ratner, and William E. White.** X-ray free-electron lasers—present and future capabilities [Invited]. – J. Opt. Soc. Am., 2010, v.27, is.11, p.B106–B118.
 8. **Валентинов А.Г., Корчуганов В.Н., Кулипанов Г.Н., Левичев Е.Б., Ушаков В.А.** Параметры ТНК специализированного источника синхротронного излучения. – Новосибирск: Институт ядерной физики СО АН СССР. Препринт 90-129 (с дополнениями), 1990 (2008).
 9. **Solak H.H., David C., Gobrecht J., Golovkina V., Cerrina F., Kim S.O., Nealey P.F.** Sub-50 nm period patterns with EUV interference lithography. – Microelectronic Engineering, 2003, v.67–68, p.56–62.
 10. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
 11. Патент № 2446863, Россия, 2010. Способ изготовления мембранного фильтра / Кузьмин С.М., Матвеев В.М., Мишачёв В.И., Сергеев О.В.
 12. Science and Technology of Future Light Sources. – A White Paper, by Ed. A.L. Robinson and B. Plummer. December, 2008. – <http://www.als.lbl.gov/als/publications/4LabWhitePaper.pdf>.
 13. **Thull R.** Physicochemical principles of tissue material interaction. – Biomolecular Engineering, 2002, v.19, is.2–6, p.43–50.

КНИГИ В ПРОДАЖЕ



ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ КИРЕЕВ В.Ю.

М.: ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФГУП "ЦНИИХМ", 2008. –
432 стр., 36 табл., 70 рис.,
Список литературы 142 ист.
ISBN 978-5-904586-01-0

Цена книги
по безналичному
расчету 472 руб.,
в том числе 18%
(72 рубля) НДС

Показана история развития электроники, микроэлектроники, нанотехнологий, приведена эволюция электронно-вычислительных машин (компьютеров), проанализирована кривая развития технологии микроэлектронного производства, сформулированы требования к основным изделиям микроэлектроники: логическим схемам и схемам памяти.

Сформулированы требования по основным параметрам к производственным помещениям, исходным кремниевым пластинам, к жидким и газообразным реагентам, к фотошаблонам, к технологическому оборудованию и оснастке и технической документации для организации производства интегральных микросхем (ИМС).

Проанализирована структура заводов для массового производства ИМС и пилотных линий (минифабрик) для мелкосерийного производства микросхем, приведены стоимостные оценки их составных частей. Показано влияние микроэлектроники на развитие производительных сил и уровень жизни современного общества.

Проведен анализ возможностей основных методов наноструктурирования для создания топологических рисунков с элементами субнанометрового диапазона (нанопаттернирования) интегральных наносхем (ИНС), приведены наиболее перспективные области применения.

Показаны возможности, ограничения, технологические маршруты изготовления, области применения и перспективы развития новых логических структур и структур памяти, устройств полимерной и молекулярной электроники, приборов квантовой и оптической электроники, микро- и нанозлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС)

Книга предназначена для инженеров и научных работников, специализирующихся в области технологий микроэлектроники и нанотехнологий. Для школьников старших классов, студентов и аспирантов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям 210601 "Нанотехнология в электронике", 210602 "Наноматериалы", 210104 "Микроэлектроника и твердотельная электроника" и 210108 "Микросистемная техника" книга может быть использована в качестве учебного пособия. Для преподавателей вузов эта книга может служить справочным, обзорным и лекционным материалом.

КАК ЗАКАЗАТЬ КНИГИ:

✉ 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 6, НИИ Физических проблем им. Ф.В.Лукина, ОНТИ,
Киреев Валерий Юрьевич; ☎ 8-903-972-71-66; valerikireev@mail.ru