

ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

(Electron Microscopy)

*«...Коль много микроскоп нам тайностей
открыл,*

Невидимых частиц и тонких в теле жил!..»

М.В. Ломоносов

«Письмо о пользе стекла»



Сотрудники ФНМ МГУ за электронным микроскопом

Каждый из нас в обычной жизни не раз сталкивался с линзами – отполированными округлыми дисками прозрачного материала, позволяющими получать увеличенное или уменьшенное изображение. Если взять несколько увеличивающих линз и правильно подобрать расстояние между ними, то можно получить устройство, которое позволяет разглядеть далекие объекты (например, бинокль, подзорная труба, телескоп) или изучать строение очень маленьких объектов, таких, как живые клетки (микроскоп). Вы спросите: а можно ли, взяв очень много оптических линз самого лучшего качества, создать микроскоп, с помощью которого можно было бы разглядеть совсем маленькие частицы – атомы, из которых состоят все вещества и живые организмы? Оказывается, нет, нельзя. Это связано с существованием так называемого дифракционного предела, не позволяющего разглядеть отдельно

друг от друга два объекта, если они находятся на расстоянии ближе, чем $d = 0,61\lambda/n$ (λ – длина волны излучения, n – показатель преломления среды). Как известно, длина видимого света, который может воспринимать глаз человека, составляет 400–700 нм. Обычно размер клеток варьируется от нескольких сотен до нескольких тысяч нанометров, поэтому их можно разглядеть в оптический микроскоп. А вот атомы и молекулы, размер которых, как правило, меньше 1 нм, в оптический микроскоп разглядеть невозможно.

Чтобы преодолеть эту трудность, необходимо использовать излучение с меньшей длиной волны. Выход был найден в 30-х годах прошлого века, когда немецкие ученые Эрнст Кнолл и Макс Руска создали микроскоп, в котором вместо света использовали поток электронов. В основе электронного микроскопа лежит утверждение Луи де Бройля о дуализме элементарных частиц, согласно которому движущийся электрон одновременно является и частицей, и электромагнитной волной.

Устройство оптического и электронного микроскопов имеет много общего (рис. 1). Прежде всего в микроскопе любого типа необходима система фокусировки, которая позволяет исследователю сфокусировать поток излучения на образце. В случае оптического микроскопа свет фокусируется путем изменения расстояния между стеклянными линзами. В электронном микроскопе электроны сначала ускоряются в электрическом поле между катодом и анодом, имеющим форму кольца. Длина волны ускоренных таким образом электронов может составлять несколько сотых долей ангстрема (т.е. быть порядка 10^{-12} м).

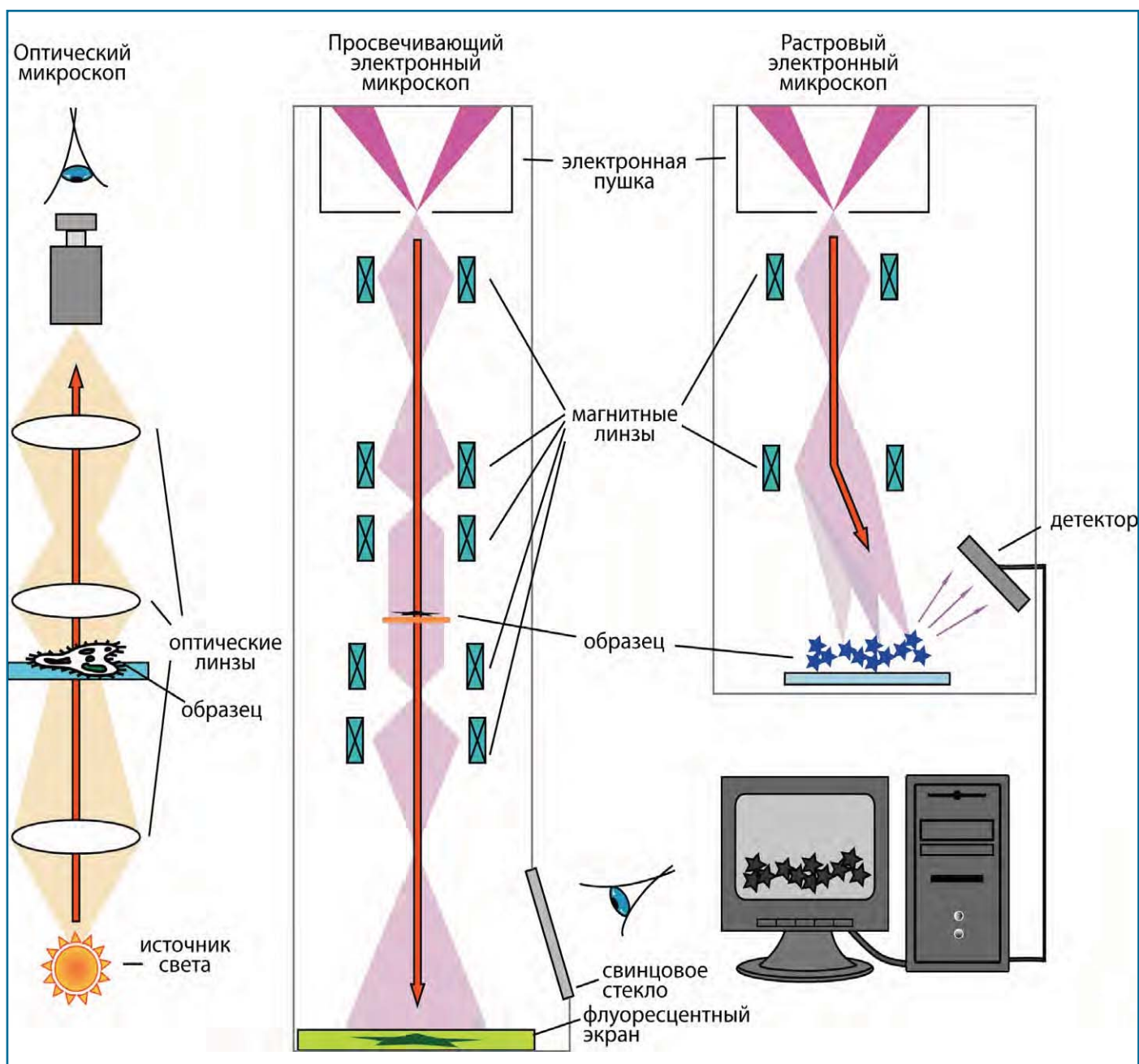


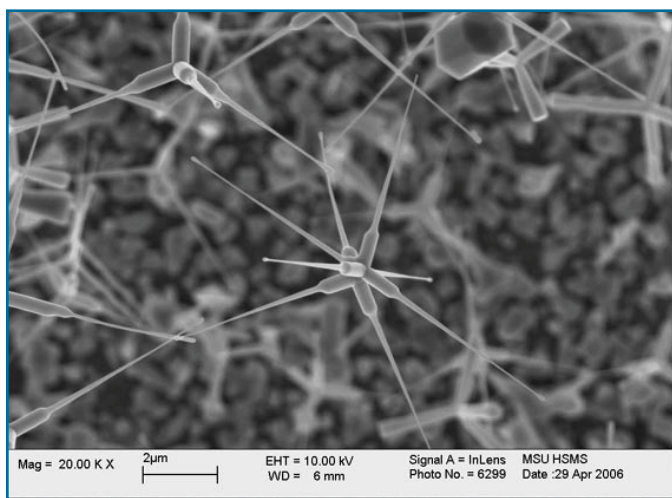
Рис. 1. Примеры геометрических фракталов: а — кривая Коха, б — кривая Леви, в — кривая Минковского, г — треугольник Серпинского, д — губка Менгера, е — дерево Пифагора

Затем электроны попадают в колонну микроскопа, где движутся в магнитном поле, создаваемом катушками индуктивности. Изменяя силу тока в катушках, можно управлять магнитными полями, а значит, изменять траектории электронов и очень точно фокусировать их поток. Таким образом, катушки выступают в роли своеобразных магнитных линз. Для того, чтобы избежать рассеяния электронов на молекулах газа, внутри электронного микроскопа поддерживается высокий вакуум. Благодаря малой длине волны электронов, а также постоянно совершенствую-

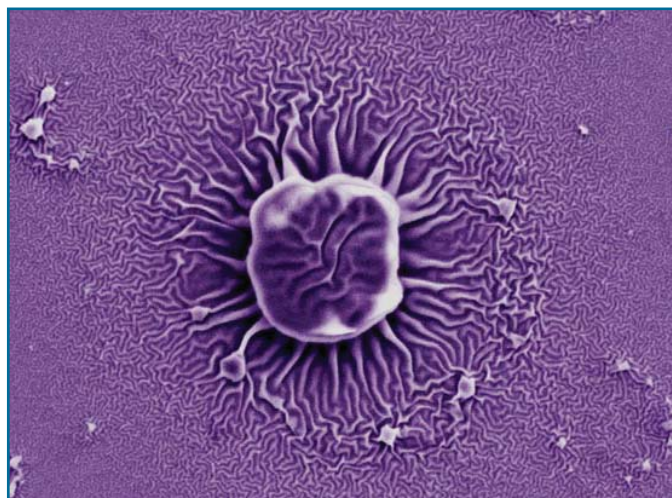
щимся системам магнитных линз, современные электронные микроскопы обладают субнанометровым (меньше 10^{-9} м) и даже субангстремным (меньше 10^{-10} м) разрешением. В электронной микроскопии выделяют два основных метода исследования.

Растровая электронная микроскопия — метод анализа поверхности образцов при сканировании выделенного участка сфокусированным потоком ускоренных электронов. В результате взаимодействия пучка с образцом, электроны попадают на детектор и изображение считывается

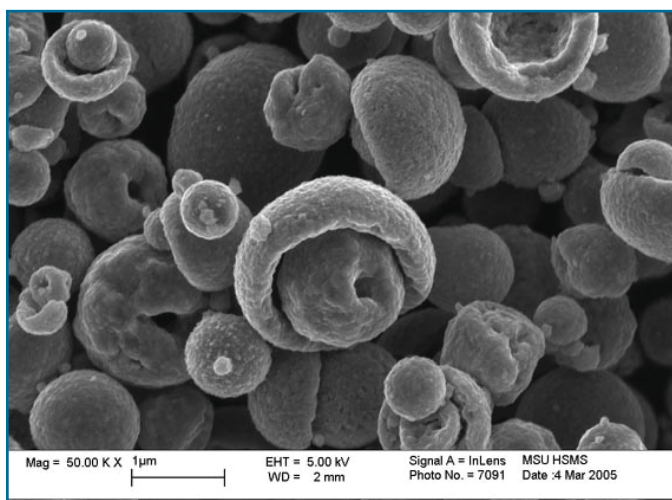
Примеры микрофотографий структур различных неорганических соединений, синтезированных студентами и аспирантами ФНМ. Фотографии получены на сканирующем электронном микроскопе Leo Supra VP 50 сотрудниками лаборатории неорганического материаловедения химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.



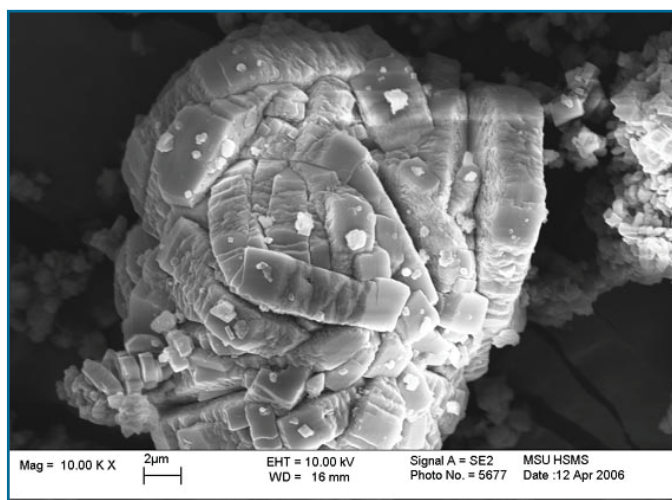
«Снежинки» — тетраподы ZnO, выросшие в газовой фазе над Si подложкой (Ляпина О.)



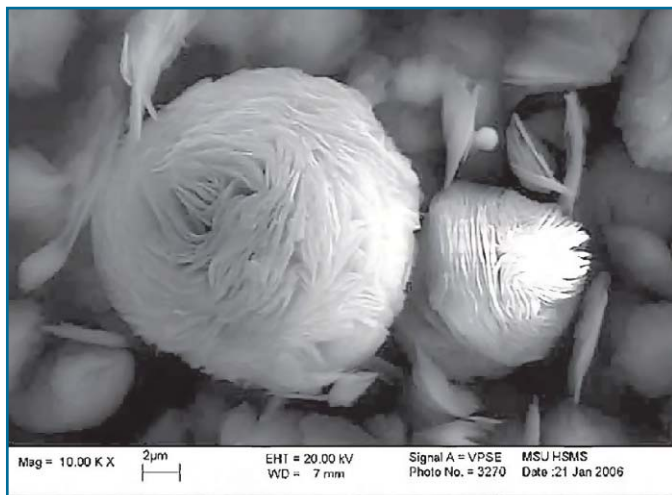
«Чужие» — аморфный кремний, осажденный на подложку методом PVD (Синицкий А.)



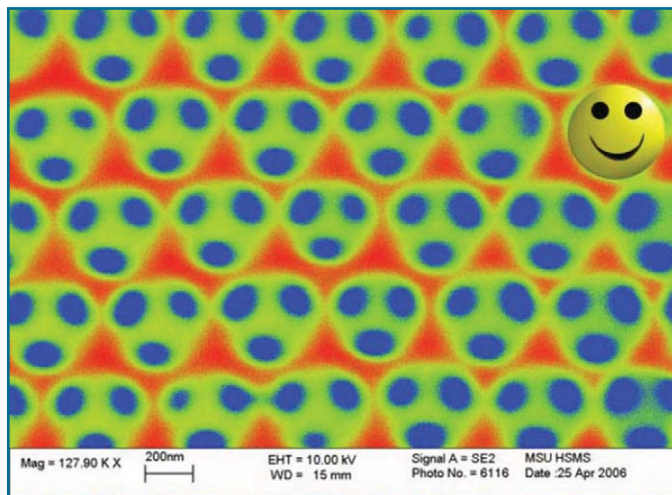
«Аэрозольные грибочки» — продукт пиролиза УЗ-аэрозоля ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$), (Чеканова А.)



«Искусственный разум» — агломерат частиц порошка $\text{Al}(\text{OH})_3$ — гиббсита (Кузнецов А.)



«Розы» — структуры гидроксида магния (сольво-термальный синтез) (Гаврилов А.)



«Смайлик» — упорядоченная магнитная структура никеля (Напольский К.)

с поверхности образца «строка за строкой», а затем выводится на монитор компьютера. Этим методом можно получить информацию не только о рельефе поверхности и размере частиц, но и о химическом составе образца и кристаллических фазах, находящихся на поверхности. Современные растровые микроскопы позволяют получать изображения поверхности образца с разрешением до 1 нм.

Просвечивающая электронная микроскопия – метод анализа внутренней микроструктуры и размера ультратонких – прозрачных для ускоренных электронов – образцов (тоньше 100 нм), который осуществляется облучением исследуемой области потоком ускоренных электронов. Изображение, полученное таким образом, является как бы «тенью» образца, увеличенная копия которой проецируется на флуоресцентный экран или фотопленку. По этому изображению можно судить о форме и размерах частиц, из которых состоит образец. Благодаря тому, что ускоренные электроны взаимодействуют с электронными оболочками атомов изучаемого вещества, с помощью электронного микроскопа получают дифракционную картину от упорядоченной структуры атомов, из которой можно извлечь информацию о кристаллических фазах. Современные электронные микроскопы высокого разрешения, обладающие

очень точной системой фокусировки, позволяют визуализировать картину распределения электронной плотности в образце, то есть практически «увидеть» отдельные атомы!

Следует отметить, что электронная микроскопия как динамично развивающаяся отрасль современной науки и технологии включает в себя не только анализ веществ, материалов и биологических объектов. Значительные усилия ученых направлены на изучение механизмов формирования изображения при взаимодействии образца с электронами, разработку и усовершенствование электронных и других корпускулярных микроскопов (например, протонного) и приставок к ним, методов пробоподготовки, способов сбора и обработки информации, которую можно получить с помощью микроскопа. В 1986 году ученые Эрнст Руска, создавший первый просвечивающий электронный микроскоп, Герд Биннинг и Генрих Рорер, которые сконструировали первый растровый микроскоп, получили Нобелевскую премию по физике. Их вклад в науку трудно переоценить: несмотря на дороговизну приборов (стоимость ультрасовременного микроскопа высокого разрешения достигает 4 млн евро), практически любое современное исследование в области физики, химии, биологии, материаловедения и особенно нанотехнологий нуждается в данных, полученных методом электронной микроскопии.

Литература:

1. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия для материаловедения. М.: Мир, 2006. 256 с.
2. Брандон Дж., Каплан У. Микроструктура материалов: Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004. 384 с.