Физика твёрдого тела

УДК 530.1:51

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИЕЙ

А.А. Сафонов, А.М. Штеренберг

Самарский государственный технический университет, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244. E-mail: alsaj@samtel.ru

Описывается методика моделирования структуры поверхности полимера, синтезируемого в процессе плазмохимического парофазного осаждения (полимеризации). Методика реализована с использованием вычислительной техники и позволяет производить моделирование геометрии поверхности по заданному начальному распределению структурообразующих элементов и рассчитывать фрактальную размерность данной модели. Произведены сравнения фрактальных характеристик с экспериментально найденными для синтезированных в газовом разряде поверхностей полимеров из исходных фтор- и кремнийорганических соединений.

Ключевые слова: фрактальная поверхность, моделирование фракталов, газоразрядная полимеризация.

Введение. Неравновесные физико-химические процессы, протекающие как в объёме тлеющего разряда пониженного давления, так и в областях, находящихся в зоне досягаемости активных компонент данного вида источника низкотемпературной плазмы, приводят к образованию макроскопических твердотельных систем, состоящих из фрактальных кластеров — объектов дробной размерности, что экспериментально подтверждается результатами микроскопического анализа продуктов газоразрядной полимеризации [1, 2].

Моделирование данных процессов и сравнение полученных данных с экспериментальными предоставляет возможность осмыслить некоторые явления, исследование которых традиционными методами статистической физики невозможно. Величины фрактальной размерности, найденные при компьютерном моделировании процесса заполнения поверхности и при проведении эксперимента, позволяют судить о размерности кластера и о механизме его образования [3]. Образование фрактального кластера происходит при слипании или слиянии частиц во всевозможных сочетаниях их размеров. На структуру и геометрические свойства кластера влияют условия протекания процесса в объёме тлеющего разряда и его окрестностях и характеристики исходных частиц, в том числе их счётные распределения по размерам. В основу

Александр Александрович Сафонов, инженер, каф. общей физики и физики нефтегазового производства. Александр Моисеевич Штеренберг (д.ф.-м.н., профессор), зав. кафедрой, каф. общей физики и физики нефтегазового производства.

моделей, применяемых для исследования процессов роста кластеров и оценки их свойств, закладывается совокупность условий, при которых формируются кластер и происходят начальные геометрические распределения структурообразующих элементов [4, 5]. Компьютерное моделирование, основанное на определённых алгоритмах движения и взаимодействия частиц, позволяет создавать виртуальную фрактальную поверхность и анализировать свойства и характер роста реальных систем [1, 6].

1. Теоретическая часть. В основе представлений о фрактальных структурах полимеризованных в газовом разряде продуктов лежат исследования, проведённые за последние годы различными авторами с помощью компьютерных и аналитических методов [7, 8]. Данные методы наглядно демонстрируют возможности современной вычислительной техники применительно к численным методам в физике. Модели, создаваемые с учётом группы параметров системы, позволяют оценивать влияние каждой переменной при фиксировании прочих, наблюдая при этом за изменениями, происходящими со свойствами модели. Это, в свою очередь, даёт информацию об универсальных свойствах системы и позволяет анализировать характер образования кластеров. Таким образом, при помощи компьютерного моделирования и данных эксперимента мы можем сформировать представления об условиях зарождения фрактального кластера и законах его развития. В случае более масштабного моделирования появляется возможность получения информации о поведении более сложных кластерных систем, состоящих из десятков и сотен взаимозависимых фрактальных кластеров.

В зависимости от условий протекания процесса физические модели, существующие сегодня, можно разделить по следующим свойствам:

- по характеру взаимодействий: кластер кластер или кластер частица;
- по характеру движения: прямолинейное или броуновское;
- по характеру объединения частиц или кластеров: в зависимости от вероятности их слипания при взаимодействии.

Характер процесса определяется реальными физическими условиями. Рост кластера происходит либо за счёт присоединения к нему отдельных частиц, либо за счёт объединения малых частиц в кластер с последующим объединением кластеров и, соответственно, возникновения большого кластера. Компактность и физические свойства кластера зависят от характера движения частиц и кластеров в пространстве и от вероятности слипания частиц и кластеров при взаимодействии.

Модель, более близкая к реальным физическим процессам, базируется на взаимодействии уже организованных кластеров — это ССА-модель (Cluster — Cluster Aggregation) [9]. В данной модели на начальной стадии частицы взаимодействуют между собой, двигаясь в пространстве по определённым траекториям, и с определённой вероятностью разлетаются или слипаются в кластеры. На ранних стадиях образуется большое число кластеров, далее они начинают объединяться в кластеры больших размеров. Следовательно, в процессе развития системы число кластеров уменьшается, а их размер при этом растёт. Очевидно, что кластеры, образованные по этой модели, обладают более рыхлой структурой в отличие от модели с диффузионно-лимитируемой агрегацией, так как при данном методе сборки образуется большее число труднозаполняемых пустот. Вероятность слипания частиц при взаимодействии в рассмотренных выше моделях близка к единице. Существует иная физическая ситуация, когда вероятность слипания частиц при взаимодействии мала. В этом случае увеличивается взаимопроникновение при кластер — кластерном взаимодействии, следовательно, образуется более компактный, плотный кластер.

Модель, описывающая взаимодействие кластеров с малым коэффициентом слипания, получила название RLCA-модель (Reaction Limited Cluster Aggregation) [10]. Стоит заметить, что в предельном случае свойства образуемого кластера нечувствительны к характеру движения ассоциирующих частиц.

В первых двух моделях считается, что ассоциирующие частицы совершают диффузионное движение в пространстве и длина свободного пробега меньше области, ответственной за рост кластера. Физически существует ситуация, при которой длина свободного побега частицы больше области прилипания. В этом случае модель модифицируется путём замены траектории на прямолинейную, что приводит к увеличению компактности кластера.

Приведённые модели отражают основные черты процесса роста фрактального кластера, описывая предельные физические ситуации. Некоторые модели объединяют различные предельные случаи. Например, для описания процесса роста кластера возможно объединение двух моделей — ССА и RLCA. В этой модели необратимый рост кластера моделируется путём модификации ССА-модели за счет введения энергии связи между частицами. Таким образом, соотношением характерных времён броуновского движения и времени разрыва связи между частицами изменяется характерная вероятность слипания частиц. Это влияет на структуру образующегося кластера. Переход между моделями ССА и RLCA осуществляется изменением указанного соотношения энергии связи между частицами [11].

Компьютерное моделирование позволяет отражать различные детали объекта. Это, в свою очередь, позволяет произвести оценку чувствительности структуры образуемой системы к различным факторам, существующим в реальной ситуации. Величина фрактальной размерности может характеризовать степень проникновения частицы в кластер. Чем больше частица проникает в кластер (происходит это при малой вероятности прилипания), тем выше становится величина фрактальной размерности данного кластера. Однако чувствительность данного метода оценки не очень велика [12]. Вращательная диффузия является фактором, влияющим на структуру образуемого кластера. При увеличении вращательной диффузии захват частицы или кластера может происходить краями кластера, соответственно, увеличивается фрактальная размерность кластера. В работе [13] исследовалось влияние вращательной диффузии на структуру образуемого кластера при взаимодействиях вида кластер – кластер и кластер – частица.

В случае кластер — кластерного взаимодействия структура образования зависит от изменения скорости диффузии, связанной с размерами кластеров в данный момент. Согласно работе [14], величина фрактальной размерности кластеров алюминия, кобальта, никеля, полученных при испарении данных металлов в атмосфере инертного газа, выше, чем при аналогичном испарении в вакууме. Более плотные образования в вакууме объясняются меньшей задержкой процесса формирования кластера, связанной с наличием инертного газа. В настоящее время экспериментальные исследования позволяют более подробно изучить и осмыслить RLCA-режим образования кластера.

Таким образом, компьютерное моделирование процесса образования фрактального кластера предоставляет возможность оценить влияние различных факторов на его структуру, что даёт полное представление о возможностях его структурирования в различных реальных ситуациях.

Связь фрактальных свойств поверхности с физико-механическими описывается в ряде работ, посвященных изучению процессов формирования полимерных покрытий, их свойств и морфологии [15–17]. Известны исследования фрактальной размерности поверхностей плазменно полимеризованных плёнок стирола и октаметилтрисилоксана и её связи с режимами полимеризации [15]; плёнок оксида титана при различных методах формирования и её связи с фотокаталитическими свойствами; тонких плёнок на основе Со и её связи с поверхностной энергией [16]. Корреляция между параметрами ионной бомбардировки углеродных плёнок и их фрактальными свойствами изучалась в работе [17]. В этих работах приводится большое количество способов реализации конкретных методов фрактального анализа, использующих в качестве данных профилограммы поверхностей [18], изображений растровой электронной микроскопии [15, 19], сканирующей зондовой микроскопии [16, 17].

В настоящей работе предлагается один из методов вычисления фрактальной размерности поверхностных микроструктур по цифровым изображениям. Применяемый для моделирования формирования фрактальной поверхности метод является разновидностью DLA-модели (Diffusion Limited Aggregation). Слипание частиц с кластером при хаотичном движении в пространстве зависит от коэффициента вероятности, задающегося изначально. С учётом формирования кластера в газоразрядной плазме с большим количеством активных частиц нами принято, что во всевозможных вариантах взаимодействия вероятность слипания равна 100 %. Движение частиц в модели происходит в направлении подложки с постоянной скоростью, не связанной с массой частицы. Высыпание частиц происходит по закону нормального случайного распределения по всей площади поверхности $(1 \times 1 \text{ мкм}^2)$. Выпадение частиц происходит последовательно, выпавшая частица появляется на расстоянии 500 нм над поверхностью и движется в сторону поверхности. Выпадение следующей частицы произойдёт только после того, как предыдущая выпавшая частица зафиксируется при контакте с поверхностью подложки или поверхностью другой частицы. Матрица радиусов выпадающих частиц состоит из N ячеек, заполняемых в зависимости от начального распределения. N — общее количество частиц, участвующих в заполнении поверхности, изменяется от 0 — в случае отсутствия частиц и, соответственно, неизменной поверхности, и до 1 · 10⁴ частиц заданного распределения размеров.

Наблюдение за процессом заполнения производится перпендикулярно поверхности. С визуальной точки зрения поверхность представляется либо свободной с выпадающими частицами (рис. 1, *a*), либо предварительно равномерно покрытой частицами минимального размера (1 нм) до полного заполнения подложки (рис. 1, *б*). В первом и втором случаях величины фрактальной размерности отличаются, причём варианты заполнения неодинаково чувствительны к равному изменению числа частиц.



Рис. 1. Варианты представления моделируемой поверхности (1000 × 1000 нм)

После формирования поверхности подобным образом по интересующим распределениям частиц производился фрактальный и статистический анализ полученного изображения.

Покрытия, сформированные экспериментально, анализировались с помощью оптического, силового — зондового и растрового электронного микроскопов (рис. 2), а результаты обрабатывались тем же методом, что и данные, полученные при моделировании для нахождения статистических распределений элементов и величин фрактальной размерности.

Программа статистического анализа по данным о структуре поверхности, полученным с помощью изображений растровой электронной, сканирующей зондовой и оптической микроскопии, анализирует границы «элемент — зерно», затем подсчитывает статистику распределения элементов по площадям. Далее по полученным данным строится график зависимости количества элементов поверхности от их размера.

Применяемые для исследования морфологии поверхности покрытий методы фрактального анализа в качестве исходных данных используют профилограммы поверхности изображений растровой электронной, сканирующей



Рис. 2. Примеры данных о реально синтезированных поверхностях: а — оптическая фотография получена при помощи микроскопа с цифровым фотоаппаратом; б — структура поверхности по данным силового — зондового микроскопа; в — изображение поверхности покрытия получена при помощи растрового электронного микроскопа

зондовой и оптической микроскопии. Полученные фрактальные размерности шероховатых или геометрически неоднородных поверхностей представляют собой количественную меру степени самоподобия структурных элементов различных размеров. Для их определения использовался достаточно простой в реализации метод, предложенный Мандельбротом. В соответствии с этим методом шероховатые поверхности разделяются горизонтальными плоскостями на различных уровнях, в результате чего в плоскости сечения появляются острова. Эти острова обладают суммарной площадью S и общим периметром L. График зависимости значения периметра L от значения площади A для множества уровневых сечений, построенный в логарифмических координатах, в идеальном случае имеет вид прямой линии. Из угла наклона этого графика к оси абсцисс α можно определить величину фрактальной размерности $D = 2(\Delta \ln L/\Delta \ln S) + 1$. Имея двумерное изображение шероховатой поверхности, где яркость точки определяет высоту этой точки над нулевым уровнем, можно достоверно принять это изображение за трёхмерное, рассматривая значение яркости как дополнительную координату. Задаваясь значением высоты уровня сечения, можно судить о периметре L по количеству точек с заданной яркостью и о площади S по количеству точек, яркость которых больше заданного значения. Предусмотрена возможность проведения фрактального анализа поверхности как по всей области цифрового изображения, так и на локальных её участках. Описанная программа прошла тестирование моделями фрактальных поверхностей, полученными с помощью стандартных изображений, размерность которых может быть рассчитана аналитически.

2. Моделирование заполнения поверхности частицами фиксированного размера. Для определения взаимосвязи фрактальных характеристик поверхности с распределением заполняющих элементов по размерам были смоделированы варианты заполнения частицами фиксированного размера диаметром 10, 100 и 300 нм. Данный вариант заполнения позволяет оценить влияние на фрактальные характеристики поверхности частиц разного размера. При этом рассматривались случаи, когда поверхность первоначально была свободной или полностью заполненной частицами диаметром 10 пикселей. Этот размер был принят нами как минимально возможный для приемлемого придания визуального объёма шарообразной частице в данной модели. Диаметр 10 пикселей условно соотнесён с величиной поверхности протяженностью 1 нм. Величина фрактальной размерности предварительно заполненной поверхности составила 2,68, а свободной поверхности, очевидно, равна двум. Количество выпадающих частиц изменялось в диапазоне от 10 до 10⁴ штук. Верхний предел данного диапазона выпадающих частиц позволяет достигать стабилизации фрактальных характеристик структуры поверхности при заполнении площади 1×1 мкм² частицами размерами $1 \div 300$ нм.

Кинетика изменения величины фрактальной размерности поверхности, формируемой заполнением частицами фиксированного размера, представлена на рис. 3. Изменение фрактальных характеристик чистой незаполненной поверхности (см. рис. 3, а) происходит даже при незначительных количествах выпавших частиц, в то время как заполненная мелкими частицами поверхность изменяет свои фрактальные характеристики (см. рис. 3, б) лишь при появлении небольшого числа частиц диаметром не менее 200 нм. Подобное поведение свойственно системам с различной степенью упорядоченности



Рис. 3. Фрактальная размерность поверхности, заполняемой частицами фиксированного размера в случае чистой поверхности (а), и поверхности, заполненной мелкими частицами (б). Цифры: 1–10 нм; 2–100 нм; 3–300 нм

элементов структуры, например кристаллическим решёткам. При появлении дефекта в структуре идеально упорядоченной системы её характеристики могут изменятся весьма существенно, в то же время подобное изменение не внесёт изменений в свойства системы, обладающей определённой степенью хаотичности, которой в нашем случае является поверхность, заполненная частицами.

При дальнейшем заполнении поверхности элементами фиксированного размера происходит стабилизация фрактальных характеристик. Количество частиц, необходимых для выхода на подобный режим, зависит прежде всего от площади поверхности заполняющих элементов и их распределения по поверхности. В случае выпадения крупных частиц (300 нм) стабилизация фрактальных характеристик наблюдается уже после первой сотни элементов, в то время как для мелких частиц (10 нм) элементов требуется в 1000 раз больше.

3. Моделирование заполнения частицами по заданному распределению. При моделировании исходные данные были выбраны в соответствии с распределениями, полученными в реальных условиях при помощи лазерных аэрозольных счетчиков. Методика исследования дисперсной фазы в объёме газоразрядного реактора при плазмохимической полимеризации подробно описана в [20]. Отметим, что измерения проводились в диапазоне размеров частиц 0,05 ÷ 1,5 мкм.

При экстраполировании распределения частиц до 10 нм на различных этапах роста были получены распределения макрочастиц для различных моментов времени после начала полимеризации. На рис. 4 представлены распределения, используемые при моделировании, они соответствуют реально зафиксированным над поверхностью электрода, фрактальная размерность которого была определена на основании данных оптической, растровой электронной и силовой зондовой микроскопии. Результаты определения фрактальных характеристик моделируемых и реально синтезированных поверхностей приведены в таблице.

4. Фрактальные характеристики реальной поверхности. Синтез полимерных плёнок в газовом разряде в парах фторорганических соединений проводится при трёх значениях плотностей тока (4,17; 2,87; 1,72 Å/m²) и давлении 80 Па. Поверхность образца исследовалась оптическим микроскопом для интервалов роста 100 секунд. Затем образцы изучались на растровом электронном микроскопе и фотографировались при 500-кратном увеличении. Данные представлены на рис. 5. Определённая таким образом закономерность демонстрирует однозначное влияние параметров разряда на структуру поверхности.



Рис. 4. Распределение частиц по размерам, используемым при моделировании. Цифры: 1-N-1; 2-N-2; 3-N-3;4-N-4



Рис. 5. Кинетика изменения величины фрактальной размерности полимерной плёнки при различных значениях плотности тока разряда: 1 - Dj(1); 2 - Dj(2); 3 - Dj(3)

Заключение. Наблюдаемое не очень значительное несоответствие экспериментальной и теоретической зависимостей изменения фрактальной размерности поверхности растущего полимера может быть связано с недостаточностью экспериментальных данных о концентрациях частиц размерами менее 100 нм, что обусловлено возможностями аппаратного контроля дисперсной фазы разряда.

Следует также учитывать, что при определении фрактальных характеристик поверхности реальных объектов принимается ряд допущений. Это вызвано спецификой регистрации состояния поверхности конкретным методом, сохранением полученной информации в определённом формате и спецификой алгоритма последующей обработки данных. Фактически, программно производится анализ матрицы данных, элементами которой являются для СТМ потенциалы, для РЭМ — интенсивность отраженных электронов, зафиксированная детектором, а для оптической отражающей микроскопии — интенсивность освещённости точки. Каждый элемент матрицы связывается с определённой точкой поверхности, а его значение принимается за третью координату в пространстве — высоту положения, несмотря на то, что однозначность такой закономерности не абсолютна. В случае регистрации псевдотрёхмерного изображения поверхности с помощью электронного микроскопа достоверность такого допущения можно оценить, определив коэффициент корре-

- pairiamine impairiepherinin medeunpjemen in beaminen nebehineeren				
Распределение	<i>D</i> моделируемой поверхности		<i>D</i> реальной поверхности	
N-1	2,74	$_{\pm 0,02}$	$2,\!67$	$\pm 0,04$
N-2	$2,\!63$	$\pm 0,02$	$2,\!65$	$\pm 0,03$
N-3	2,54	$\pm 0,02$	2,58	$\pm 0,03$
N-4	$2,\!47$	$\pm 0,02$	$2,\!49$	$\pm 0,02$

Фрактальные характеристики моделируемой и реальной поверхностей

ляции для нескольких снимков одной точки под различными углами (обычно $\pm 5^{\circ}$). При регистрации сканирующим туннельным микроскопом фиксируется туннельный ток между зондом и образцом, что позволяет получить информацию об истинном трёхмерном рельефе поверхности истинной топографии при условии однородности электрических свойств поверхности на резонансной частоте.

Разработанный метод моделирования, несмотря на указанные недостатки, позволяет установить изменение фрактальных характеристик поверхности при заполнении элементами по заданным распределениям размеров. Как показывает эксперимент (см. таблицу), определённые условия синтеза реальных плёнок находятся в хорошем согласовании с данными моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственные контракты №№ П808 и № П843).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Смирнов Б. М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991. 134 с.
- Михайлов Е. Ф., Власенко С. С. Образование фрактальных структур в газовой фазе // УФН, 1995. — Т. 165, № 3. — С. 263–283.
- 3. *Федер Е.* Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
- Hassan M. K. Fractal dimension and degree of order in sequential deposition of mixture // Phys. Rev. E, 1997. — Vol. 55, No. 5. — P. 5302–5310.
- Zhang J.-Z., Ye X.-Y., Yang X.-J., Liu D. Structural characteristics of fractal clusters grown during vapor-solid transformation // Phys. Rev. E, 1997. — Vol. 55, No. 5. — P. 5796– 5799.
- Smirnov B. M. The properties of fractal clusters // Phys. Repts., 1990. Vol. 188, No. 1. P. 1–78.
- Vandewalle N., Ausloss M. Construction and properties of fractal trees with tunable dimension: The interplay of geometry and physics // Phys. Rev. E, 1997. — Vol. 55, No. 1. — P. 94–98.
- 8. *Milošević S., Živić I., Miljković V.* Adsorption of linear polymers on impenetrable fractal boundaries of checkerboard fractal lattices // *Phys. Rev. E*, 1997. Vol. 55, No. 5. P. 5671–5679.
- 9. Meakin P., Wasserman Z. R. Some universality properties associated with the clustercluster aggregation model // Phys. Lett. A, 1984. — Vol. 103, No. 6–7. — P. 337–341.
- Kolb M., Jullien R. Chemically limited versus diffusion limited aggregation // J. Physique Lett., 1984. — Vol. 45, No. 20. — P. 997–981.
- 11. Meakin P. Structure of the active zone in diffusion-limited aggregation, cluster-cluster aggregation, and the screened-growth model // Phys. Rev. A, 1985. Vol. 32, No. 1. P. 453–459.
- 12. Акимов И.А. Фотоколориметрия и спектральные методы анализа / В сб.: Оптика и спектроскопия. М.: Наука, 1988. Т. 63. С. 1276–1281.
- 13. Meakin P. The effects of rotational diffusion on the fractal dimensionality of structures formed by cluster-cluster aggregation // J. Chem. Phys., 1984. Vol. 81, No. 10. P. 4637–4639.
- Dale W. S., James E.M., Pierre W., David S. C. Fractal geometry of colloidal aggregates // Phys. Rev. Lett., 1984. — Vol. 52, No. 26. — P. 2371–2374.
- 15. Зынь В. И., Молчатский С. Л. Исследование фрактальной структуры поверхности полимерных плёнок стирола и октаметилтрисилоксана // Поверхность, 1999. — № 4. — С. 66–69.
- Li J. M., Lu L., Su Y., Lai M.O. Self-affine nature of thin film surface // Applied Surface Science, 2000. — Vol. 161, No. 1–2. — P. 187–193.
- Durand H. A., Sekine K., Etoh K., Kataoka I. Effect of energy on direct ion beam deposition of carbon thin films: induced defects and graphitization // Surface and Coatings Technology, 2000. — Vol. 125, No. 1–3. — P. 57–60.
- Бородич Ф. М., Онищекно Д. А. Фрактальная шероховатость в задачах контакта и трения (простейшие модели) // Трение и износ, 1993. — Т. 14, № 3. — С. 37–39.

- Кульков С. Н. Применение фрактального подхода для триботехнического анализа // Трение и износ, 1997. — Т. 18, № 6. — С. 761–765.
- 20. Штеренберг А. М. Макрокинетика формирования дисперсной фазы в газоразрядных системах. Самара: СамГТУ, 1997. 192 с.

Поступила в редакцию 02/IX/2010; в окончательном варианте — 06/X/2010.

MSC: 28A80

SIMULATION OF FRACTAL SURFACE OF FILMS FORMED BY POLYMERIZATION IN GAS DISCHARGE

A. A. Safonov, A. M. Shterenberg

Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia. E-mail: alsaj@samtel.ru

The paper describes a technique for modeling the structure of surfaces of polymers synthesized by plasma vapor deposition (polymerization). The method is realized by using computer technology and allows to simulate geometry of the surfaces for a given initial distribution of structural elements and to calculate the fractal dimension of the model. The fractal characteristics of surfaces of polymers experimentally synthesized in the discharge of fluorine and silicone monomers are found.

Key words: fractal surface, modeling fractals, discharge polymerization.

Original article submitted 02/IX/2010; revision submitted 06/X/2010.

Alexander A. Safonov, Engineer, Dept. of General Physics. Alexander M. Shterenberg ((Dr. Sci (Phys. & Math.)), Head of Dept., Dept. of General Physics.