

Индекс 72674

ФИЗИКА
ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ

2 '2000
ТОМ 3

ФИЗИКА ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Периодический теоретический и научно-практический журнал

Том 3, № 2, 2000

Учредитель журнала:

Самарский государственный университет

Соучредитель журнала:

Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики

Главный редактор: Г.П.Яровой

Зам. главного редактора: В.А.Неганов

Редакционная коллегия:

А.Н.Волобуев (Самара), Ю.П.Воропаев (Минск), А.Г.Глущенко (Самара),
В.В.Зайцев (Самара), С.А.Горбатков (Уфа), Ю.В.Егоров (Санкт-Петербург),
Г.А.Кузаев (Москва), А.Г.Кюркчан (Москва), Г.С.Макеева (Пенза),
В.П.Моденов (Москва), Е.И.Нефедов (Москва), Ю.Б.Нечаев (Воронеж),
А.Г.Онищук (Минск), Ю.В.Пименов (Москва), А.И.Пихтелев (Нижний Новгород),
В.Л.Просвирнин (Харьков), С.Б.Раевский (Нижний Новгород),
И.П.Руденок (Волгоград), Д.А.Усанов (Саратов), С.И.Эминов (Новгород),
В.В.Яцышен (Волгоград), А.А.Яшин (Тула)

Ответственный секретарь: И.В.Матвеев

Выпускающий редактор: Л.В.Крылова

Корректор: Н.А.Вольнкина

Компьютерный набор и верстка: О.А.Кузьмин

Адрес редакции: 443010, Самара, ул.Л.Толстого, 23,

Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики, к.328

Телефон (8462) 32-58-53 Факс (8462) 32-58-53

e-mail: _neganov_@mail.ru, physic@ssu.samara.ru

Адрес издателя: 443011, Самара, ул. Ак.Павлова, 1,

Самарский государственный университет

Издательство «Самарский университет», к.311 (физ.)

Телефон (8462) 34-54-23 Факс (8462) 34-54-17

Издается с 1998 г. Выходит 4 раза в год.

ПИ №77-3343 от 28.04.2000 выдано Министерством Российской Федерации

по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

© Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2000

Л.Р. №020316 от 4.12.96 г. Подписано в печать 31.07.2000.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,76. Уч. - изд. л. 10,5. Цена свободная.

Тираж 300 экз. Заказ № 1683

ОАО «ПО СамВен», 443099, Самара, ул.Венцека, 60

Исследование оптических и механических свойств плёнок на основе углерода (управление процессами нанесения плёнок).

Часть 2

*Д.П. Николаев**

Целью работы является обоснование эффективности технологии нанесения пленок на основе углерода, титана, никеля, ванадия, вольфрама, карбида кремния в различных электронных приборах и устройствах.

Экспериментально исследованы механические, физические, оптические характеристики пленок. Показано, что, меняя состав плазмообразующей среды, величину вакуума и другие составляющие, можно управлять процессом осаждения пленок, добиваясь требуемых параметров.

Введение

Развитие современной электронной техники, микроэлектроники, оптики, устройств СВЧ и КВЧ потребовало применения пленок, полученных в плазменной среде на основе углерода, титана, никеля, ванадия, вольфрама, карбида кремния, обладающих комплексом специфических свойств: адгезионная стойкость, температурная устойчивость, прочность, твердость, износостойкость, величина внутренних напряжений, физическая и химическая устойчивость, стабильные оптические параметры и др.

Методом плазменной технологии в вакууме могут быть решены следующие задачи: получение особо чистых слоев материалов со специальными свойствами (магнитные, оптические, эмиссионные, сверхпроводящие слои); изменение структурно-энергетического состояния поверхности материалов (упрочнение поверхности, ионное легирование полупроводников); получение пленочных монокристаллических структур.

Плазменный метод нанесения покрытий имеет ряд преимуществ: покрытия имеют плотную и однородную структуру, это объясняется высокой кинетической энергией, сообщаемой частицами напыляемого материала в плазменной струе; плазменным методом можно плавить и распылять все известные тугоплавкие вещества и химические соединения (металлы, керамику, карбиды, оксиды, керметы), плазменное пламя имеет температуру значительно более высокую, чем химическое (например, вольфрам можно наносить только плазменным методом); применение бескислородных газовых смесей уменьшает окисление распыляемых материалов; покрытия можно на-

носить на подложки из любого материала; в широких пределах можно регулировать толщину и свойства покрытий, наносимых из одного и того же материала (например, на основе оксида циркония можно получить мягкое покрытие, являющееся хорошим теплоизолятором, и твердое с высоким сопротивлением на износ и эрозию).

Качество плазменных покрытий зависит от ряда технологических факторов: формы и размеров сопла плазменной горелки, потребляемой мощности, вида и расхода плазмообразующего газа, скорости подачи напыляемого материала, угла напыления и расстояния сопла от обрабатываемой поверхности, температуры подложки, на которую наносится покрытие, и т. д.

Особенности плазменной технологии получения пленок

Технологическое применение плазменного нанесения покрытий особенно актуально для тугоплавких материалов, окислов и нитридов. В работе рассматриваются экспериментальные исследования получения пленок вакуумно-дуговым методом плазменными ускорителями и магнетронными установками.

Вакуумно-дуговой метод позволяет наносить металлические и диэлектрические покрытия с заранее заданными свойствами, здесь применяются плазменные ускорители (ПУ), в которых используются вакуумная дуга - сильноточный низковольтный разряд зажигается в глубоком вакууме и развивается в парах материала эрозирующего электрода. Эрозирующий электрод обычно катод, материал которого при плазменном распылении образует покрытие на деталях, находящихся на аноде.

Вакуум является рабочей средой плазменного ускорителя, необходимой для зажигания дугового разряда и предотвращения окисления металлов и сплавов, способствует удалению (термическому разложению, испарению и возгонке) летучих примесей и дегазации покрытия. В плазменных ускорителях удается получить потоки частиц со скоростями до сотни километров в секунду и энергиями до десятков тысяч электрон-вольт, а это позволяет проводить тех-

* г.Москва, Московский государственный институт
электроники и математики

нологические процессы, основанные на испарении поверхностных слоев материалов, конденсации атомарных частиц на поверхность деталей, внедрении атомов вглубь кристаллической решетки, имплантации ионов нужного вида. Вакуумно-дуговой метод нанесения покрытий имеет следующие преимущества: возможность наносить пленки из любых электропроводящих материалов, из которых изготовлен катод плазменного ускорителя, используя составные катоды или несколько катодов из различных материалов, в том числе тугоплавких, можно получать пленки любого сложного состава; получать пленки сверхвысокой частоты, это объясняется проведением процесса в глубоком чистом вакууме; возможность получения сплошных бездефектных пленок даже при малых толщинах - это объясняется высокой степенью ионизации плазменного потока, что способствует агрегации зародышей на подложке; возможность получения изолирующих пленок; оксидных, нитридных, карбидных пленок с требуемой стехиометрией - путем регулирования давления реактивных газов (кислород, азот, углеродосодержащие) внутри вакуумной камеры в диапазоне давлений $1... 10^{-4}$ Па.

При выборе напыляемого материала следует учитывать его физические свойства: молекулярный вес, температуру плавления частиц, вязкость, сыпучесть, теплоемкость, температурный коэффициент, теплоту плавления.

Для каждого материала определена оптимальная пороговая сила тока разряда: при токе, меньшем порогового, дуговой разряд переходит в диффузионный; при токе, превышающем пороговое значение, возрастает содержание микрокапельной фазы в продуктах эрозии катода и ухудшается качество тонких пленок.

В данной работе нами широко использовалась установка распыления магнетронного типа «ОРАТОРИЯ».

Магнетронная установка распыления имеет диодную конструкцию, и в ней используются скрещенные электрическое и магнитное поля, образуемые источником питания и системой постоянных магнитов.

При давлении рабочего газа $1.3... 6.6 \cdot 10^{-1}$ Па между мишенью-катодом и анодом зажигается тлеющий электрический разряд. При ионной бомбардировке катода-мишени происходит эмиссия электронов. На электроны, испускаемые катодом, воздействуют одновременно электрическое и магнитное поля: электрическое поле ускоряет электроны, которые ионизируют атомы рабочего газа и поддерживают горение разряда; поперечное магнитное поле отклоняет электроны и заставляет их двигаться по сложным циклоидальным траекториям. При этом электроны оказываются как бы в ловушке; с одной стороны, маг-

нитное поле возвращает их на катод; с другой стороны - поверхность катода отталкивает эти электроны за счет электрических сил отталкивания одноименных зарядов.

Это вызывает дрейф и циркуляцию электронов между катодом и анодом, что способствует усилению процесса ионизации и повышению концентрации ионов у поверхности мишени-катода. Поперечное магнитное поле воздействует на плазму разряда и локализует ее вблизи поверхности мишени. Повышение концентрации ионов вблизи мишени позволяет бомбардировать мишень более интенсивными ионными потоками, чем в обычных диодных системах, что способствует увеличению скорости распыления мишени - зона интенсивного распыления - и образованию пленки на подложке.

Движение заряженных частиц в плазме, на которую наложены неоднородные электрические и магнитные поля, складывается из направленного, диффузирующего и дрейфового перемещений заряженных частиц, а также циклотронного вращения.

Циклотронное вращение заряженных частиц плазмы происходит в плоскости, нормальной магнитному полю. Это вращение характеризуется циклотронной частотой $\omega = eZB / m$ и радиусом вращения $r = v_{\perp} / \omega$, где e, Z - заряды электрона и иона; B - индукция магнитного поля; m - масса частиц; v_{\perp} - составляющая скорости перемещения частиц в направлении, нормальном силовым линиям магнитного поля.

Дрейф заряженной частицы в направлении, нормальном электрическому и магнитным полям, характеризуется скоростью дрейфа $v_g = E / B$, где E - напряженность электрического поля.

В однородном магнитном и электрическом полях траектория движения заряженной частицы будет циклоидной, высота которой равна двум радиусам вращения $h_{\perp} = 2mE / eZB$.

Однако в магнетронных установках магнитное и электрическое поля неоднородны - это приводит к возникновению побочных дрейфовых движений, в частности центробежного и градиентного.

Эти побочные движения вызывают разделение частиц по величине их зарядов и массе и, соответственно, искажение циклоидальной траектории.

Вследствие неоднородности магнитного и электрического полей плазма принимает форму, близкую к кольцевой, и располагается непосредственно у поверхности распыляемой мишени.

Скорость v роста толщины пленки на подложке линейно зависит от подводимой мощности P . Наиболее интенсивное распыление мишени наблюдается в центральной части, где плазма имеет самую большую плотность, для обеспечения равномерной

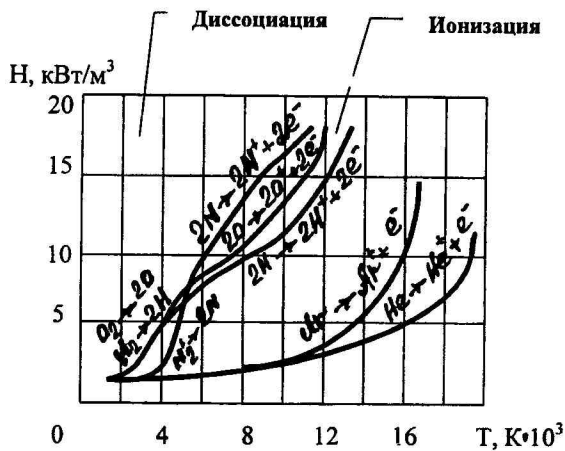


Рис. 1

толщины покрытий применяются различные способы: подбор оптимальной геометрии мишени; создание нескольких зон распыления; линейное перемещение подложек с использованием специальных профилированных экранов и программного управления.

Энтальпия плазмы при нанесении тонких пленок

Энтальпия плазмы является главной энергетической характеристикой плазменной струи и зависит как от температуры, так и от рода применяемого плазмообразующего газа.

На рис. 1 показано, что энтальпия H monoатомных газов увеличивается с повышением температуры благодаря повышению энергии теплового движения атомов газа и их ионизации. У молекулярных газов в процессе нагрева энтальпия даже при сравнительно невысоких температурах резко возрастает за счет процесса *диссоциации*, а затем уже начинается повышение энтальпии за счет *ионизации*. Поэтому для технологических процессов, когда не нужны очень высокие температуры (свыше 10^4 К), в качестве плазмообразующих газов целесообразно использовать азот, водород, кислород, воздух. Для получения более высоких температур применяется плазма одноатомных газов (аргона, гелия).

На энтальпию плазменного потока сильно влияет расход плазмообразующего газа, увеличение расхода газа приводит к снижению эффективности теплопередачи от частотного или высокочастотного разряда к газовому катоду, и энтальпия газа уменьшается.

В данной работе для регулирования энтальпии плазмы использовались газы: аргон + гелий, аргон + водород с различными энтальпийными характеристиками. Водород обладает высокими удельными значениями энтальпии, но его применение в чистом виде приводит к быстрому разрушению электродов.

В технологии напыления пленок на основе углерода, титана, молибдена использовалась водородно-

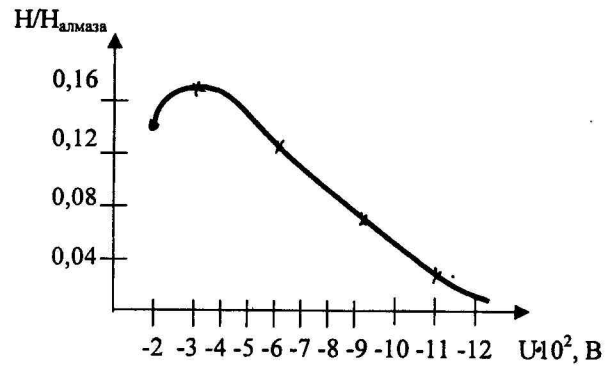


Рис. 2

аргоновая и водородно-азотная смеси, в которых объемное содержание водорода составляет 10... 25%.

Твердость, коэффициент трения, износостойкость

Для углеродных пленок, выступающих в качестве защитных покрытий от сил трения, твердость представляется одним из наиболее важных свойств заданного материала.

В общем случае большая твердость является следствием большой энергии когезии (сцепления) коротких межатомных ковалентных связей. Одновременно твердость материала изменяется в зависимости от микроструктуры, т.е. наличия микропустот, примесей и др. [7. 1]. Твердость углеродных пленок в зависимости от условий получения изменяется в пределах 150 ... 9000 кгс/мм² по Виккерсу [17, 19], причем как и в случае внутренних напряжений основное влияние на твердость оказывает энергия осаждающихся ионов. Твердость углеродных и титановых пленок увеличивается с увеличением потенциала подложки. Зависимость твердости $a-C:H$ пленок от напряжения смещения приведена на рис. 2. Нетрудно видеть, что при оптимальных значениях напряжения смещения можно достичь максимальной твердости [1].

А это еще раз подтверждает предположение, что алмазоподобные свойства имеют место во многом благодаря ударам энергонасыщенных ионов о нарастающий слой пленки.

Углеродные пленки, полученные из углеводородной плазмы в вакууме, становятся тверже при добавлении инертного газа, что является следствием усиления ионной обработки поверхности растущей пленки. Одновременно увеличение концентрации водорода в рабочей смеси ведет к уменьшению твердости пленки. Зависимость твердости от полной концентрации водорода в $a-C:H$ пленках, полученных в А - ВЧ+СВЧ разрядах из смеси $CH_4 + H_2$; В - ВЧ

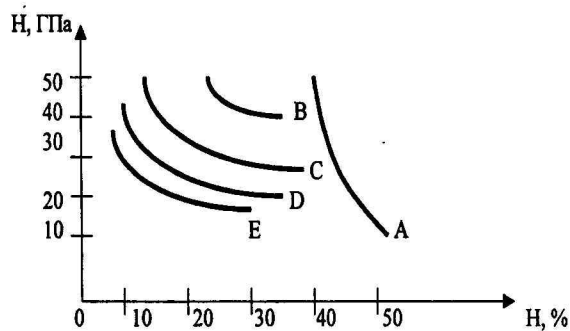


Рис. 3

разряде из CH_4 ; C - ВЧ+СВЧ разрядах из CH_4 ; D - ВЧ - разряде из смеси $CH_4 + Ar$ и E - ВЧ+СВЧ разрядах из смеси $CH_4 + Ar$, показана на рис. 3

На рис. 4 показано влияние состава газовой смеси ($CH_4 + Ar$) на плотность ρ и микротвердость H для a -C:H пленок, полученных в ВЧ - а и СВЧ - б плазме. Твердость имеет максимальное значение тогда, когда концентрация аргона в газовой смеси лежит в интервале 20 ... 40%, как для ВЧ, так и для СВЧ-разрядов. В то же время плотность пленок возрастает с увеличением доли аргона (Ar). Полагают, что рост твердости при увеличении концентрации Ar от 0 до 40% связан как с увеличением эффективности диссоциации CH_4 , так и с травлением инородной компоненты. Уменьшение твердости при концентрации Ar > 40% является следствием графитизации пленок, что подтверждено исследованиями ИК - спектра.

Таким образом, следует вывод, что между твердостью, оптическими свойствами и внутренними напряжениями существует определенная взаимосвязь, которая является следствием общих причин, ответственных как за величины внутренних напряжений и твердости, так и за оптические свойства. Этот важный вывод во многом является объяснением существующих проблем с практическим использованием углеродных пленок, так как наилучшей комбинацией оптических и механических свойств обладают те пленки, которые имеют наивысшие внутренние напряжения, что сразу ограничивает круг подложек и толщину покрытия. Более подробно эти вопросы рассматриваются ниже.

Углеродные пленки, приготовленные в тлеющем разряде, обладают очень низким коэффициентом трения μ . Коэффициент трения между a -C:H пленкой и стальным шариком сильно зависит от относительной влажности атмосферы, в которой проводится тест. Зависимость коэффициента трения между пленкой и сталью от относительной влажности приведена на рис. 5.

При влажности приблизительно до 1% получается очень низкое значение коэффициента трения —

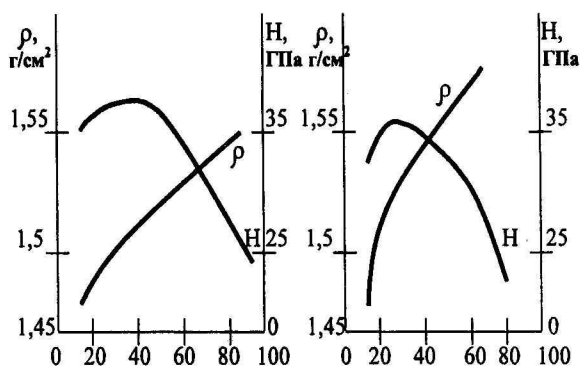


Рис. 4

0.01... 0.02. При относительной влажности выше 75% коэффициент трения быстро возрастает и может превышать 0.25.

Такое поведение коэффициента трения алмазоподобных пленок прямо противоположно поведению коэффициента трения в случае графитных пленок, когда он велик даже при низкой влажности и пленка быстро испаряется. В то же время это напоминает алмаз, с той лишь разницей, что у алмаза коэффициент трения не зависит от влажности и остается меньше 0.07 даже при влажности, приближающейся к 100%. Трение между углеродными пленками и алмазом менее чувствительно к влажности [17, 20].

Так как скорость изнашивания (как абразивного, так и адгезионного) покрытий в основном обратно пропорциональна твердости, то высокая твердость есть основное свойство покрытия, необходимое для предотвращения изнашивания. Наиболее удобно измерять износостойкость покрытия, подвергая эту поверхность регулируемому абразивному действию износа и измеряя при этом скорость удаления материала.

Метод был применен при изучении износостойкости тонких гидрогенизированных и негидрогенизированных аморфных пленок [20]. Здесь имеется в виду присоединение водорода к химическим элементам под влиянием катализаторов. Устойчивость к абразивному изнашиванию алмазоподобных пленок коррелирует с прочностью межатомных связей этих материалов и уменьшается в ряду углерод- a -Si Ge-кремний-германий. Скорость изнашивания всех этих пленок в обязательном порядке зависит от количества связанного водорода, включенного в структуру пленки в процессе осаждения.

Связи с водородом уменьшают степень поперечности структуры. Включение водорода в пленки коррелирует с хорошо выраженным и обязательным увеличением скорости износа. То есть когда концентрация связанного водорода повышена в аморфных пленках, то износостойкость более интенсивная, а отсутствие связанного водорода сопровождается менее интенсивным износом.

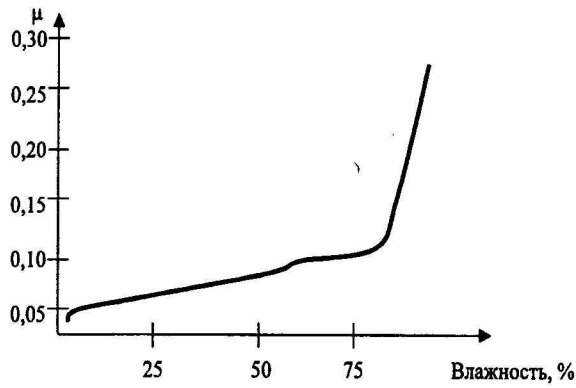


Рис. 5

Внутренние напряжения

Внутренние напряжения во многом определяют стабильность работы системы подложка-покрытие и, следовательно, срок её службы, поскольку она может растрескаться, расслоиться и подвергнуться изгибу задолго до эксплуатационного периода использования.

Суммарные внутренние напряжения в покрытии складываются из следующих факторов: а) напряжений, являющихся результатом различных значений констант решётки подложки и покрытия; б) напряжений, возникающих из-за структурных изменений в объёме растущей плёнки; в) напряжений, вызванных внедрением в покрытие примесей, не входящих в структуру пространственной решётки (для углеродных плёнок - несвязанный водород и молекулы инертного газа, используемые при осаждении); г) напряжений, связанных с различными тепловыми коэффициентами расширения плёнки и подложки; д) напряжений, связанных с различными коэффициентами линейного и объёмного расширений плёнки и подложки.

Общие напряжения в плёнках, которые можно измерить по изгибу подложки, зависят от толщины плёнки. Тонкие плёнки, имеющие внутренние напряжения, могут держаться на подложке только до определённой физической толщины, при которой их внутренние напряжения не превосходят либо сил когезии, либо сил адгезии, связывающих плёнку с подложкой. В первом случае происходит растрескивание слоя, а во втором - отслаивание плёнки.

Возникновение напряжений зависит от микроструктуры осаждённого материала, так как на основе пористой структуры не могут возникнуть сильные напряжения. Причиной внутренних напряжений может быть любой механизм, затрудняющий перегруппировку атомов. Так, включение в структуру плёнки инородных частиц может играть главную роль в сохранении напряжений. На величину и знак

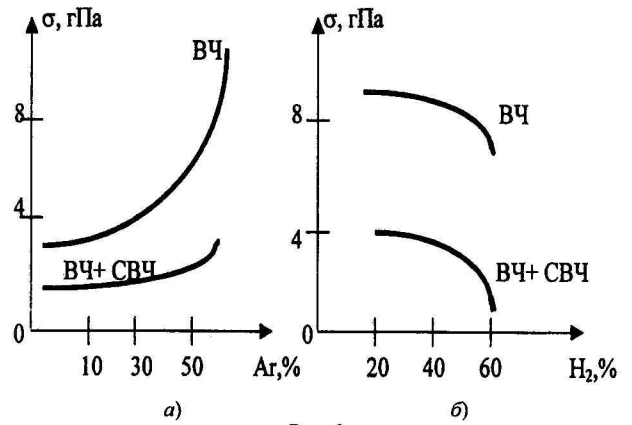


Рис. 6

внутренних напряжений в углеродных, титановых и карбидокремниевых плёнках влияют все технологические параметры, среди которых наиболее важным является метод получения, состав газовой смеси, скорость осаждения, угол падения пучка, наличие остаточного газа, а также температура, при которой осуществляется осаждение, и другие факторы.

Наиболее вероятной причиной возникновения напряжений сжатия в углеводородных плёнках, полученных в тлеющем разряде, считается включение в плёнку примесей (аргона и водорода) [15, 17]. Большие напряжения сжатия наблюдались в углеродных плёнках, приготовленных методом испарения электронным пучком, дуговым испарением, а также методом осаждения ионного пучка из паров бензола. В случае α -C:H плёнок, приготовленных в тлеющем разряде на постоянном токе из ацетилена, напряжения сжатия настолько велики, что невозможно получить плёнки толщиной более 1 мкм, что вполне приемлемо с целью получения особо тонких плёнок для наноприборов. При этом наибольшие напряжения наблюдаются в углеродных плёнках, которые по своим свойствам можно отнести к классу гидрогенизированных. Увеличение доли графитоподобной и полимероподобной составляющих ведёт к уменьшению внутренних напряжений. Что касается напряжений растяжения, то они обычно развиваются в условиях низкой подвижности осаждающихся частиц на поверхности растущей плёнки, т. е. при условиях, типичных для формирования полимероподобных плёнок (небольшое напряжение смещения и высокое рабочее давление, а следовательно, отсутствие ионной обработки растущей поверхности). Зависимость внутренних напряжений от концентрации Ar а) и H₂ б) в CH_x для α -C:H плёнок, полученных в ВЧ и ВЧ+СВЧ разрядах показана на рис. 6.

Способность полученных из углеродной плазмы плёнок захватывать в себя рабочий газ является одной из основных причин возникновения в них внутренних напряжений. Так, например, добавление Ar

к CH_4 увеличивало напряжение сжатия в плёнках (рис. 6а [16, 18]). Содержание аргона в слоях для разных технологических условий изменялось от 0,3 ... 3%.

В то же время добавление H_2 к CH_4 ведёт к уменьшению внутренних напряжений (рис. 6б). Это коррелирует с увеличением доли связанного водорода, как было обнаружено при исследовании ИК-спектров. Важно отметить, что более высокое значение s , наблюдаемое у плёнок, приготовленных в ВЧ-разряде, по сравнению с плёнками, полученными в ВЧ+СВЧ-разряде, было результатом более высокой концентрации связанного водорода в плёнках. Этот факт является результатом высокой эффективности СВЧ-разряда и интенсивности потока на подложку, увеличивающую подвижность осажденных частиц, что способствует релаксации внутренних напряжений.

Напряжения сжатия в углеродных плёнках могут вызывать расслоение покрытия, что проявляется в появлении волнистых морщин с отчетливой формой и шириной, являющихся результатом отслаивания плёнки от подложки [16, 17]. При этом на появление морщин, помимо толщины покрытия, существенное влияние оказывают и другие факторы, среди которых наиболее важным является равномерность покрытия по толщине и газовая атмосфера. Так, например, когда плёнки с равномерной толщиной наносились особенно тщательно, со строгим соблюдением технологии по толщине плёнки, морщины появлялись при толщине более 300 нм, а когда толщина плёнки была не одинаковой, морщины появлялись уже при толщине плёнки приблизительно 50 нм. Размеры морщин имеют тенденцию к росту при увеличении толщины плёнки. Однако образование морщин в углеродных плёнках зависит не только от её толщины, но и от газовой атмосферы, в которой находится плёнка. Пока плёнка находится в вакууме, морщины не появляются даже при толщине 500 нм. Но на воздухе морщины начинают появляться уже при толщине плёнки 100 нм [16]. По всей видимости, это результат того, что атомы газа диффундируют к поверхности раздела подложка-покрытие, уменьшая при этом адгезию и вызывая появление морщин. Обычно развитие морщин начинается через некоторое время после пребывания плёнки на воздухе при атмосферном давлении и сильно ускоряется при высокой влажности.

Важно отметить связь между внутренним напряжением и коэффициентом преломления $a-C:H$ [16, 17]. $a-C:H$ плёнки были получены в ВЧ-разряде из смеси метана и водорода при подаче дополнительного отрицательного смещения на подложку. Полученные результаты представлены на рис. 7 (корреляция между коэффициентом преломления и внут-

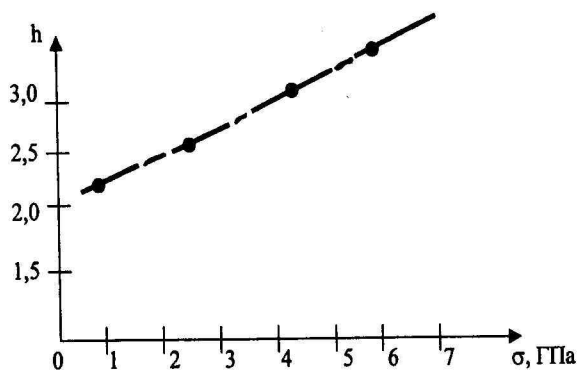


Рис. 7

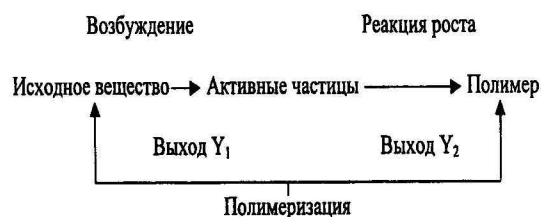
ренними напряжениями для плёнок, полученных в ВЧ-разряде из метана). Из рисунка видно, что рост внутренних напряжений в плёнке приводит к значительному увеличению коэффициента преломления. Вероятно, это связано с тем, что напряжения сжатия увеличивают оптическую плотность покрытия за счет плотности упаковки самой плёнки и как следствие уменьшение доли пар, так и вследствие увеличения плотности упаковки на атомном уровне.

Внутренние напряжения в плёнках на основе углерода главным образом определяются напряжениями, возникающими в объёме плёнки в процессе её синтеза, что вытекает из особенности технологии получения данных плёнок.

Исследования изгиба мягкой подложки при нанесении на неё тонкой полимерной плёнки показали:

1. Самоизгибание происходит всегда таким образом, что слой нанесённого из плазмы полимера оказывается на внешней, выгнутой стороне.
2. Изгибание плёнки-подложки происходит в процессе осаждения, т. е. в условиях, когда адсорбция влаги исключена.

В общем виде процесс полимеризации выражается следующей схемой:



В целом процесс образования полимера будем называть полимеризацией, а исходное вещество - мономером.

Почти все органические соединения независимо от их химической структуры могут полимеризоваться в плазме. Вклад в процессы полимеризации частиц, структура которых характеризуется наличием двойной связи, очень мал. Это означает, что реакции продолжения цепи с участием двойных связей не играют важной роли в механизме полимеризации. Сле-

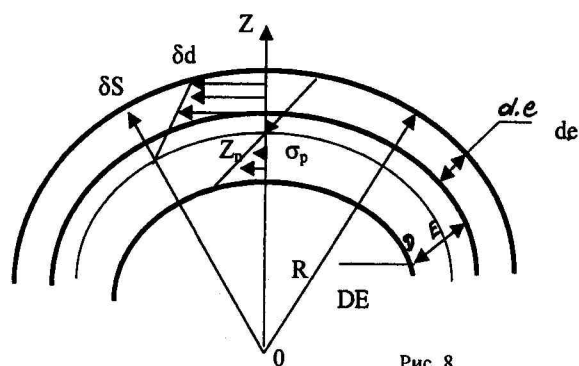


Рис. 8

довательно, полимеризация в плазме может быть хорошо описана быстрым ступенчатым механизмом полимеризации.

Бициклическая полимеризация в плазме соответствует процессам присоединения активных частиц к мономеру, однако кинетическая длина цепи в вакууме очень мала, и на практике эти реакции следует рассматривать как ступенчатые. Цикл 1 включает реакции активных частиц с одной свободной валентностью, а цикл 2 основан на реакции бирадикалов.

Но роль столкновений активных частиц с поверхностью в процессах полимеризации зависит от кинетической энергии падающих частиц и реакционной способности. Если оценивать этот эффект коэффициентом прилипания, то он увеличивается с ростом размера частиц и понижением температуры подложки. Считается, что осаждение происходит, когда падающая частица остаётся на поверхности в результате либо потери кинетической энергии, либо образования химической связи. Таким образом, в плазме полимеризация и осаждение - неразделимые этапы одного механизма. Образование активных частиц из мономера или промежуточных продуктов является процессом деструкции, происходящим путём разрыва связей, например C-H, C-F или C-C. Следовательно, глубина протекания этой стадии до начала осаждения будет влиять на природу полимера. На рис. 8 показана схема композиционной плёнки, изогнутой под действием внутреннего напряжения δS в тонком слое полимера, осажденного в плазме на гибкую полимерную плёнку. Модуль Юнга подложки-плёнки толщиной D равен E , а соответствующие параметры полученного в плазме слоя обозначены через d и e . Если сохранить первоначальную форму подложки, то в нанесённом слое возникают «напряжения расширения» δS .

Эти напряжения порождают изгибающий момент, который уменьшается по мере деформации плёнки. Изгибание приводит к возникновению противоположно направленного момента напряжения в подложке толщиной D , то есть при $M_a + M_d = 0$, где M -

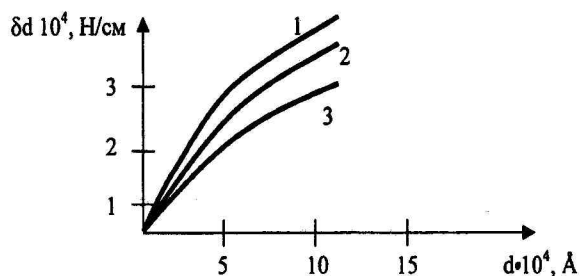


Рис. 9

момент относительно нейтральной оси, обозначенной на рис. 8 штриховой линией.

Второе условие равновесия - это равенство нулю суммарных напряжений в сечении, нормальном оси, поскольку внешние силы отсутствуют. Этих двух условий достаточно для расчета положения нейтральной оси и вывода уравнения, связывающего величину δS и радиус кривизны R покрытия. В упрощенном случае, когда $d \ll D$, а E и e - величины одного порядка, для δS можно записать выражение вида $\delta S = ED/\sigma Rd$.

Отнесённую к единице ширины плёнки силу, которая вызывает скручивание композиционной плёнки, можно рассчитать как произведение напряжения δS на толщину слоя d . Причём эта скручивающая сила увеличивается с увеличением толщины слоя d . Зависимость скручивающей силы δSd от толщины d полимерного покрытия, нанесённого в плазме на полимерную подложку, показана на рис. 9. Кривые 1 - 3 соответствуют слоям, полученным из следующих мономеров: 1 - пирродин; 2 - акрилонитрил; 3 - тиофен.

При небольших толщинах полимерного покрытия, осаждённого в плазме, скручивающая сила δSd линейно растёт с увеличением толщины, т. е. при таких условиях δS - постоянна. При увеличении толщины скручивающая сила перестаёт от неё линейно зависеть. В этой области δS уменьшается с ростом d - толщины. Вероятно, это связано с растрескиванием слоя, наблюдающимся для слоев относительно больших толщин, частично снимающие внутренние напряжения. Для слоев, описанных на рис. 9, уравнение для δS справедливо в области небольших толщин - от значений близких к нулю до 4000 \AA .

Внутренние напряжения в покрытиях зависят не только от химической природы мономера, но и от условий полимеризации в плазме. Зависимость внутренних напряжений от скорости осаждения полимеров иллюстрирует рис. 10. Как показано на рис. 10, при полимеризации ацетилена и акрилонитрила в плазме проявляется явная зависимость внутренних напряжений δS от скорости осаждения полимера на подложке.

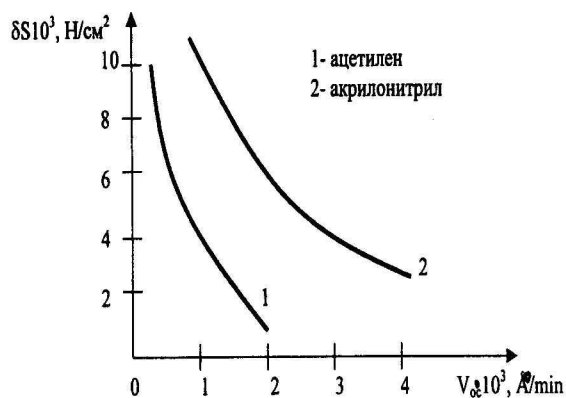


Рис. 10

Заклучение

Изложена концепция осаждения плёнок на основе углерода, титана, вольфрама, никеля, ванадия и других материалов, характерный размер которых по толщине можно получить в пределах 0.1 ... 5 мкм. Сущность концепции состоит в создании и отработке стабильной технологии нанесения плёнок в плазменной среде.

Проведены экспериментальные исследования по определению твёрдости коэффициента трения и износостойкости плёнок; внутренних напряжений, определяющих стабильность системы подложка-покрытие; коэффициента преломления и величины внутренних напряжений в плёнках, полученных в высокочастотных и сверхвысокочастотных разрядах.

Анализ совокупности исследований по полученным плёнкам из различных материалов позволяет сделать вывод, что использование процессов осаждения в плазменной среде становится эффективным в связи с уменьшением размеров активных элементов, проявлением улучшенных физических и химических свойств, значительным увеличением температурной стойкости. Обобщение рассмотренных в настоящей работе данных позволяет высказать предложение о возможности управления процессами нанесения плёнок на подложки различной геометрической формы; в целом это приводит к существенному снижению затрат на производство интегральных схем.

Литература

1. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. - М.: Мир, 1985.
2. Бакай А.С., Стрельницкий В.Е. Структурные и физические свойства углеродных конденсатов, полученных осаждением потоков быстрых частиц. - М.: Энергоиздат, 1984.
3. Васильев Ю.В. Тенденция развития технологии и аппаратуры химического осаждения тонких диэлектрических слоев на основе диоксида кремния в микроэлектронике. Часть 1-2 // Микроэлектроника. 1999. - Т.28. - №3. - С.175 - 192.
4. Горбатов Ю.Б., Вяткин А.Ф. Особенности травления и напыления материалов сфокусированным ионным пучком // Микроэлектроника. 1994. - Т.23. - Вып. 5.

5. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Ионное травление микроструктур. - М.: Сов. радио, 1979.
6. Данилин Б.С., Сыргин В.К. Магнетронные распылительные системы. - М.: Радио и связь, 1982.
7. Jshitani T., Ohnishi T. J. // Vac Sci Technol, 1991. - V.A9. - P.3084.
8. Корляков А.В., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Микроэлектромеханические структуры на основе композиции «карбид кремния-нитрид аммония» // Микроэлектроника. - Т.28. - №3. - С.201 - 212.
9. Кислов Н.А. Особенности формирования и тестирования в РПЭ самоподдерживающихся углеродных нанометровых структур // Известия Академии наук. Серия физическая. 1993. - Т.57(9). - С.30 - 37.
10. Касумов А.Ю., Кислов Н.А. и др. Новая концепция создания модельных элементов нанозлектроники // Микроэлектроника. - Т.23. - Вып. 5. - 1994.
11. Лиманов А.Б., Чубаренко В.А., Борисов В.М. Исследование плёнок кремния, полученных методом последовательного латерального роста (SLS) с использованием 3 кГц эксимерного лазера с ленточным пучком излучения // Микроэлектроника. 1999. - Т.28. - № 1. - С.30 - 39.
12. Лучинин В.В., Таиров Ю.М. Карбид кремния - перспективный материал электронной техники // Известия вузов. Электроника. 1997. - Вып. 1. - С.10 - 38.
13. Лучинин В.В., Мальцев П.П., Маляков Е.П. Карбид кремния - стратегический материал электроники будущего // Электроника, наука, технология, бизнес. 1977. - № 3 - 4. - С.61 - 64.
14. Лиманов А.Б., Гиваргизов Е.И. Лазерная зонная перекристаллизация тонких плёнок кремния: метод, структура, механизмы кристаллизации // Микроэлектроника. 1991. - Т.20. - №4. - С.356 - 369.
15. Николаев Д.П. Исследование оптических и механических свойств плёнок на основе углерода: Управление процессами напыления и осаждения плёнок // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 1999. - Т.2. - № 1. - С.45 - 52.
16. Лозовик Ю.Э., Попов А.М. Образование и рост наноструктур-фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов // Успехи физических наук. - Т.167. - №7.
17. Технология тонких пленок. Т.1 - 2 / Под. ред. Л.Майссела, Р.Глэнга. - М.: Советское радио, 1977.
18. Prewett P.D. Colloque de Physique, Colloque, 1989. - С 8 50. - P.179.
19. Федосеев Д.В. Алмаз в электронной технике. - М.: Энергоиздат, 1990.
20. Ясуда Х. Полимеризация в плазме. - М.: Мир, 1988.

Research of Optical and Mechanical Properties of Carbon Films (Controlling of Films Deposition Processes). Part II.

D.P.Nikolaev

The purpose of this work is the justification of the technology efficiency of carbon, titanium, nickel, vanadium, tungsten, silicon carbide films deposition in different electron apparatus and devices.

The mechanical, physical, optical characteristics of films are shown experimentally. It is shown, that changing a composition of the plasma making environment, value of vacuum and other components, it is possible to control the process of a sedimentation of films, achieving required parameters.

Содержание

Е.А.Вилков, Н.С.Шевяхов	СДВИГОВАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ВОЛНА НА ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЕ ФЕРРОМАГНЕТИКА	5
В.А.Неганов, О.В.Осипов	ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛОСКОГО ДВУХ- СЛОЙНОГО КИРАЛЬНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА.....	8
Р.В.Бударагин, А.А.Радионон	РАСЧЕТ ПЛАВНО НЕРЕГУЛЯРНОГО УЧАСТКА ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА	14
В.А.Калмык, Д.В.Тюрин, Г.И.Шишков	ДИФРАКЦИЯ ВОЛНЫ H_{10} ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕГОРОДКЕ С РЕЗИСТИВНОЙ ПЛЕНКОЙ	18
А.С.Арефьев, В.А.Неганов	МЕТОД ЧАСТИЧНОГО ОБРАЩЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПЕРАТОРА В ТЕОРИИ СВЯЗАННЫХ ЩЕЛЕВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ	21
Р.В.Бударагин, А.А.Радионон, А.А.Титаренко	РАСЧЕТ ПЛАВНЫХ ПЕРЕХОДОВ В КРУГЛОМ ЭКРАНИРОВАННОМ ВОЛНОВОДЕ	27
Д.А.Усанов, С.С.Горбатов, В.Е.Орлов, С.Б.Вениг	ПОЛОСОВЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРТОКЗАМКНУТОГО ВОЛНОВОДА. СОДЕРЖАЩЕГО ДИАФРАГМУ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ	30
В.М.Темнов, А.А.Титаренко	МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ И ПЛАВНЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ КВЧ И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНОВ	32
Г.С.Макеева	ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И МЕДЛЕННЫЕ ВОЛНЫ В АНИЗОТРОПНЫХ СТРУКТУРАХ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С НЕЛИНЕЙНЫМИ СЛОЯМИ И ВКЛЮЧЕНИЯМИ	39
Ю.П.Воропаев	ПРИНИМАЕМАЯ, ПОГЛОЩАЕМАЯ И РАССЕИВАЕМАЯ АНТЕННОЙ МОЩНОСТИ	45
А.Л.Бузов, Л.С.Казанский, М.А.Минкин, В.В.Юдин	РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ВБЛИЗИ СИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА МЕТОДОМ ОБОБЩЕННОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЦЕПИ	51
А.Я.Паринский, А.А.Яшин	МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УГЛОВОЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ КОГЕРЕНТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ В РАДИООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕЛЕНГАЦИИ НА ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ	54
Г.А.Кузаев	О ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КВАНТОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ТОПОЛОГИЧЕСКИ МОДУЛИРОВАННЫМИ СИГНАЛАМИ И КВАЗИОПТИЧЕСКИМИ СХЕМАМИ	57
В.Я.Хорольский, А.Б.Ершов	ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ..	61
В.В.Зайцев, С.В.Давыденко, О.В.Зайцев	ДИНАМИКА АВТОКОЛЕБАНИЙ ДИСКРЕТНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА ВАН ДЕР ПОЛЯ	64
Д.П.Николаев	ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА (УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ НАНЕСЕНИЯ ПЛЁНОК). ЧАСТЬ 2	68
А.М.Бобрешов, А.И.Лопатин	АНАЛИЗ ЭМС-ХАРАКТЕРИСТИК МШУ НА НЕМТ-ТРАНЗИСТОРАХ ..	76
Е.С.Палехова	РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-КОМПЬЮТЕРНОГО СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СТРЕЛБЫ ИЗ ЛУКА И АРБАЛЕТА	78

Contents

E.A.Vilkov, N.S.Shevyakhov	SHEAR SURFACE WAVE ON THE DOMAIN BOUNDARY OF FERROMAGNET	5
V.A.Neganov, O.V.Osipoff	ELECTRODYNAMIC ANALYSIS OF THE PLANE TWOLAYERED CHIRODIELECTRIC WAVEGUIDE	8
R.V.Budaragin, A.A.Radionov	CALCULATION OF THE SMOOTHLY NON-REGULAR SECTION OF A WAVEGUIDE CHANNEL	14
V.A.Kalmyk, D.V.Tyurin, G.I.Shishkov	DISPERSION OF A WAVE H_{10} IN RECTANGULAR WAVEGUIDE ON DIELECTRICAL PARTITION WITH RESISTIVE FILM	18
A.S.Arefiev, V.A.Neganov	THE INVESTIGATION OF EIGEN WAVES OF A COPLANAR TRANSMISSION LINE WITH USING THE METHOD OF A PARTIAL INVERSION OF AN OPERATOR	21
R.V.Budaragin, A.A.Radionov, A.A.Titarenko	ACCOUNT OF TAPERED TRANSITIONS IN ROUND SHIELDED WAVEGUIDE	27
D.A.Usanov, S.S.Gorbatov, V.E.Orlov, S.B.Wenig	THE BAND FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SHORT-CIRCUITED WAVEGUIDE WITH DIAPHRAGM OF INTRICATE SHAPE	30
V.M.Temnov, A.A.Titarenko	MODELLING OF MULTISTAGE AND SMOOTH TRANSITIONS FOR MICROWAVE AND OPTICAL DEVICES	32
G.S.Makeeva	ELECTROMAGNETIC AND SLOW WAVES IN MICROWAVE STRUCTURES AND ITS INTERACTION WITH NONLINEAR LAYERS AND INSERTIONS	39
Yu.P.Voropaev	POWER RECEIVED, ABSORBED AND SCATTERED BY THE ANTENNA	45
A.L.Buzov, L.S.Kazanskiy, M.A.Minkin, V.V.Judin	CALCULATION OF ENERGY FLOW DENSITY NEAR DIPOLE BY GENERALIZED EQUIVALENT CIRCUIT METHOD	51
A.Y. Parinsky, A.A.Vasin	MODELS AND ALGORITHMS ANGULAR FILTRATION OF HANDLING OF COHERENT WAVE BUNDLES IN RADIOOPTICAL SYSTEMS PELLINGATION ON THE PHASED LATTICES UTILISED	54
G.A.Kouzaev	ON A POSSIBILITY OF MODELING QUANTUM LOGICAL OPERATIONS WITH TOPOLOGICALLY MODULATED SIGNALS AND QUASIOPTICAL CIRCUITS	57
V. J.Khorolskiy, A B.Iershov	THE APPLICATION OF METHOD OF STATISTICAL LINEARIZATION WHILE INVESTIGATING STATISTICAL DINAMICS OF ELECTRIC SUPPLY SYSTEMS	61
V.V.Zaitsev, S.V.Dawydenko, O.V.Zaitsev	DYNAMIC OF SELF-OSCILLATIONS OF DISCRETE VAN DER POL OSCILLATOR	64
D.P.Nikolaev	RESEARCH OF OPTICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON FILMS (CONTROLLING OF FILMS DEPOSITION PROCESSES). PART II	68
A.M.Bobreshov, A.I.Lopatin	EMC ANALYSIS OF LNA ON HEMT'S	76
E.S.Palekhova	DEVELOPMENT ELECTRONIC OF A COMPUTER SPORTS COMPLEX FOR SHOOTINS FROM ARCHERY AND CROSSBOW ...	78

Многоуважаемые читатели и авторы журнала!

У Вас в руках особый номер журнала. На нем стоит центральный подписной индекс. Мы выполнили свое обещание: перешли от адресной доставки тиража к распространению журнала по центральной подписке. Подписаться на журнал «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» теперь Вы можете в любом пункте приема подписки. Найти его можно в каталоге, издаваемом агентством «Роспечать». Итак, журнал жив, он устоял в сложных финансовых условиях.

Что у нас в дальнейших планах? Редакция журнала совместно с Министерством общего и профессионального образования РФ, Институтом радиотехники и электроники РАН, Нижегородским государственным техническим университетом, Саратовским государственным университетом, Самарским государственным университетом, Поволжской государственной академией телекоммуникаций и информатики, Военной академией республики Беларусь, Радиоастрономическим институтом Национальной Академии наук Украины и другими учреждениями планирует проведение в сентябре 2001 года в Самаре I Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов».

Планируется организовать работу конференции по следующим секциям:

- общая теория волновых процессов;
- математические методы в теории волновых процессов;
- методы анализа и синтеза радиотехнических устройств и систем;
- передача и обработка информации в радиотехнических системах;
- радиотехнические устройства и системы;
- электродинамика СВЧ и КВЧ диапазонов;
- линии передачи с неоднородными, анизотропными, киральными и нелинейными средами;
- антенно-фидерные системы и распространение радиоволн;
- волновые процессы в медицинской и биологической физике.

Место проведения конференции - профилакторий «Искра», расположенный в зоне отдыха в черте города Самары, на берегу Волги. Профилакторий располагает одно- и двухместными номерами, имеются сауна, массажный салон. Традиционно предусматривается обширная культурно-спортивная программа, включая ознакомление с особенностями русской рыбалки на волжских островах.

Оргкомитет до **1 октября 2000 г.** проводит предварительный прием заявок на участие в конференции. Состав заявки:

- а) личная карточка участника (участников), оформленная произвольным образом и содержащая информацию о полном имени, учёной степени, звании, месте работы, должности, адресе и способах связи, объемом не более 0.5 стр., на отдельном листе для каждого из участников;
- б) тезисы доклада участника (до 1 стр.). **Обязательно приложение дискеты с текстом тезисов (формат Microsoft Word 7.0) и иллюстрациями к ним (формат TIFF). Анахронизмы в виде форматов ChiWriter, Lexicon и иже с ними НЕ ПРИНИМАЮТСЯ, поскольку организаторы не имеют возможности подготовить такие файлы к печати.**

Решение оргкомитета будет сообщено авторам при рассылке второго информационного письма в ноябре 2000 г., в котором будут определены точные условия участия в конференции (включая финансовую сторону). Будет приложена Программа конференции.

Переписку с оргкомитетом следует осуществлять по адресу:

443010, г.Самара, ул. Льва Толстого, 23, ПГАТИ, проф. Неганов В.А.

Телефон для оперативной связи: **(8462) 32-58-53.**

Заявки на участие в конференции можно также прислать по электронной почте: **physic@ssu.samara.ru** или **_neganov_@mail.ru**

Оргкомитет, учредители и организаторы желают Вам всего доброго и надеются видеть Вас в числе участников Конференции!