

К. ф.-м. н. В. И. ФАРЕНИК

Украина, г. Харьков, Науч. физ.-технологич. центр ХНУ им. В. Н. Каразина
E-mail: root@sptca.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
18.03 2002 г.

Оппонент к. т. н. В. И. БОСЬИЙ
("Сатурн-Микро", г. Киев)

ДИОДНЫЕ РЕАКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ МИКРОТРАВЛЕНИЯ*

Приведены результаты исследований характеристик высокочастотного емкостного разряда и разработки диодных реакторов установок микротравления с малым энергозатратом.

Внедрение методов плазменной обработки поверхностей твердых тел в пленочных и полупроводниковых технологиях промышленной микроэлектроники, в частности и в особенности, для обеспечения комплекса ключевых в производстве микроприборов процессов формирования топологического рисунка, в отечественной промышленности получило массовый характер с начала 80-х годов минувшего столетия.

Усилиями технологов отрасли и специалистов в области электронного машиностроения к середине 1980-х годов были разработаны установки плазменной обработки микроструктур серии УВН, УРМ, УРМЗ, ПХО, "Плазма". Удачными единичными образцами подобного оборудования являлись разработки НПО "Кристалл" (г. Киев), ЦКБ ПО "Донец" (г. Луганск).

Автором в составе группы ученых и специалистов созданной Минвузом УССР и Минэлектронпромом СССР при Харьковском государственном университете** отраслевой научно-исследовательской лаборатории диагностики плазменных технологических процессов (ОНИЛ ДПТП) были начаты в то же время плановые научно-исследовательские (а с 1983 г., после организации СКТБ "Контур", опытно-конструкторские) работы по таким направлениям:

— исследование и разработка диагностических методик и устройств контроля плазменных процессов в технологии полупроводниковых приборов;

— фундаментальные исследования физики процессов зажигания и горения разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях, ВЧ-емкостного (ВЧЕ), ВЧ-индукционного (ВЧИ) и пучково-плазменного разрядов;

— изучение промышленного ионно-плазменного оборудования с целью оптимизации и разработки перспективного технологического оборудования, в ча-

стности, новых типов ионных источников ионно-лучевой обработки материалов и нанесения покрытий, вакуумно-реакционных камер для процессов плазменной обработки на базе ВЧЕ- и ВЧИ-разрядов;

— исследование процессов взаимодействия плазмы и потоков заряженных частиц с поверхностями твердых тел, изучение влияния плазменной обработки на электрофизические параметры и структуру поверхности.

При выполнении этих работ сформировалось самостоятельное научно-техническое направление: разработка низкоэнергетических, с малыми затратами рабочих (как правило, химически активных) газов, малогабаритных ионно-плазменных и ВЧ-разрядных устройств для создания управляемого высокоэффективного плазменного малоэнергоёмкого оборудования индивидуальной обработки пластин.

Это направление, имея стратегическое значение, связанное с необходимостью микроминиатюризации электронных приборов и увеличением диаметра пластин-носителей, актуально и в связи с решением постоянно возникающих этапных задач, которые сопровождают развитие плазменных технологий в микроэлектронике. Например, разработка ионных источников без накаливаемого катода для реализации процессов ионно-химической обработки, что тождественно уменьшению физико-энергетического воздействия на поверхность; необходимость нанесения пленок на гибкие пластиковые носители с низкой температурой плавления; малогабаритные технологические модули для космических станций; применение вместо кремниевых носителей материалов группы A^3B^5 и органических полупроводников с низкими температурами деструкции; проблемы уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу, в частности, фтора.

Сейчас же, на пороге качественного преобразования процесса микроминиатюризации приборов и изделий электроники с помощью нанотехнологий, минимизация комплексного воздействия активированной технологической среды на наноструктуры при сохранении эффективности этого воздействия тем более актуальна.

Результаты разработок были испытаны в ведущих НИИ и внедрены на таких передовых предприятиях электронной промышленности как НПО «Кристалл», ПО «Сатурн», ПО «Орион» (г. Киев), ЦКБ ПО «Донец» (г. Луганск), Минский радиотехнический инсти-

*Публикуемая статья — первая в цикле "Малоэнергоёмкие плазменные технологические системы с разрядами в комбинированных электрическом и магнитном полях".

** С 1999 года — Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина.

тут, ПО “Интеграл” (г. Минск), НИИ вакуумной техники им. С.А. Векшинского, Физико-технологический институт РАН, НИИ прикладной физики, НПО “Орион”, НПО “Сапфир” (г. Москва), НИИ точных технологий, завод “Ангстрем” (г. Зеленоград), ПО “Светлана”, ПО “Авангард” (г. С.-Петербург), НИИ полупроводниковых приборов, НПО “Электроника” (г. Воронеж) в процессах формирования топологического рисунка при производстве приборов микро- и микрофотозлектроники.

Характеристики ВЧ-емкостного разряда

Изучены условия пробоя самостоятельного ВЧЕ-разряда, его статические активные вольт-амперные характеристики (ВАХ), спектры оптического излучения оптимизированного ВЧЕ-разряда [1—5]. Эксперименты выполнялись в двухэлектродном разрядном устройстве. Кривые зажигания ВЧ-разряда измерялись в воздухе, аргоне, CF_4 и SF_6 при давлениях газа $P \cdot 10^{-3}—10$ торр в диапазоне ВЧ-напряжений $U_0 < 1500$ В и частоте поля $f=13,56$ МГц. Параметры разряда измерялись стандартными зондовыми методиками, модифицированными для использования в условиях ВЧ-разряда. Расстояние между плоскими параллельными электродами диаметром 100 мм изменялось в диапазоне 6—54 мм. Использовались электроды из нержавеющей стали и дюралюминия, а также стальные электроды, покрытые сажей и полимерной пленкой. На один из электродов подавалось ВЧ-напряжение, второй электрод был заземлен. Для исключения постоянного напряжения автосмещения между электродами подключался дроссель индуктивности 4 мГн.

Показано, что кривая зажигания ВЧЕ-разряда имеет особенности: на левой ветви наблюдается неоднозначная зависимость напряжения зажигания от давления, а на правой, в определенных условиях, — точка перегиба. На основе диффузной кинетической теории ВЧ-пробоя [6] можно получить соотношение между значениями давления в точке перегиба, в минимуме и в точке поворота кривой зажигания.

Из экспериментальных кривых на рис. 1, 2 вытекает, что параметры, которые отвечают ветвям кри-

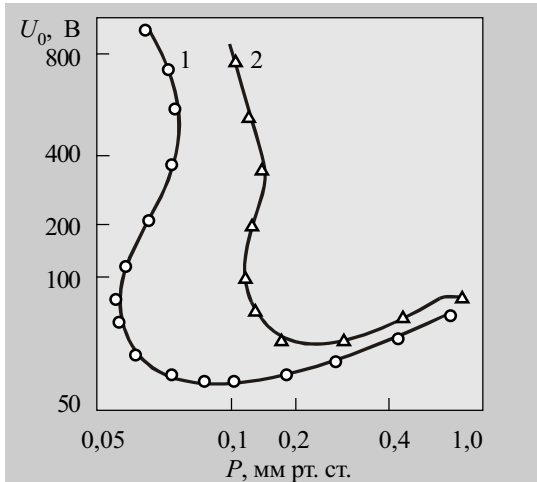


Рис. 1. Зависимость напряжения зажигания ВЧЕ-разряда от давления (P) аргона: 1 — расстояние между электродами d=14 мм; 2 — d=29 мм

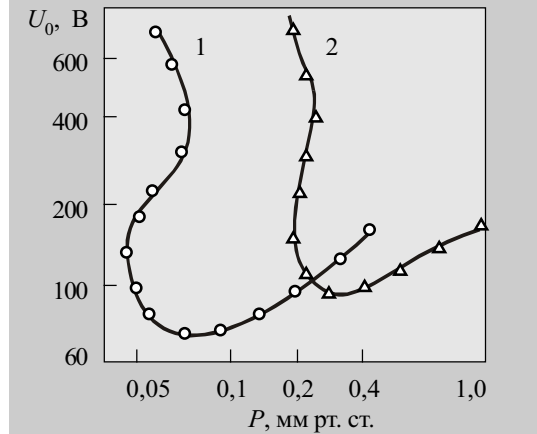


Рис. 2. Зависимость напряжения зажигания ВЧЕ-разряда от давления для различных газов при d=20 мм: 1 — SF_6 ; 2 — H_2

вой зажигания по правую и по левую сторону от минимума, удовлетворяют условиям применимости диффузной теории:

$$v \gg \omega, \lambda_e \ll d, E_{lim} \leq \frac{d m_e \omega v}{2 e}$$

где v — частота электрон-атомных соударений;

ω — частота электрического поля;

λ_e — длина свободного пробега электрона;

d — расстояние между электродами;

m_e, e — масса и заряд электрона;

E_{lim} — предельная амплитуда электрического поля, при которой все электроны достигают стенок разрядной камеры за половину периода изменения поля.

На рис. 3, 4 представлены кривые зажигания ВЧ-разряда в воздухе, SF_6 и CF_4 при разных материалах электродов. Из рисунков видно, что кривые зажигания ВЧ-разряда практически не зависят от материала электродов в диапазоне давлений газа вблизи и по правую сторону от точки перегиба. В области давлений по левую сторону от точки перегиба наблюдается заметное расхождение между кривыми зажигания.

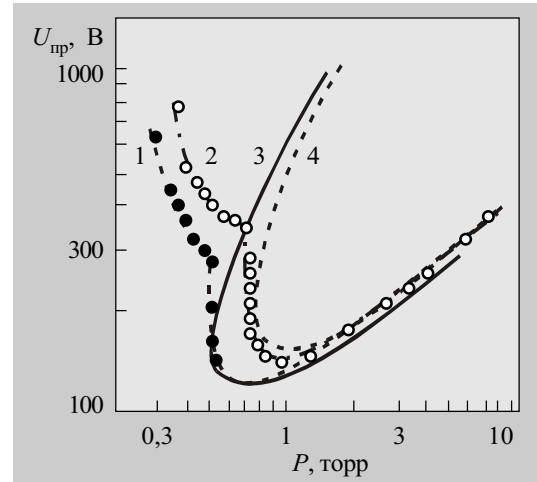


Рис. 3. Зависимость пробойного ВЧ-напряжения от давления воздуха при d=14 мм: 1 — чистые стальные электроды; 2 — стальные электроды, покрытые сажей; 3 — расчет по (1) для $\delta=0,1$; 4 — расчет по (1) для $\delta=0,02$

Чем выше коэффициент вторичной электронной эмиссии материала электродов δ , тем меньше ВЧ-напряжения нужны для пробоя газа; кривая зажигания сдвигается в область более низких давлений. Использование электродов с более высоким значением δ влияет на кривую зажигания ВЧ-разряда таким же образом, как и небольшое увеличение расстояния между электродами d . Практически на всех экспериментальных кривых зажигания по левую сторону от минимума хорошо видно область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ-напряжения от давления газа.

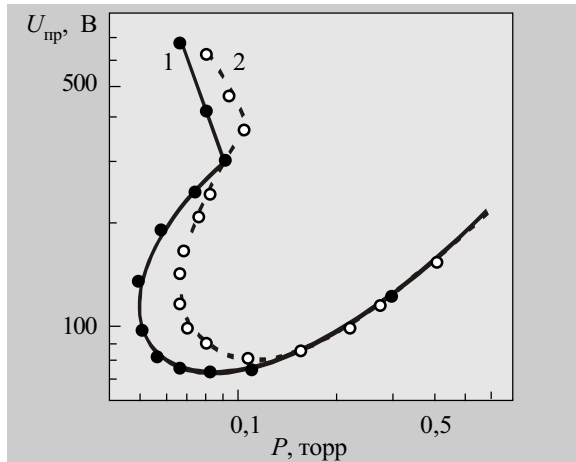


Рис. 4. Зависимость пробойного ВЧ-напряжения от давления SF_6 при $d=20$ мм:
1 — чистые стальные электроды; 2 — стальные электроды, покрытые сажей

Построена простая феноменологическая одномерная модель ВЧ-пробоя газа с учетом вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов. В частности, получено уравнение ВЧ-пробоя

$$\exp\left(\frac{B_0\rho}{\sqrt{2}E_0}\right) = A_1\rho\pi\left(L - \frac{E_0\Lambda}{\sqrt{2}B_0\rho C_2}\right) \times \left[2\arccos\left[\delta\left(\frac{2\pi m\omega}{eE_0}\right)^{1/2}\left(\frac{3\pi}{2\lambda}\right)^{-1/4}\right]^{-1}\right], \quad (1)$$

где $B_0, \rho, A_1, C_2, \lambda$ — молекулярные константы;
 E_0 — амплитуда ВЧ-поля;
 L — длина разрядного промежутка;
 Λ — вакуумная длина ВЧ-поля.

При отсутствии вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов ($\delta=0$) уравнение (1) переходит в уравнения Кихары для пробоя газа в однородном ВЧ-поле. Как видно из рис. 3, уравнение (1) удовлетворительно описывает экспериментальные кривые зажигания ВЧ-разряда при разных материалах электродов.

Статическая активная ВАХ (зависимость омической составляющей ВЧ-тока проводимости $J_0 \cos\phi$ от напряжения U_0 , связанных соотношением $W = U_0 J_0 \cos\phi$, где W — мощность, потребляемая разрядом, ϕ — угол сдвига фазы между током и напряжением), как и кривая зажигания ВЧ-разряда, является важной его характеристикой. Проведенные исследова-

ния показали, что активная ВАХ высокочастотного разряда отличается от аналогичной зависимости в разряде постоянного тока. Основные особенности отличия ВАХ наблюдаются в области напряжений, близких к напряжению пробоя ВЧ-разряда.

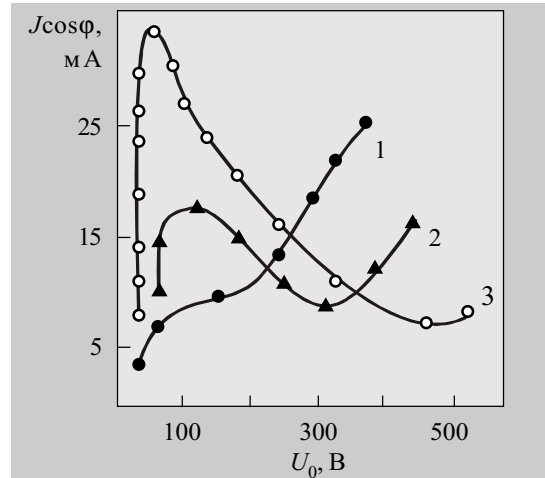


Рис. 5. Статические активные ВАХ ВЧ-разряда при $P=0,3$ торр и $d=50$ мм для различных газов:
1 — гелий; 2 — аргон; 3 — ксенон

При напряжении на разряде, превышающем потенциал зажигания, для некоторых газов наблюдается спад тока проводимости. Характерные зависимости приведены на рис. 5. Как видно из рисунка, чем тяжелее газ, тем больший спад тока наблюдается на ВАХ. Минимум ВЧ-тока проводимости приходится на меньшие напряжения для газа, у которого коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии выше. Чем ярче выражена зависимость сечения упругих электрон-нейтральных столкновений от энергии электронов, тем большее падение тока наблюдается в эксперименте.

Аналогичное поведение наблюдается также и для ВЧ-мощности, вкладываемой в разряд. На участках с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) на активных ВАХ ВЧ-мощность в разряде может не только замедлять свой рост при повышении ВЧ-напряжения, но даже падать. Это означает, что относительные энергозатраты на создание в разряде приэлектродного падения потенциала V_p , линейно зависящего от U_0 , для этих участков будут минимальными, а значит, минимальными будут также затраты ВЧ-мощности на создание ускоренного до соответствующей энергии потока ионов из плазмы. При равной энергетике ионной бомбардировки более экономичным будет режим разряда, соответствующий именно участкам с ОДП.

Диодные реакторы и установки плазмохимического травления (ПХТ)

Существенное уменьшение объема разрядной камеры и ограничение объема плазмы только размерами области, находящейся между электродами непосредственно над обрабатываемой пластиной, а также использование в качестве рабочих режимов реактора области параметров с минимальным потенциалом

зажигания разряда, в которой наблюдается ОДП, позволило значительно снизить энергозатраты на проведение процессов ПХТ в ВЧ-диодном разряде [7] и разработать серию малоэнергоёмких реакторов ВЧЕ-типа, а также экспериментальных технологических установок на их основе.

Проведенные измерения температуры электронов T_e , плотности плазмы n_p , постоянной составляющей потенциала плазмы Φ_{pl} , распределения этих параметров по радиусу и величине межэлектродного промежутка, спектров излучения и масс-спектрометрические исследования вместе с изучением газовых потоков в модельных диодных устройствах позволили разработать оптимальные плазмохимические реакторы для установок ПХТ «Контур-01», «Контур-03», «Титан».

Общим для перечисленных установок является использование минимизированного по размерам («в пластину») и энергокладу реактора с верхним электродом оригинальной конструкции [8], позволяющей осуществлять распределенные по площади электрода напуск рабочих газов и откачивание продуктов реакции. Схема реактора приведена на рис. 6.

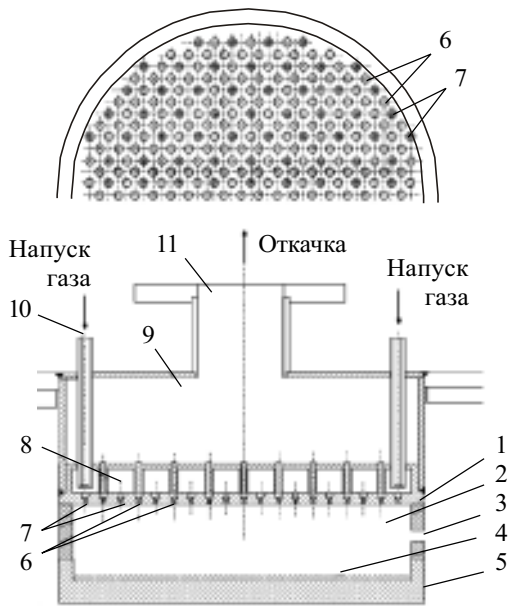


Рис. 6. Диодный реактор установок типа «Контур» и «Титан» и верхний электрод (в плане)

В реакционной камере 2 размещены два потенциальных электрода 1, 5. На электроде 5 находится обрабатываемая пластина 4. В потенциальном электроде 1 имеются отверстия для вакуумной откачки продуктов реакции 8 и напуска рабочего газа 7. Отверстия для откачки продуктов реакции расположены на площади электрода так, что они образуют симметричную относительно центра электрода решетку. Отверстия для напуска рабочего газа 7 находятся в центрах этой решетки. Через отверстия 8 вакуумный объем камеры 2 соединяется с объемом 9, который связан с системой вакуумной откачки через отверстие 11. Через отверстия 7 вакуумный объем камеры 2 соединяется с объемом 8, который связан с системой напуска рабочего газа через отверстие 10. Измерение вакуума в реакционной камере осуществляется через отверстие 3.

Экспериментальные технологические установки «Контур-01» и «Контур-03» [4], оснащенные реакторами такого типа, предназначены для индивидуального ПХТ пластин в плазме ВЧЕ-разряда. В этих установках можно осуществлять травление тонких пленок нитрида кремния, поликремния, диоксида кремния, металлов, глубинное травление кремния в атмосфере рабочих газов и их смесей (аргон, водород, кислород, фреоны). Частота ВЧ-генератора — 13,56 МГц, мощность генератора установки «Контур-01» — не более 100 Вт, «Контур-03» — не более 500 Вт, диапазон давлений в вакуумной камере 0,1—1,0 торр.

Установка «Контур-01» выполнена в виде стойки с габаритами 1750×550×560 мм. В состав установки входят система газонапуска и откачки, устройство регулирования скорости откачки и установки рабочего давления, вакуумная реакционная камера, блок управления режимами работы, высокочастотный генератор, прибор «Контроль» для определения момента окончания травления. Для удобства эксплуатации и наладки предусмотрены ручной и автоматический режимы работы. Блок управления режимами работы обеспечивает стыковку и совместную работу всех систем и устройств. ВЧ-генератор имеет согласующее устройство и контрольные приборы для измерения тока анода и подводимого ВЧ-напряжения.

Установка «Контур-03» является усовершенствованной модификацией установки «Контур-01». Основные отличия состоят в размерах обрабатываемых пластин (100 мм), мощности генератора. «Контур-03» при улучшенных эргономических показателях имеет значительно меньшие габариты. В установке применена система газонапуска, обеспечивающая большую равномерность травления, усовершенствован блок управления. Конструкция реактора обеспечивает возможность использования установки в составе линий плазмохимической обработки.

С развитием элементной базы установок ПХТ и благодаря выполненным исследованиям высокочастотного газового разряда появилась возможность создания миниатюрных настольных установок. Такой установкой является экспериментальная технологическая установка «Титан» (рис. 7). Установка серии «Титан» имеет габариты 60×30×50 см. В ее состав входят вакуумная реакционная камера, блок газонапуска, вакуумметр, генератор высокой частоты, блок управления, блок питания, механизм открывания камеры.



Рис. 7. Малогабаритная экспериментальная установка ПТХ серии «Титан»

На установках «Титан» проводились процессы травления различных тонкопленочных структур. Травление полиимидных пленок толщиной 12—36 мкм в атмосфере кислорода и фреона с контактной никелевой маской показало высокую скорость (5 мкм/мин)

и анизотропию. Осуществлялось травление кремневых структур, органического и кремнийорганического фоторезистов. Скорость травления тонких пленок нитрида кремния, диоксида кремния, поликремния составляла 1 мкм/мин и больше. Проводились процессы глубинного травления кремния. Средняя скорость травления составляла 5 мкм/мин при глубине травления до 50 мкм.

Установлены оптимальные режимы травления кремния в технологических реакторах установок "Контур" и "Титан".

На рис. 8 показаны зависимости скорости травления кремния от давления SF₆ и кривая зажигания ВЧ-разряда в этом газе.

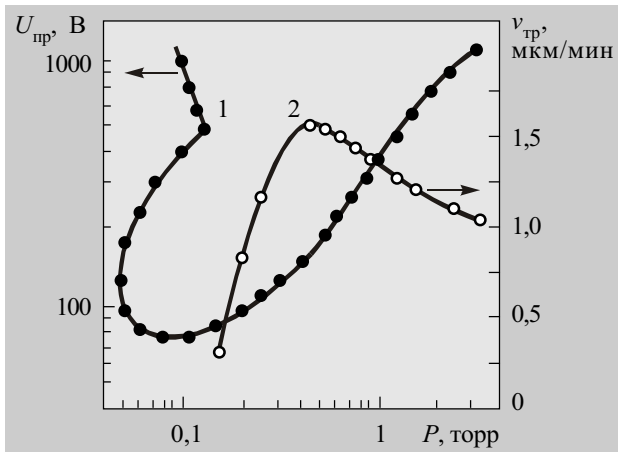


Рис. 8. Кривая зажигания ВЧ-разряда в SF₆ (1) и зависимость скорости травления кремния v_{тр} от давления P (2) при d=22 мм

Из рисунка видно, что функция v_{тр}(P) имеет максимум при давлении, лежащем в диапазоне между минимумом и точкой перегиба кривой зажигания ВЧ-разряда. Процесс скоростного травления начинается при некотором пороговом давлении вблизи минимума кривой зажигания. Наличие максимума на зависимости v_{тр}(P) в диапазоне давлений 0,1—1 торр наблюдалось также в работах других авторов.

Измерениями электронной плотности и скорости генерации химически активных частиц в реакторах установлена связь между областью давлений, оптимальных для проведения процесса травления кремния в технологических малоэнергетических плазменных установках серии "Контур" и "Титан", и соответствующим участком ВЧ-кривой зажигания. Максимальные скорости травления кремния наблюдаются в диапазоне давлений между минимумом и точкой перегиба кривой зажигания. Получена аппроксимационная формула, позволяющая предсказать оптимальное для проведения процесса скоростного травления кремния в SF₆ давление в широком диапазоне расстояний между электродами.

Описанные выше установки позволяют осуществлять практически все процессы микротравления металлов, полупроводников и диэлектриков в рабочих газах (кроме хлорсодержащих, при использовании которых требуются известные изменения в конструкции установок).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кропотов Н. Ю., Качанов Ю. А., Реука А. Г. и др. Особенности пробоя газа низкого давления в высокочастотном однородном поле // Письма в ЖТФ.— 1988.— Т. 14, вып. 4.— С. 359—363.
2. Кропотов Н. Ю., Качанов Ю. А., Лисовский В. А. и др. Особенности вольт-амперных характеристик слаботочной формы высокочастотного разряда Е-типа // Там же.— 1989.— Т. 15, вып. 21.— С. 17—21.
3. Лисовский В. А., Кропотов Н. Ю., Фареник В. И. Влияние вторичной электронной эмиссии на ВЧ-пробой газа низкого давления // Там же.— 1996.— Т. 22, вып. 24.— С. 64—69.
4. Фареник В. И. Применение высокочастотных разрядов низкого давления для разработки малоэнергетических управляемых систем вакуумно-плазменного травления // Вестник Харьковс. гос. политехнич. университета.— 1999.— Вып. 55.— С. 56—74.
5. Фареник В. И. Физико-технические характеристики высокочастотного диодного разряда в устройствах травления микроструктур // Радиоэлектроника и информатика.— 1999.— № 2.— С. 73—81.
6. Kihara T. The mathematical theory of electrical discharges in gases // Rev. Modern Phys. — 1952. — Vol. 24, N 1.— P. 45.
7. А. с. 1443689 СССР. Способ плазмохимического травления микроструктур / Н. Ю. Кропотов, Ю. А. Качанов, В. Д. Егоренков и др.— Оpubл. в Б. И.— 1988, № 12.
8. А. с. 1355053 СССР. Устройство для плазмохимического травления покрытий образцов / Н. Ю. Кропотов, В. Т. Сериков, В. И. Фареник и др.— Оpubл. в Б. И.— 1987, № 11.

КОНТРОЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ КОНТРОЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ КОНТРОЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ

Украина, г. Киев
НИИ «ОРИОН»

имеет собственный современный испытательный центр.
Может проводить испытания изделий, приборов и комплектующих на воздействие механических, климатических и других факторов.
Испытания могут проводиться с представителем Заказчика и Отделом технического контроля.

Справки по тел. ☎ (044) 446-82-72 (Шведов Анатолий Николаевич)

КОНТРОЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ КОНТРОЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ КОНТРОЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ