

Новые возможности криогенного разряда как среды для формирования плазменно-пылевых структур.

С.Н. Антипов¹, М.М. Васильев¹, О.Ф. Петров^{1,2}

¹ОИВТ РАН, ²МФТИ, Москва

Левитация пылевых частиц и формирование из них упорядоченных плазменно-пылевых структур наблюдались в плазмах самых различных видов: в термической плазме пламени горелки, в разрядах различных видов и конфигураций, в ядерно-возбуждаемой плазме. Плазменно-пылевые структуры наблюдались и в криогенном тлеющем разряде постоянного тока [1]. Такие системы получили название криогенной пылевой плазмы, т.е. пылевой плазмы в которой тяжелая нейтральная компонента охлаждается до криогенных температур (<100 К). Значительный интерес проявляемый в последнее время к низким температурам в качестве условий для формирования плазменно-пылевых структур обусловлен тем, что криогенная пылевая плазма позволяет объединить два подхода при исследования фундаментальных вопросов физики систем с сильным взаимодействием – метод глубокого охлаждения системы и метод увеличения потенциальной энергии взаимодействия заряженных частиц, реализующийся в случае пылевой плазмы.

В работе [1] было получено, что охлаждение разряда до 77 К при постоянном разрядном токе приводит к увеличению кинетической температуры пылевых частиц. Кроме того надежно подтверждался вывод об уменьшении межчастичных расстояний в плазменно-пылевых структурах при понижении температуры газа. Это, в частности, может приводить к формированию сверхплотных плазменно-пылевых структур, которые характеризуются тем, что расстояние между частицами в них сопоставимо по величине с их размером и с ионным радиусом Дебая в фоновой плазме. Пылевые структуры при этом приобретают экзотические свойства, такие как, глобулярная (сферическая) форма, свободные границы и др.

Настоящая работа посвящена исследованию характерных особенностей формирования сверхплотных плазменно-пылевых структур в тлеющем разряде постоянного тока при криогенных температурах. Представлены результаты экспериментальных исследований явления *сфероидизации* – процесса перехода пылевых структур к компактной глобулярной (сфероидной) форме при криогенных температурах. Рассматриваются возможные механизмы данного явления.

Работа поддержана программой Президиума РАН, грантами РФФИ №№ 10-02-90056, 10-02-01428, 11-08-01232, 11-02-92500 и CRDF № RUP1-7025-CG-11

Литература.

1. Antipov S.N., Asinovskii E.I., Fortov V.E., Kirillin A.V., Markovets V.V., Petrov O.F., and Platonov V.I., Phys. Plasmas **14**, 090701 (2007)

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МИКРОПРОВОДНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ

С.В. Барухвостов, М.Б. Бочкарев, Н.Б. Волков, К.А. Нагаев,
*В.П. Тараканов, **С.И. Ткаченко, Е.А. Чингина

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: nbv@ami.uran.ru

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

**Московский физико-технический институт (университет), Долгопрудный

Цель предлагаемой работы - экспериментальное исследование особенностей генерации неидеальной плазмы при воздействии на микропроводники электромагнитного импульса (ЭМИ) с субнаносекундным фронтом. Генератор высоковольтных импульсов напряжения «РАДАН-220» (с волновым сопротивлением $Z_w = 50 \Omega$) разряжался на неоднородную коаксиальную линию (вакуумную камеру) длиной 15 см и диаметром 10 см. В центральную жилу линии включались медные ($d = 20 - 300 \mu\text{m}$), никелевые ($d = 25 \mu\text{m}$) и вольфрамовые ($d = 24.5 - 100 \mu\text{m}$) проволочки длиной $l = 5 - 15 \text{ mm}$. Амплитуда импульса напряжения - $U_0 = 220 \text{ kV}$; длительность фронта - $\tau_f = 200 - 500 \text{ ps}$; запасенная энергия в генераторе - $w = 1 \text{ J}$. Давление в камере - $P = 10^{-4} - 760 \text{ Torr}$. Напряжение на входе камеры измерялось с помощью емкостного делителя, помещенного в вакуумное масло. Электрический ток в конце линии измерялся с помощью шунта, имеющего сопротивление $R_s = 0.4 \Omega$ и полосу пропускания 5 GHz . Сигналы с делителя и шунта регистрировались четырехканальным цифровым осциллографом Tektronix с полосой пропускания 1 GHz . Кроме этого, производилась съемка собственного свечения канала разряда с помощью цифровых фотокамер Canon 450D и Canon 5D Mark II; его непрерывная развертка с помощью стрик-камер АГАТ «СФ-3М» и Cordin-173 и коаксиального фотоэлектронного диода (ФЭК) СПУ-22М; регистрация интегрального спектра и его непрерывная развертка с помощью спектрографа MS 257 и стрик-камеры Cordin-173.

Субнаносекундный фронт импульса напряжения, большие значения радиальной напряженности электрического поля на поверхности микропроводников ($E_r = 24 \text{ MV/cm}$ на проволочке с $d = 20 \mu\text{m}$ в разомкнутой на конце линии) и сильная неоднородность линии, обусловленная большой разницей в отношениях диаметров центральной жилы и проводника к диаметру камеры, - отличительные особенности наших экспериментов. Показано, что разрушение микропроводников ЭМИ с $\tau_f < 1 \text{ ns}$ определяется электродинамическими процессами, происходящими в их поверхностном слое и окружающем пространстве. Установлено существование интервала давления ($0.7 < P \leq 3.4 \text{ Torr}$ для медных проволочек с $d = 20 \mu\text{m}$), в котором микропроводники не разрушаются или разрушаются термомеханическими напряжениями. При $P > 3.4 \text{ Torr}$ в результате импульсного коронного разряда вокруг проволочек образуется плазменный канал, энергетический обмен с которым приводит к их разрушению. При $P \leq 0.7 \text{ Torr}$ проволочки разрушаются в результате «электродинамического взрыва» поверхностного слоя металла. Образующийся плазменный канал состоит из плазменной короны, плотного ядра - неидеальной плазмы и переходного слоя между ними, в которых наблюдаются вихревые и винтовые структуры, ярко светящиеся пятна, плазменные струи. Исследованы спектральные характеристики излучения плазменного канала. Показано, что спектр излучения в момент образования плазменной короны непрерывен. Наиболее интенсивные линии спектра меди (510.554, 515.324, 521.82) nm появляются $\sim 3 \text{ ns}$ после образования плазменной короны. По отношению интенсивностей линий спектра получена оценка температуры электронов: $T_e \sim 0.7 \text{ eV}$.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект No. 10-08-00691-а), Президиума УрО РАН в рамках проектов фундаментальных исследований, выполняемых совместно учеными УрО, СО и ДВО РАН (проект No. 09-С-2-1002), и программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества» (проект No. 09-П-2-1016).

Нанокатализ.

R.S.Berry (Chicago), Б.М.Смирнов (Москва).

Термин нанокатализ [1, 2, 3] относится к процессу с участием кластеров в качестве катализатора. Наибольшее внимание привлекает специальный катализатор, в которых кластеры золота, содержащие примерно от 10 до 20 атомов, прикреплены к поверхности окислов металлов, являющихся полупроводниками. Число оптимальных окислов металлов для этой цели ограничено и включает в себя только соединения Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , CeO_2 , которые могут быть использованы в форме микронных частиц, макроскопических твердых тел или пленок. Такой катализатор обеспечивает протекание ряда окислительных процессов при комнатной температуре, что невозможно достичь другими методами. Важнейшим из этих процессов является доокисление CO в атмосферном воздухе при комнатной температуре. Этот эффект был обнаружен японскими учеными в 1987 г. [4, 5], которые выделяли кластеры или частицы золота из раствора его соединения и показали, что рассматриваемый каталитический эффект только для частиц золота с размером менее 1 нм (радиус Вигнера-Зейтса для золота равен 0.17 нм), причем оптимальным размером кластера золота для этих процессов считается число атомов в кластере, равное 10 [6, 7, 8].

Кроме фильтров в автомобилях, которые уже могли бы оправдать повышенный интерес к рассматриваемому нанокатализатору, он используется как сенсор для CO [9], а также для контроля эмиссии CO из автомобильного мотора и для очистки воздуха [10]. Этот нанокатализатор может быть основой для батарей и топливных элементов на метане [11].

Рассматривая химическую реакцию молекулы CO и атома кислорода, находящихся на поверхности катализатора, мы используем богатую информацию [12], накопленную при экспериментальном исследовании этого процесса, а также опыт изучения фазовых переходов в металлических кластерах [13]. Представляя процесс с участием CO как конкуренцию химического процесса, энергия активации которого равна 0.5 эВ, и безактивационного процесса, вероятность которого ниже 10^{-10} , мы находим, что последний процесс имеет характер туннельного электронного перехода. Исследованы различные виды туннельных переходов для рассматриваемого процесса.

Список литературы

- [1] *Nanocatalysis*. Ed.A.Heiz, U.Landman (Springer, Heidelberg, 2007)
- [2] A.Z.Moshfegh. *Nanoparticle catalysis. J.Phys.* **42D**, 233001(2009)
- [3] A.J.Gellman, N.Shukla. *Nature Materials* **8**, 87(2009)
- [4] M.Haruta. *Catal.Today* **36**, 153(1987)
- [5] M.Haruta, T.Kobayashi, H.Sato, N.Yamada. *Chem.Lett.* **2**, 405(1987)
- [6] M.Haruta. *The Chemical Record* **3**, 75 (2003)
- [7] C.M.Chang, M.Y.Chou. *Phys.Rev.Lett.* **93**, 133401(2004).
- [8] A.A.Herzig, C.J.Kiely, A.F.Carley e.a. *Science* **321**, 1331(2008)
- [9] N.Funasaki, A.Henmi, S.Ito e.a. *Sensors and Actuators.* **13-14B**, 536(1993)
- [10] C.W.Corti, R.J.Holliday, D.V.Thompson. *Phys.Rev.Lett.* **95** 06102(2005)
- [11] P.C.Biswas, Y.Nodasaka, M.Enyo, M.Haruta. *J.Electroanal. Chem.* **381** 167(1995)
- [12] G.C.Bond, C.Louis, D.T.Thompson. *Catalysis by Gold*. (World Scientific, Singapore, 2006)
- [13] B.M.Smirnov, R.S.Berry. *Phase Transitions in Simple Atomic Systems*. (Springer, Heidelberg, 2007).

Улучшенный метод Райзера для расчета состава плазмы

М.В. Бураков, Н.Н. Калиткин, И.А. Козлитин

Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва

Для плазмы одного элемента Ю.П. Райзер предложил несложный алгоритм расчета состава. Метод дает удовлетворительные результаты пока ионизация происходит в пределах одной электронной оболочки. При переходе от одной оболочки к другой погрешность метода существенно возрастает, а для слабой ионизации становится огромной. Кроме того, метод не обобщается на случай смеси элементов.

Предлагается улучшение метода Райзера, которое повышает его точность до удовлетворительной во всем диапазоне температур и плотностей, и обобщается на смеси любого числа элементов. Трудоемкость усовершенствованного метода такова же, как и у исходного. Поэтому его можно использовать для написания подпрограмм, включаемых вместо таблиц в газодинамические расчеты.

Условия формирования монослойных и мультислойных пылевых структур в плазме ВЧ разряда.

Васильева Е.В.^{1,2}, Ваулина О.С.^{1,2}, Петров О.Ф.^{1,2}, Фортов В.Е.^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН

²Московский физико-технический институт (Гос. Университет)

Формирование структурных фазовых переходов представляет значительный интерес с фундаментальной и практической точек зрения и, в настоящее время, является предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований в различных областях физики. Рост интереса к проблемам поведения пылевых частиц в плазме связан с развитием широкого спектра приложений, включая способность удержания и управления пространственным положением нанообъектов [1].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования условий формирования монослойных и мультислойных систем пылевых частиц в плазме ВЧ разряда. Эксперименты проводились в аргоне с давлением $P = 0.1-0.3$ Тор при мощности разряда $W \approx 2-30$ Вт. В качестве пылевой компоненты использовались монодисперсные сферы радиусом $a \approx 6.37$ мкм. Для монослойных и многослойных пылевых систем измерены профили скоростей и смещений частиц, их кинетические энергии, концентрации, пространственные корреляционные функции и динамические характеристики. Выполнены экспериментальные исследования перераспределения кинетической энергии пылевых частиц по степеням свободы в монослое и в многослойных системах. Получены новые данные об особенностях формирования конфигурационных фазовых переходов в квазидвумерных плазменно-пылевых системах. А именно, определены параметры плазменно-пылевых систем в условиях устойчивой левитации пылевого монослоя и при возникновении нового пылевого слоя. Проведено сравнение с имеющимися численными и теоретическими данными.

Следует отметить, что в процессе экспериментов формирование нового пылевого слоя происходило как с уменьшением мощности разряда при постоянном давлении, так и с уменьшением давления буферного газа при постоянной мощности разряда. (В обоих случаях происходило увеличение концентрации пылевых частиц, к тому же снижение давления буферного газа вызывало уменьшение градиента вертикального электрического поля в приэлектродном слое разряда.) При этом в отличие от наблюдений, представленных в работе [2], с уменьшением мощности разряда пространственная корреляция частиц нарушалась, а их кинетическая температура в плоскости слоя росла.

Литература

- [1] Ostrikov K, Cvelbar U and Murphy A B 2011 *J. Phys. D* **44** 174001
- [2] Melzer A, Homann A and Piel A 1996 *Phys. Rev. E* **53** 2757

Экспериментальное исследование динамики пылевых частиц в коронном разряде.

Василяк Л.М., Владимиров В.И., Депутатова Л.В., Наумкин В.Н., Печеркин В.Я.

Объединенный институт высоких температур РАН

В работе исследуется возможность использования коронного разряда для формирования пылевых структур в различных плазменно-пылевых средах. В настоящее время известны способы удержания пылевых частиц в плазменно-пылевых структурах при давлениях менее 10 Торр в тлеющем, ВЧ разряде и ядерно-возбуждаемой плазме. Однако для ряда применений необходимо формировать плазменно-пылевые структуры при более высоких давлениях. В этом случае коронный разряд, обеспечивающий более однородную ионизацию газа в отличие от стримерного, представляется перспективным.

Исследование проводилось при атмосферном давлении в воздухе, неоне и аргоне. Коронный разряд зажигался в объеме, ограниченном кварцевой цилиндрической трубкой, и в свободно горящем разряде. Использовались трубки внутренним диаметром 20 и 50 мм. Расстояние между электродами составляло 28 мм. Использовались проводящие (латунные) и диэлектрические частицы размером от 50 мкм до 2мм.

Обнаружено, что частицы, расположенные на поверхности нижнего электрода, отрываются от поверхности электрода и движутся к верхнему электроду или уходят из межэлектродного пространства только после зажигания коронного разряда.

ДИССОЦИАЦИЯ И ПЛАВЛЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

В.С. Воробьев, * В.Г. Новиков, А.Л. Хомкин, А.С. Шумихин

Объединенный институт высоких температур РАН,
* Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Предложены модели, объясняющие аномальный характер диссоциации и плавления плотного жидкого или твердого молекулярного водорода при мегабарных давлениях. Для описания диссоциации предположено, что свободные, диссоциированные атомы взаимодействуют путем квантового межэлектронного обмена. Вычислена плотностная зависимость энергии связи атома водорода в такой квазижидкости. Показано, что переход из молекулярного флюида в атомарную жидкость имеет характер фазового перехода первого рода с критическими параметрами $P_c = 72 \text{ GPa}$, $T_c = 10500 \text{ K}$, $\rho_c = 0.5 \text{ g/cc}$. Обнаружена возможность метастабильного существования атомарной жидкости водорода в диссоциированном молекулярном флюиде при разгрузке давления.

Для описания плавления твердого молекулярного водорода развита модель, основанная на ячеечном приближении, в которой учтена локализация электронов и вырождение протонов. При низких температурах и давлениях молекулярный водород находится в твердом или жидком состоянии. Внешнее давление дестабилизирует молекулярные связи, и система переходит в более разупорядоченное состояние со свободными электронами. Это новое разупорядоченное состояние энергетически более выгодно и имеет более низкую свободную энергию. Недавно обнаруженные аномалии кривой плавления водорода указывают на возможность перехода из молекулярного состояния в более разупорядоченное состояние. Ниже давления $\sim 100 \text{ ГПа}$ кривая плавления имеет нормальное поведение – температура плавления монотонно растет с ростом давления. Выше линии плавления находится молекулярная жидкость (МЖ), ниже – молекулярное твердое тело. Для давлений выше 100 ГПа температура плавления сначала достигает максимума, а затем начинает уменьшаться. Отрицательный наклон dT/dP был обнаружен в первопринципных теоретических расчетах [1, 2] и эксперименте Лубейра с алмазными наковальнями [3]. Экстраполяция кривой плавления в область более высоких давлений и более низких температур показывает, что при давлениях выше 400 ГПа и нулевых температурах водород может быть в жидком состоянии. Это интересное физическое явление (холодное плавление) было предсказано в [4, 5] для квантовой системы точечных зарядов на однородном компенсирующем фоне зарядов противоположного знака. Предложенная выше модель подтверждает аномальный характер плавления твердого молекулярного водорода при мегабарных давлениях.

1. S. Scandolo, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., **100**, 3051, 2003.
2. D. Hohl, V. Natali, D. M. Ceperley, and R. M. Martin, Phys. Rev. Lett. **71**, 541 (1993).
3. R. Loubeyre, F. Occelli, and R. LeToullec, Nature (London) **416**, 613, (2002).
4. D.A. Kirzhnits, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **38**, 503 (1960) [Sov. Phys. JETP 11, 344 (1960)].
5. A.A. Abrikosov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **39**, 1797 (1960) [Sov. Phys. JETP, 12, 1259 (1961)].

Расчет давления насыщенных паров алюминия и железа от тройной до критической точки

В.С. Воробьев

Объединенный институт высоких температур РАН

Предложен новый метод расчета давления насыщенных паров вдоль линии равновесия жидкость-пар. Он основан на глобальном изоморфизме между термодинамикой решеточных модельных систем (модель Изинга) и термодинамикой реальных веществ [1, 2]. Для решеточных моделей (РМ) симметричный вид кривой фазового равновесия является отражением факта равноправия пары частица-дырка (спин-антиспин). Задавая определенный вид кривой фазового равновесия решеточной модели с двумя произвольными параметрами, с помощью специального преобразования термодинамических переменных (плотности и температуры) [1, 2], можно построить бинадали и факторы сжимаемости реальных веществ. При этом критическая точка (КТ) и линия для единичного фактора сжимаемости (ЕФС) РМ переходят в соответствующую точку и линию реальной системы. Характер преобразования зависит от значения термодинамических величин в КТ и параметров, определяющих положение линии ЕФС. В отличие от ранее известных методов построения давления насыщения на основе законов подобия данный метод обеспечивает экспоненциальное убывание давления пара с уменьшением температуры, что позволяет охватить широкий температурный диапазон (от критической до тройной точки). Метод был сопоставлен с численными результатами для модельных систем, описываемых потенциалом Леннарда-Джонса и потенциалом прямоугольной ямы, и с экспериментальными данными для аргона, ртути и цезия. Во всех этих случаях модуль среднего отклонения расчетных данных и результатов численного или натурального эксперимента не превосходил 3.4%. Затем метод был применен для металлов алюминия и железа, для которых измерено давление насыщенных паров лишь при низких температурах, а параметры критической точки носят предсказательный характер. Построены зависимости давления насыщения от температуры для критических значений, предлагаемых различными авторами, и найдено среднее отклонение от экспериментальных данных на низкотемпературном участке бинадали, что позволяет сделать определенные выводы о корректности того или иного выбора параметров критической точки.

1. Kulinskii, V. L. J. Phys. Chem. B. 2010, 114, 2852.
2. Apfelbaum E. M., Vorob'ev V. S. J. Phys. Chem. B 2010, 114, 9820–9826

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА РАЗРУШЕНИЯ
ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА И ПОЛИСТИРОЛА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ
ВОЛНЫ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ СИЛЬНОТОЧНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ.**

Б.А. Демидов¹, В.П. Ефремов², Ю.Г. Калинин¹, В.А. Петров¹, С.И. Ткаченко², К.В. Чукбар¹

¹*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия,*

²*Объединённый институт высоких температур РАН, 127412, Москва, Россия.*

Экспериментально с помощью лазерного зондирования в сочетании с электронно-оптической хронографией определены временные диапазоны разрушения полиметилметакрилата и полистирола при воздействии на них ударной волны, инициированной сильноточным импульсным электронным пучком. Показано, что разрушение происходит при разгрузке материала, т.е. уже после прохождения фронта ударной волны. Установлено, что, несмотря на различный характер разрушения этих полимеров вблизи облучаемой поверхности, скорости волн разрушения в них близки.

e-mail: kalinin@dap.kiae.ru

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО УДАРНОМУ ЗАЖИГАНИЮ В ИНЕРЦИАЛЬНОМ ТЕРМОЯДЕРНОМ СИНТЕЗЕ

В.В.Демченко

*Кафедра вычислительной математики
Московского физико-технического института.*

В настоящее время в экспериментальных исследованиях получено ускорение части массы образца до скоростей порядка 10^3 км/с [1,2]. Эффективное преобразование кинетической энергии при торможении во внутреннюю энергию позволит достичь термоядерных температур и создаст условия для активного протекания реакций термоядерного синтеза.

В осесимметричном численном эксперименте была использована физическая модель, учитывающая гидродинамическое движение высокотемпературной плазмы (законы сохранения массы, количества движения, энергии) с учётом полной ионизации вещества мишени из CD, классическую электронную теплопроводность с поправками на эффекты вырождения, электронно-ионную релаксацию, поглощение лазерного излучения по обратному тормозному механизму.

Мишень состояла из шара плотностью 200 г/см^3 , к которому была пристыкована коническая полость, замкнутая на некотором расстоянии сферическим сегментом и заполненная малоплотным веществом. Сегмент с внешней стороны облучался лазерным излучением с плотностью потока $8,36 \cdot 10^{13} \text{ вт/см}^2$ и общей энергией 500дж.

В результате расчётов было получено ускорение части сегмента до скоростей порядка сотен км/с, столкновение с массивным ядром, пространственное и временное распределение генерации термоядерных нейтронов, данные по преобразованию с течением времени энергии лазерного излучения в энергию: ускоряемого сегмента, стенок конической полости, разлетающейся плазмы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. M. Murakami, H. Nagatomo “*A new twist for inertial fusion energy: Impact ignition*”, Nucl. Inst & Meth. Phys. Res. **A544**, pp.67-75 (2005).
2. S.Yu. Gus'kov, H. Azechi, N.N. Demchenko, V.V. Demchenko *et al.* “*Laser-driven acceleration of a dense matter up to “thermonuclear” velocities*”, Plasma Physics and Controlled Fusion, **49** pp.1689-1706 (2007).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В РАМКАХ НЕЛОКАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ЗАРЯДКИ

И.Н. Дербенев, А.В. Филиппов

ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

В настоящей работе проведено исследование влияния нелокальности функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) на характер экранирования заряда пылевой частицы в двухкомпонентной плазме различных инертных газов и азота при атмосферном давлении. Плазма создается внешним источником ионизации газа, скорость ионизации менялась в диапазоне 10^{12} - 10^{18} см⁻³с⁻¹. Для аналитических и численных расчетов выбрана модель точечного стока в диффузионно-дрейфовом приближении, учитывающая поглощение электронов и ионов пылевой частицей. Нелокальность ФРЭЭ учитывалась с помощью дополнительного уравнения баланса энергии, которое связывает локальное значение средней энергии электронов с параметрами плазмы в соседних точках. Было установлено, что в рассматриваемом случае распределение потенциала пылевой частицы описывается суперпозицией трех дебаевских экспонент с тремя различными постоянными экранирования. Первая постоянная практически совпадает с обратным дебаевским радиусом, вторая определяется обратной длиной, проходимой электронами и ионами в процессе амбиполярной диффузии за характерное рекомбинационное время. Третья постоянная совпадет с обратным характерным расстоянием переноса энергии электронов за счет теплопроводности за характерное время установления энергии электронов в процессах нагрева пучком быстрых электронов и потерь энергии в упругих и неупругих соударениях.

ПЛАЗМЕННАЯ МЕДИЦИНА: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕРАПИИ И СТЕРИЛИЗАЦИИ

Ермолаева С.А.¹, Петров О.Ф.², Сысолятина Е.В.¹, Васильев М.М.², Народицкий Б.С.¹, Morfill G.E.³, Фортов В.Е.², Григорьев А.И.⁴, Гинцбург А.Л.¹

¹ ФГБУ НИИЭМ им.Н.Ф.Гамалеи Минздравоохранения России, г.Москва

²ОИВТ РАН, г. Москва

³ Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Germany

⁴ ГНЦ РФ – ИМБП РАН, Москва

Большинство исследований, направленных на разработку средств борьбы с бактериальными инфекциями, фокусируются на поиске химических веществ с бактерицидной и/или бактериостатической активностью. Однако быстрое формирование множественной антибиотикорезистентности среди наиболее распространенных возбудителей снижает ценность подобных разработок. Низкотемпературная плазма (НТП) может служить реальной альтернативой химическим антибактериальным агентам, т.к. обладает выраженным бактерицидным действием. К другим преимуществам НТП относятся (i) отсутствие высокотоксических веществ пролонгированного действия – антибактериальный эффект НТП связан с синергизмом токсичных компонентов плазменного факела, каждый из которых присутствует в концентрации, не превышающей разрешенные предельно допустимые величины, при этом все токсические компоненты коротко живущие; (ii) меньшая вероятность развития спонтанной устойчивости к НТП у микроорганизмов-мишеней как результат множественной природы токсического воздействия; (iii) относительно низкая стоимость источников НТП; (iv) независимость применения как обеззараживающего агента от рельефа обрабатываемой поверхности; и (v) перmissивность тканями человека и безболезненность применения. Перечисленные преимущества делают НТП привлекательным методом для стерилизации и/или деконтаминации поверхностей различного рода, включая поверхностные покровы и слизистые. Возможный потенциал НТП как иммуностимулирующего агента позволяет рассматривать более широкие перспективы внедрения НТП в практику здравоохранения в качестве терапевтического средства.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТИТАНА И ЦЕРИЯ ПРИ УДАРНОВОЛНОВЫХ НАГРУЗКАХ

*Жерноклетов М.В., Ковалёв А.Е., Комиссаров В.В., Подурец А.М., Симаков В.Г. и др.
РФЯЦ ВНИИЭФ (Саров)*

Изложены результаты экспериментального исследования поведения церия и титана при ударноволновом нагружении и результаты измерения скоростей звука в ударносжатых материалах. Эксперименты проведены с двумя системами нагружения исследуемых образцов на основе легкогазовой пушки и взрывных генераторов ударных волн. Для измерения профилей давления применялись ПВДФ - и манганиновые датчики динамического давления. Образцы изготавливали из электролитического церия марки ЦЭ-0 (СТ48-295-85) чистотой 99,83% и технически чистого титана марки ВТ1-0 (содержание титана 99,3 вес. %). Постопытное исследование материала проводилось методами оптической металлографии и рентгеноструктурного анализа. Результаты металлографических исследований образцов церия, сохраненных после нагружения, показали, что поврежденность представляет собой откольные трещины. Определены глубина откольного слоя, ширина и структура зоны поврежденности для каждого образца. Рентгеноструктурный анализ не выявил изменений в фазовом составе церия после нагружения. Основная фаза во всех образцах до и после ударного нагружения – CeII (γ -Ce), имеющая гранецентрированную кубическую структуру. Во всех постопытных образцах титана содержится 2 фазы: α -Ti и ω -Ti.

Скорости звука в титане измерены методом встречной разгрузки с помощью манганиновых датчиков и методом догоняющей разгрузки с использованием индикаторных жидкостей. Совместный анализ экспериментальных данных по скоростям звука свидетельствует о том, что при давлениях на ударной адиабате титана 50 - 90 ГПа наблюдается сильный излом зависимости скоростей звука. Такой излом может означать, что титан в этом диапазоне давлений испытывает фазовое превращение. Не исключено, что это превращение связано с плавлением металла.

Первопринципные расчеты коэффициента теплопроводности металлов с горячими электронами

Жиляев П.А., Стегайлов В.В.

ОИВТРАН

При воздействии ультракороткого лазерного излучения металл переходит в двухтемпературное (2Т) состояние, в котором температура электронной подсистемы (T_e) на порядки превышает температуры ионов. 2Т стадия является важной для понимания механизмов лазерной абляции, так как на ней происходит передача лазерной энергии ионам и формируется слой прогрева, который определяет дальнейшую динамику системы. Для численного моделирования лазерной абляции необходимы кинетические коэффициенты металла с горячими электронами. Однако, в литературе применяются феноменологические зависимости, коэффициенты в которых определяются из асимптотик при низких и высоких T_e . Таких недостатков лишены первопринципные методы в которых нет подгоночных параметров. В работе представлен первопринципный расчет коэффициента теплопроводности металла с горячими электронами, вычисленный по формуле Кубо-Гринвуда. Расчет проводится для жидкого алюминия в интервале T_e от 0 до 6 эВ. Полученная зависимость коэффициента теплопроводности от T_e хорошо согласуется с расчетами из кинетического уравнения [1].

Литература:

[1] Иногамов Н. А., Петров В.Ю. // *Теплопроводность металлов с горячими электронами* // ЖЭТФ 2010, Т. 134, №3, С. 505-529

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УДАРНОСЖАТОЙ ПЛАЗМЫ КСЕНОНА

Ю.Б.Запорожец¹, В.Б.Минцев¹, В.К.Грязнов¹, М. Винкель³, Х. Рейнгольц^{3,4}, G.Rörke³,
В.Е.Фортов^{1,2}

¹ *Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, Россия*

² *Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, Россия*

³ *Fachbereich Physik, Universität Rostock, 18051 Rostock, Germany*

⁴ *School of Physics, University of Western Australia, Crawley WA 6009, Australia*

Изучение взаимодействия градиентной плазмы и поляризованной электромагнитной волны при варьировании угла падения зондирующего излучения на границу раздела плазма-свободное пространство позволяет получить информацию о структуре переходного слоя динамического объекта, что необходимо для корректной интерпретации данных физического эксперимента. Экспериментальная зависимость коэффициентов отражения изучаемого объекта для поляризованных волн s- и p- ориентации, полученная при варьировании углов взаимодействия плазмы с зондирующим излучением может быть использована при численном интегрировании уравнений Максвелла для реконструкции профиля электронной концентрации в среде.

Представлены результаты новых экспериментов, в которых изучались поляризационные свойства сильнонеидеальной ударносжатой плазмы ксенона с использованием многочастотной и многоканальной по азимутальным углам система лазерной диагностики, позволяющей выполнять измерения поляризационных характеристик зондирующего излучения после отражения последнего от динамических короткоживущих объектов при варьировании угла между вектором Пойтинга и нормалью к фронту ударной волны в широком диапазоне - $\theta \sim 0^\circ \div 75^\circ$.

Измерение коэффициентов отражения поляризованного излучения проведены для плотной невырожденной плазмы следующих термодинамических параметров: плотность до $\rho = 2.8 \text{ г/см}^3$, давление до $P = 12 \text{ ГПа}$, температура $T = 3.2 \cdot 10^4 \text{ К}$, плотность электронов $n_e = 7.8 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, параметр кулоновской неидеальности $\Gamma = 1.9$.

Определены компоненты вектора Стокса и положения минимумов p-зависимостей индекса отражения при варьировании углов взаимодействия плазменного объекта и пробной волны в диапазоне $\theta = 0^\circ \div 70^\circ$ на частотах $\nu = 2.83 \cdot 10^{14} \text{ гц}$ и $\nu = 4.33 \cdot 10^{14} \text{ гц}$.

Полученные экспериментальные данные использовались при моделировании взаимодействия градиентной плазмы с зондирующей волной с учетом рассеяния электронов на атомах и наличия профиля температуры в переходном слое.

Создание теоретических моделей атмосфер звезд—гигантов как важный компонент исследований пиксельного линзирования и поисков экзопланет

А.Ф. Захаров

Институт Теоретической и Экспериментальной Физики

Поиски событий пиксельного линзирования в направлении Галактики Андромеды важны как для анализа распределения темной материи в нашей Галактике так и в гало Андромеды. Как было показано ранее, пиксельное линзирование представляет собой эффективный способ поисков экзопланет (в том числе маломассивных планет вблизи зоны обитаемости). Кроме того, аномалия RA-99-N2 может быть объяснена существованием экзопланеты с массой порядка 5—7 массы Юпитера. Поскольку для пиксельного линзирования особенно важны звезды—гиганты в качестве источников, линзирование которых приводят к наблюдаемым последствиям, создание детальных моделей звезд—гигантов, в частности моделей звездных атмосфер звезд—гигантов. Создание моделей атмосфер звезд—гигантов основано на алгоритмах типа ATLAS, развитых Куручем (1970). Уточнение этих моделей с учетом новых атомных баз данных и новых вычислительных возможностей крайне важно для создания перспективных моделей пиксельного линзирования.

ГРАНИЦЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛНОСТЬЮ ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ

А.И. Зилевич, И.Л. Иосилевский

МФТИ

Проведено исследование границ потери термодинамической устойчивости для популярного в астрофизических приложениях интерполяционного уравнения состояния полностью ионизованной плазмы произвольного состава (УРС Потехина и Шабрие [1]). Найдено, что для плазмы одного элемента область потери термодинамической устойчивости имеет вид фазового перехода 1-го рода типа газ-жидкость с верхней критической точкой с критической температурой, хорошо описываемой приближенным соотношением $T_c(Z) \approx T_c(1)Z^\gamma$, где $\gamma \approx ???$ и $kT_c(1) \approx ???$ eV. Структура и параметры рассчитанного в настоящей работе фазового перехода оказались очень близки к изучавшимся ранее (Иосилевский и Чигвинцев [2,3]) параметрам аналогичного фазового перехода в т.наз. “сдвоенной модели ОСР” (ДОСР(~)) - суперпозиции ионной и электронной моделей однокомпонентной неидеальной плазмы (ОСР) на однородно-сжимаемом компенсирующем фоне. В частности, оба обсуждаемых варианта фазового перехода обладают крайней степенью асимметрии границы двухфазной области. В данной работе вычислены и обсуждаются бинодали и спинодали фазового перехода, а также выполнение для них известных приближенных полуэмпирических закономерностей, а именно, правила прямолинейного диаметра и выполнение формы Гуггенхейма для границы двухфазной области в координатах плотность-температура.

[1] Potekhin A.Y., Chabrier G. *Phys. Rev. E* **62**, 8554 (2000); *Phys. Rev. E* **79**, 016411 (2009)

[2] Иосилевский И.Л. *ТВТ*, **23**, 1041 (1985) // *High Temp.* **23**, 807 (1985) [arXiv:0901.3535](https://arxiv.org/abs/0901.3535)

[3] Iosilevski I., Chigvintsev A., in “*Physics of Strongly Coupled Plasmas*” Eds. W. Kraeft and M. Schlangles, (World Scientific, Singapore-London, 1996) pp.145. / [arXiv:0902.2353](https://arxiv.org/abs/0902.2353)

Численное моделирование пылевого облака в страте тлеющего разряда в неоне

Зобнин А.В., Бухарин М.А., Усачев А.Д., Петров О.Ф.

ОИВТ РАН

Представлены результаты самосогласованных расчетов формирования плазменно-пылевой структуры из монодисперсных частиц в неподвижной страте разряда постоянного тока в неоне в разрядной трубке переменного сечения. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальным наблюдением формирования пылевого облака в условиях, соответствующих расчету. Приведены результаты оптической диагностики параметров разряда в области формирования страт.

Диффузия в ионных жидкостях. Исследование методом классической молекулярной динамики

Ивановский Г.Е., Стегайлов В.В.

Ионные жидкости — это расплавы обычно органических солей с температурой плавления ниже 100°C. Неправильная форма ионов приводит к меньшей энергии связи в кристаллическом состоянии и понижению температуры плавления. Их органическая природа позволяет тонко подстраивать свойства ионной жидкости под конкретную задачу.

Ионные жидкости используются как электролиты в суперконденсаторах и батареях. Помимо высокой энергетической емкости, сравнимой с удельной емкостью химических источников тока, суперконденсаторы обладают также временами зарядки/разрядки, практически не уступающими обычным конденсаторам. Кроме того, суперконденсатор практически не деградирует при зарядке/разрядке.

Использование ионных жидкостей в качестве электролита суперконденсаторов порождает ряд исследовательских задач. В частности, нужно исследовать диффузионные и вязкостные свойства ионной жидкости в пористой структуре электрода, поскольку именно они определяют времена зарядки/разрядки устройства. Системы, состоящие из ионной жидкости и электрода, сложны для описания и требуют применения квантовых подходов. В данной работе с использованием метода классической молекулярной динамики изучаются диффузионные характеристики системы, состоящей только из ионной жидкости.

Исследовались две ионные жидкости: тетрафторборат 1-бутил-3-метилимидазолия ($[bmim]^+[BF_4]^-$) и тетрафторборат N-метил-N,N,N-триэтиламмония ($[tema]^+[BF_4]^-$). Были получены данные, свидетельствующие о нетипичной временной зависимости среднеквадратичного смещения центров масс ионов. Обнаружен длительный переход между баллистическим режимом и диффузией по закону Эйнштейна—Смолуховского. Особое внимание в работе уделено количественной оценке статистических погрешностей результатов моделирования.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УДАРНОМУ СЖАТИЮ АЗОТА В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

И.Л. Иосилевский^{1,2}, В.К. Грязнов³, В.Е. Фортов^{2,3}

¹Московский физико-технический институт (Гос. Университет) г. Долгопрудный, МО, 141700Россия

²Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Ижорская ул. 13/19, 125412 Россия

³Институт Проблем Химической Физики РАН, Черноголовка, МО, 142432Россия

ilios@orc.ru

Термодинамические свойства азота в мегабарном диапазоне давлений обсуждаются на основе анализа экспериментальных данных по ударному сжатию азота, полученных в последние годы во ВНИИЭФ (Саров) [1,2]. Эти эксперименты дают важную информацию об адиабате Гюгонио плотного и нагретого азота в диапазоне давлений 100–350 ГПа и температур 10–80 кК с плотностью, в разы превышающей плотность конденсированного состояния. Совместный термодинамический анализ новых данных по термическому и калорическому уравнениям состояния азота позволяет установить совокупность достаточно жестких ограничений, которым должны удовлетворять все теоретические модели, претендующие на адекватное физическое описание термодинамики азота при этих параметрах. Следствием квази-изохорического хода экспериментально зафиксированной адиабаты Гюгонио в интервале 100–350 ГПа, в сочетании с зафиксированным в эксперименте квазилинейным поведением температуры на этом участке адиабаты, является одновременное постоянство в этой области параметров сразу нескольких термодинамических характеристик плазмы азота: параметра Грюнайзена, изохорической теплоемкости, термического коэффициента давления и т. наз. фактора сжимаемости.

Термодинамика ударно-сжатого азота анализируется теоретически с использованием т. наз. “химической модели плазмы” (код SANA-N), в рамках которой плазма азота описывается как плотная сильно неидеальная смесь взаимодействующих атомов, молекул, ионов и электронов. Для сравнения также привлекаются данные полуэмпирического уравнения состояния, развитого во ВНИИЭФ [2]. Эти расчеты сравниваются с предсказаниями других теоретических моделей, описывающих ударно-сжатый азот в более низком диапазоне давления ($P < 100$ GPa) как последовательность сменяющих друг друга молекулярного и полимерного состояний. Такое сравнение теоретических предсказаний, даваемых молекулярными и плазменными моделями, в совокупности с уже существующими и новыми экспериментальными данными, позволяет высказать предположение, что при $P \approx 100$ GPa, $T \approx 16000$ K, and $\rho \approx 3.3$ g/cm³ ударно-сжатый азот испытывает новый тип “ионизации давлением”, отличный от аналогичного процесса в водороде, происходящий не из молекулярного, как в водороде, а из полимерного состояния - в состояние плотной неидеальной плазмы. В свете этой проблемы обсуждаются перспективы и возможности новых экспериментов и первопринципных теоретических расчетов, способных пролить дополнительный свет на обсуждаемые особенности “ионизации давлением” в азоте.

[1] Мочалов М.А., Жерноклетов М.В., Илькаев Р.И., Михайлов А.Л., Фортов В.Е., Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Межевов А.Б., Ковалев А.Е., Киршанов С.И., Григорьева Ю.А., Новиков М.Г., Шуйкин А.Н., // *ЖЭТФ*, **137**, No. 1, 77-92 (2010)

[2] Трунин Р.Ф., Борисков Г.В., Быков А.И., Медведев А.Б., Симаков Г.В., Шуйкин А.Н., *Письма в ЖЭТФ* **88**, 220 (2008)

Термодинамические свойства бинарных кулоновских кристаллов.

А.А.Кожберов^{1,2}, Д. А. Байко^{1,2}

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, С-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, С-Петербург, Россия
kozherov@gmail.com

В данной работе изучается модель бинарной кулоновской кристаллической смеси. Предполагается, что вещество представляет собой кристалл, образованный атомными ядрами с двумя различными зарядовыми и массовыми числами (Z_1, M_1 и Z_2, M_2 , причём $Z_1 \leq Z_2$), и пространственно-однородный фон электронов, компенсирующий заряд ядер. В гармоническом приближении были исследованы свойства нескольких типов решеток: простая кубическая с двумя ионами в элементарной ячейке (ПКБ), объемно-центрированная (ОЦК), гексагональная плотно упакованная (ГПУ). Фононный спектр таких систем зависит от масс и зарядов, образующих их ядер. Условие вещественности частот фононов определяет границы устойчивости кулоновских кристаллов. Показано, что у устойчивой ПКБ решётки $\alpha \in [1, 3.6]$, у устойчивой ГПУ решётки $\alpha \in [1, 1.27]$, где $\alpha = Z_2/Z_1$; значения же масс ионов M_1 и M_2 на устойчивость не влияют.

Также были исследованы зависимости фононных вкладов в термодинамические величины (теплоёмкость, энтропия, давление и т.п.) от отношения зарядов, масс и температуры, проанализированы классические и квантовые асимптотики. В частности оказалось, что фононная теплоёмкость ГПУ решётки воспроизводит закон T^3 Дебая с заданной точностью при существенно более низких температурах, чем фононная теплоёмкость ОЦК решётки (при $T \approx 5 \times 10^{-4} T_p$ и $T \approx 10^{-2} T_p$ соответственно, где $T_p = \hbar \omega_p = \hbar \sqrt{4\pi n e^2 Z^2 / M}$ — плазменная температура ядер, n — концентрация ядер).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ-НЕМЕТАЛЛ ПЕРВОГО РОДА В ЖЕЛЕЗЕ С КРИТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ ОКОЛО 5 ГПА

V.N. Korobenko, A.D. Rakhel

*Объединенный институт высоких температур
125412, Москва, Ижорская 13, стр. 2*

rakhel@iht.mpei.ac.ru

Проведены прямые измерения удельного сопротивления и калорического уравнения состояния расширенного жидкого железа с целью изучения перехода в неметаллическое состояние. Результаты измерения удельного сопротивления показали [1], что переход происходит при плотности в 2 – 5 раз ниже нормальной плотности. В этом диапазоне плотности изохорический температурный коэффициент сопротивления меняет знак (с положительного на отрицательный), а электропроводность понижается до минимальной металлической. Результаты измерения термодинамических функций свидетельствуют о наличии фазового перехода первого рода с критической точкой в этом диапазоне плотности [2]. Этот переход отчетливо проявляется в виде изломов изохор в плоскости внутренняя энергия – давление и изэнтроп в плоскости давление-объем. Представлены аргументы, что этот фазовый переход является переходом Мотта первого рода, достоверно не наблюдавшийся ранее.

1. V. N. Korobenko and A. D. Rakhel, JETP, 112, 649 (2011).
2. V.N. Korobenko, A.D. Rakhel, arXiv:1101.0487v2 (2011).

**Особенности поведения вещества в области отрицательных давлений,
создаваемых действием лазерного импульса пикосекундной длительности**

И.К. Красюк, С.А. Абросимов, А.П. Бажулин, В.В. Воронов, П.П. Пашинин,

А.Ю. Семенов, И.А. Стучебрюхов, К.В. Хищенко

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

e-mail: krasyuk@kapella.gpi.ru

В сообщении представлены результаты экспериментальных исследований динамической механической прочности алюминия, сплава АМгбМ и полиметилметакрилата при воздействии на них импульсным лазерным излучением длительностью 70 пс. В предшествующих опытах авторов длительность лазерного импульса составляла 2.5 нс. Использование более коротких импульсов позволило реализовать в настоящем исследовании скорости деформирования выше 10^7 с^{-1} . Результаты экспериментов показали, что, при увеличении скорости деформирования откольные прочности исследуемых материалов имеют тенденцию к их существенному снижению по отношению к теоретическому пределу прочности. Было выяснено, что поведение вещества в области отрицательных давлений при использовании методов лазерного воздействия зависит в большой степени от предыстории динамического нагружения, включающей в себя много факторов, среди которых существенное значение имеют как амплитуда, так и длительность импульса ударного сжатия мишени.

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Э.Т. Кулатов¹, С.В. Лепешкин^{2,3}, М.В. Магницкая⁴,

Н.Л. Мацко², Ю.А. Успенский², Е.Г. Максимов²

¹ *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

² *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

³ *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл.*

⁴ *Институт физики высоких давлений РАН, Троицк, Московская обл.*

Представлены теоретические исследования сильно сжатого вещества, в которых высокие давление и температура являются или (1) внешними параметрами, изменяющими свойства системы, или (2) средством получения новых метастабильных фаз.

1. С помощью первопринципного численного моделирования методом квантовой молекулярной динамики (т.е. с полным учетом ангармонизма) вычислен динамический структурный фактор $S(\mathbf{q}, \omega)$ для кристаллического натрия в ОЦК и ГЦК фазах при давлениях 65–100 ГПа и температурах 250–700 К. Фононные частоты $\omega(\mathbf{q})$, определенные как центры пиков функции $S(\mathbf{q}, \omega)$, хорошо согласуются с нашим предшествующим квазигармоническим расчетом. Это позволяет заключить, что ангармонизм не оказывает существенного влияния на динамику решетки Na вплоть до температур вблизи кривой плавления.

2. Методом функционала плотности выполнен первопринципный расчет новых соединений CrGaSb и CrGa₂Sb₂, недавно синтезированных в системе Cr–GaSb при высоких давлениях и температурах. Измерения показывают, что метастабильная ферромагнитная фаза CrGa₂Sb₂, обладающая высокой температурой Кюри ($T_C \sim 350$ К), имеет также и высокое электросопротивление, что может быть признаком полупроводникового поведения. Расчеты хорошо воспроизводят магнитные и оптические свойства соединения CrGa₂Sb₂, однако характеризуют его как плохой металл с псевдощелью вблизи уровня Ферми. В то же время вид зонной структуры позволяет заключить, что в системе Cr–GaSb возможно образование полуметаллических фаз, что делает ее интересной с точки зрения спинтроники.

РЕКОМБИНАЦИЯ В НЕИДЕАЛЬНОЙ ИОННОЙ ПЛАЗМЕ ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА.

Ланкин А.В., Амиров Р.Х., Норман Г.Э.

ОИВТ РАН

Работа посвящена изучению процесса рекомбинации в плазме отрицательных и положительных ионов возникающей в послесвечении газового разряда. Экспериментальное изучение процесса рекомбинации в такой системе показало сильное подавление скорости рекомбинации по сравнению с классической моделью [1] для ионной плазмы, включающей ионы фтора или фторидов серы. При этом имеет место усиление отклонения скорости рекомбинации от результатов, предсказываемых классической моделью с ростом неидеальности системы

Объяснение таких результатов оказывается возможным в рамках подходов, основанных на использовании молекулярно-динамическое моделирование, позволяющих детально описывать взаимодействие между ионами и молекулами образующейся плазме, что даёт возможность дать адекватное описание влияния формирования рыхлых ионных пар на процесс рекомбинации в ней. Сделанное ранее исследование процесса рекомбинации [2] показало, что в неидеальной плазме должно происходить сильное подавление процесса рекомбинации плазмы за счёт формирования зоны многочастичных флуктуаций между областями парных связанных состояний и свободных электронов. При этом скорость рекомбинации в однозарядной плазме должна подчиняться соотношению:

$$K_e \tau_e = \begin{cases} 0.3 \cdot \Gamma^{9/2} & \text{при } \Gamma < 0.488 \\ 2.7 \cdot \Gamma^{9/2} e^{-4\Gamma} & \text{при } \Gamma > 0.488 \end{cases} \quad (1)$$

где τ_e – период плазменных колебаний, Γ – параметр неидеальности, а фактор $A = 4.5$. В случае ионной плазмы данное соотношение так же должно сохранять свою применимость, при этом в качестве величины τ_e следует брать формальную величину $\tau = \sqrt{\pi m / e^2 n}$, где m – масса лёгкого иона. Такая модель оказывается достаточна для описания процессов рекомбинации ионной плазмы в элегазе [1], однако, величина фактора A в этом случае превышает его значение в электрон-ионной плазме и оказывается равен $A = 6.75$, что объясняется увеличением ширины области многочастичных в ионной плазме по сравнению с электрон-ионной из-за дестабилизации пар вследствие их столкновений с нейтральной компонентой.

Если в случае ионной плазмы в элегазе предложенная модель позволяет достаточно хорошо описать зависимость скорости рекомбинации от параметра неидеальности, то в случае ионной плазмы во фторе снижение скорости рекомбинации с ростом неидеальности оказывается существенно сильнее, чем предсказывает модель (1). Объяснение этих результатов может быть сделано в предположении, что процесс рекомбинации неидеальной ионной плазмы происходит в два этапа. На первом происходит обратимое формирование рыхлой ионной пары, в которой рекомбинирующие ионы оказываются разделены сольватными оболочками. А на втором происходит переход рыхлой ионной пары в плотную с её последующей рекомбинацией. В тех случаях, когда рыхлая ионная пара оказывается малостабильной то двух стадийных характер рекомбинации мало влияет на её кинетику и она описывается моделью (1). Если же энергия активации распада пары оказывается достаточно велика, что имеет место в случае ионной плазмы во фторе, то лимитирующей фазой является вторая стадия, что ведёт к дополнительному снижению скорости рекомбинации в неидеальной плазме.

[1] Амиров Р.Х. // Дис. док. ф.-м. наук, 2001

[2] A. Lankin, G. Norman // Contrib. Plasma Phys. 2009. V.49, No. 10. P. 723 – 731

Пылевая плазма в условиях микрогравитации: результаты экспериментов на Международной космической станции

А.М. Липаев¹, В.И. Молотков¹, В.Н. Наумкин¹, О.Ф. Петров¹, В.Е. Фортов¹, Г. Морфилл²,
Х. Томас², А.В. Ивлев², С.А. Храпак^{1,2}, М. Швабе², О.В. Котов³, А.А. Скворцов³,
С.А. Волков³, М.С. Кудашкина⁴, А.Ю. Калери⁴, А.И. Иванов⁵,

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Институт внеземной физики Общества М.Планка, Гархинг, Германия

³Центр подготовки космонавтов им. Ю.А.Гагарина, Звездный

⁴Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П.Королева, Королев

⁵Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев

Представлен обзор результатов исследований физики пылевой плазмы в условиях микрогравитации с помощью уникальной экспериментальной установки «Плазменный кристалл-3 Плюс» («ПК-3 Плюс»), работающей на Российском сегменте Международной космической станции с января 2006 г. Использование установки «ПК-3 Плюс» позволяет получить новые сведения о свойствах пылевой плазмы. Область, свободная от микрочастиц, образующаяся в центре разряда, препятствует получению однородной и изотропной плазменно-пылевой системы. В «ПК-3 Плюс» закрытие центральной зоны возможно выполнить тремя способами: 1) уменьшением мощности высокочастотного разряда до минимально возможных значений; 2) использованием симметричного газового потока; 3) воздействием внешним низкочастотным электрическим полем. Последний способ был использован для осуществления фазового перехода от изотропной жидкостной плазменно-пылевой системы к так называемой электрореологической плазме. Переход является изотропным и полностью обратимым. Другое интересное явление – взаимопроникновение двух облаков частиц различного размера. В этих экспериментах первоначально формируется структура, состоящая из частиц диаметром 14,9, 9,19 или 6,8 мкм. Затем в сформировавшуюся структуру инжектируются частицы меньшего диаметра. Когда скорость проникающих частиц достаточно велика, наблюдается формирование проходов и цепочек (lane formation). Наблюдаемое явление представляет собой неравновесный переход, зависит от особенностей и динамики взаимодействия частиц и представляет интерес для различных областей физики. Экспериментальная установка «ПК-3 Плюс» позволяет провести исследование перехода жидкость-кристалл в большой (более миллиона сильнозаряженных пылевых частиц) трехмерной плазменно-пылевой системе. Выполнены эксперименты, свидетельствующие о наблюдении перехода от плазменного кристалла к плазменной жидкости. При снижении давления плазменно-пылевая система кристаллизуется. При дальнейшем повышении давления наблюдается плавление плазменно-пылевой системы. Наблюдаемое поведение большой трехмерной плазменно-пылевой системы противоположно поведению двухмерной плазменно-пылевой системы. Выполнены эксперименты по обнаружению фронта кристаллизации в трехмерной пылевой плазме.

Моделирование поглощения фемтосекундных лазерных импульсов медной мишенью

П.А. Лобода, Н.А. Смирнов, А.А. Шадрин, Н.Г. Карлыханов

Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Технической Физики (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Снежинск

Представлены результаты моделирования поглощения фемтосекундных лазерных импульсов медной мишенью. Расчеты проведены с использованием термодинамических функций, рассчитанных с помощью первопринципного полнопотенциального метода линейаризованных маффин-тин орбиталей (FP-LMTO) и химической модели плазмы, построенной с использованием суперкофигурационного подхода. Представлено сравнение результатов моделирования с экспериментальными и расчётными данными других авторов. Исследована роль электрон-ионного энергетического обмена, обсуждаются пути дальнейшего совершенствования представленной теоретической модели.

Пылевые структуры в плазме с сильной анизотропией функции распределения ионов по скоростям.

С.А. Майоров¹, С.Н. Антипов², О.Ф. Петров^{2,3}

¹ИОФ РАН, ²ОИВТ РАН, ³МФТИ, Москва

В сильном поле в газовом разряде, при значительном разогреве ионов и большом отличие атомных весов ионов и атомов, возможна очень сильная анизотропия функции распределения ионов по скоростям [1]. Поскольку анизотропия функции распределения ионов в свою очередь может вызывать значительное изменение свойств пылевых структур в плазме, одним из авторов работы была предложена идея экспериментов по разряду в смеси легкого и тяжелого газов. Параметры, которые в первую очередь важны при выборе газовой смеси – это потенциал ионизации, атомный вес и поляризуемость атомов. Кроме того, важную роль играет и процентное соотношение между различными газами. Выбором этих параметров можно обеспечить желаемые характеристики ионного потока. Например, разряд в гелии с добавкой незначительного количества тяжелого газа (например, криптона, ксенона) или паров металлов с большим атомным весом позволит получить резкое изменение характеристик ионного потока и следует ожидать, соответственно, значительного изменения свойств пылевых структур в таком разряде.

В работе [2] выполнены первые эксперименты по исследованию пылевых образований в газовом разряде в смеси двух газов – гелия и криптона. При этом, характерной чертой наблюдаемых плазменно-пылевых структур являлось формирование линейных, цепочечных структур, упакованных параллельно друг другу, и увеличение кинетической энергии пылевых частиц. Результаты выполненных в настоящей работе расчетов дрейфа ионов и электронов для смеси тяжелого, легко ионизируемого, газа (а может быть и паров тяжелых металлов – ртути, цезия и т.д.) позволяют описать наблюдаемое в экспериментах сильное влияние состава газа на характеристики плазменно-пылевых структур в разрядах. А именно, получать те особенности, которые обусловлены сверхзвуковым характером течения – конус Маха, анизотропию взаимодействия пылевых частиц и т.д.

Литература.

1. С.А. Майоров// Физика плазмы, **35**, 869 (2009).
2. С.Н. Антипов, М.М. Васильев, С.А. Майоров, О.Ф. Петров, В.Е. Фортов// ЖЭТФ, **139**, 554 (2011).

ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

Минцев В.Б.,^a Колесников С.А.,^a Дудин С.В.,^a Лавров В.В.,^a Уткин А.В.,^a Шилкин А.С.,^a
Юрьев Д.С.,^a Туртиков В.И.,^b Голубев А.А.,^b Шарков Б.Ю.,^b Фортов В.Е.^a

^a*Институт проблем химической физики Российской академии наук, 142432,
Черноголовка, пр. Семенова 1.*

minvb@icp.ac.ru

^b*ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, 117218,
Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25.*

В последние годы на установке для протонной радиографии, созданной на базе ускорителя ИТЭФ-ТВН, проводятся исследования ударно-волновых и детонационных явлений в веществе при экстремальных условиях. Энергия пучка протонов на данной установке составляет 800 МэВ интенсивностью – 10^{10} частиц, состоящий из четырех импульсов длительностью ~ 70 нс каждый с интервалом между импульсами ~ 250 нс. Пространственное разрешение установки, измеренное в статических экспериментах, составляет величину ~ 50 мкм. Для создания экстремальных состояний в исследуемых объектах используется энергия взрывчатых веществ (ВВ), поэтому экспериментальные мишени располагаются внутри специальной взрывозащитной камеры, рассчитанной на применение до 100 г ВВ в тротиловом эквиваленте. В работе представлены результаты последних экспериментов по исследованию детонационных процессов в прессованных и эмульсионных ВВ, термодинамических свойств ударно-сжатой неидеальной плазмы аргона и ксенона и явлений при выходе ударной волны на свободную поверхность металлов.

Электрические и термодинамические свойства гидрида лития (LiH) и оксида марганца (MnO) при высоких давлениях и температурах.

А.М. Молодец, Д.В. Шахрай, В.В. Авдонин, А.А. Голышев, В.Е. Фортов

Институт проблем химической физики РАН, 142 432 Черноголовка, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования электрических свойств ударно сжатых гидрида лития (LiH) и оксида марганца (MnO) в диапазоне давлений до 100-150 ГПа и температур 1500-2500 К. При этом первичной экспериментальной информацией (профили электропроводности) служила электропроводность образца непосредственно в течение микросекундных времён изменения его температуры и объёма при ударном сжатии.

Давление создавалось ударом металлических ударников, разогнанных до километровых скоростей продуктами детонации взрывчатого вещества. Использовались слоевые измерительные ячейки, состоящие из пластин-наковален и пластин электроизоляционного окружения, содержащего исследуемый образец, что обеспечивало его ступенчатое ударное сжатие. Эксперименты по измерению электросопротивления ударно-сжатого образца дополнялись полуэмпирическим описанием теплофизических свойств исследуемых материалов с последующим математическим моделированием и анализом результатов.

Показано, что в области давлений 95 ГПа и температур 2500 К образцы гидрида лития приобретают проводимость на уровне 0.1 См. Такое поведение гидрида лития можно объяснить как плавлением, так и полиморфным переходом в фазу высокого давления. В предположении фазового перехода построена его линия равновесия в диапазоне 50-320 ГПа.

Электропроводность оксида марганца увеличивается на порядки, достигая значений, характерных для металлов. По результатам эксперимента и расчётным значениям температур и давлений образцов найдена траектория появления высокой проводимости на фазовой диаграмме этого оксида. Изменение электропроводности ударно-сжатого оксида марганца интерпретируется как Моттовский переход диэлектрик-металл в области 30-60 ГПа и 2000-4000 К.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества».

Моделирование неидеальной плазмы методом молекулярной динамики с расщепленными волновыми пакетами

Морозов И.В., Валуев И.А.

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Метод классической молекулярной динамики (МД) широко применяется для моделирования равновесной и неравновесной неидеальной плазмы [1,2]. В то же время применение МД ограничено областью невырожденной и полностью ионизованной плазмы. Зачастую такая модель является слишком грубой для описания реальных экспериментальных условий. Одна из возможностей улучшить метод МД, не потеряв его эффективности, состоит в том, чтобы рассматривать электроны в виде волновых пакетов [3]. В этом случае отпадает проблема выбора псевдопотенциала электрон-ионного взаимодействия, улучшается точность моделирования элементарных актов соударений частиц, процессов ионизации и рекомбинации. При использовании антисимметризованных волновых пакетов добавляется учет обменного взаимодействия в рамках приближения Хартри-Фока [4]. Данный метод получил название молекулярной динамики с волновыми пакетами (МДВП, WPMD).

Недостатками существующих реализация метода МДВП является низкая точность описания связанных состояний электрона и иона, а также расплывание волновых пакетов для свободных электронов [5]. Обе эти проблемы предлагается решать на основе нового подхода, использующего базис из нескольких гауссовских волновых пакетов для волновой функции каждого электрона. Как показали расчеты, этот подход позволяет воспроизвести энергии основного состояния водорода и гелия с точностью не хуже 1% всего для трех гауссовских пакетов на электрон. Существенным преимуществом является также возможность моделировать квантовые эффекты, связанные с расщеплением волновой функции, например, прохождение через потенциальный барьер. В качестве примера в работе рассмотрена задача туннельной ионизации атома водорода в поле фемтосекундного лазерного импульса. Результаты, полученные новым методом, хорошо совпадают с квантово-механическими расчетами.

В дальнейшем планируется применить разработанный метод для моделирования связанных состояний электронов и ионов в неидеальной плазме, совместив его с классической моделью кулоновского взаимодействия для свободных электронов.

1. И.В. Морозов, Г.Э. Норман // ЖЭТФ **127**, 412 (2005).
2. T. Raitza, H. Reinholz, G. Röpke, I. Morozov, and E. Suraud, *Contrib. Plasma Phys.* **49**, 496 (2009).
3. D. Klakow, C. Toepffer, P. G. Reinhard, *J. Chem. Phys.* **101**, 10766 (1994).
4. B. Jakob, P. G. Reinhard, C. Toepffer, G. Zwicknagel, *J. Phys. A* **42**, 214055 (2009).
5. I.V. Morozov, I. A. Valuev, *J. Phys. A* **42**, 214044 (2009).

Измерение сжимаемости дейтериевой и гелиевой плазмы при давлении ~ 2000 ГПа

М.А.Мочалов^а, Р.И.Илькаев^а, В.Е.Фортов^{б, с}, А.Л.Михайлов^а, Ю.М.Макаров^а,
В.А.Аринин^а, А.А.Юхимчук^а, А.О.Бликов^а, В.А.Огородников^а, А.В.Рыжков^а,

^а*РФЯЦ-ВНИИЭФ, 607188, Саров, Нижегородская обл. Россия*

^б*Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, Россия*

Приведены результаты измерения квазиизэнтропической сжимаемости плазмы гелия и дейтерия в области давлений 1500–2000 ГПа с использованием экспериментальных устройств сферической геометрии и рентгенографического комплекса, состоящего из трех бетатронов и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений. В экспериментах измерены значения плотностей $4,3 \text{ г/см}^3$ и $3,8 \text{ г/см}^3$ в дейтерии и гелии при давлениях 2210 ГПа и 1580 ГПа соответственно. Внутренняя энергия дейтериевой плазмы при этом давлении составляет $\sim 1 \text{ МДж/см}^3$, что в ~ 100 раз превосходит удельную энергию химических конденсированных ВВ. Анализ данных показывает, что степень ионизации гелия при достигнутых параметрах сжатия составляет $\sim 0,9$.

Измерение квазиизэнтропической сжимаемости плазмы гелия при давлении ~ 5000 ГПа

М.А.Мочалов^a, Р.И.Илькаев^a, В.Е.Фортов^{b, c}, А.Л.Михайлов^a, Ю.М.Макаров^a,
В.А.Аринин^a, А.А.Юхимчук^a, А.О.Бликов^a, В.А.Огородников^a, А.В.Рыжков^a

^a *РФЯЦ-ВНИИЭФ, 607188, Саров, Нижегородская обл. Россия*

^b *Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, Россия*

Приведены результаты измерения квазиизэнтропической сжимаемости плазмы гелия с использованием экспериментального устройства сферической геометрии и рентгенографического комплекса, состоящего из трех бетатронов и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений. В эксперименте измерена плотность сжатого гелия ~ 9 г/см³ при давлении порядка 5000 ГПа. Анализ данных показывает, что при измеренных параметрах гелий находится в однократно ионизованном состоянии.

Одновременное измерение давления (линейный интерферометр) и температуры при соударении паров свинца и сапфирового окна в экспериментах с нагревом ионным пучком

Д. Николаев⁵, Б. Ионита,¹ С. Муссати¹, Д. Хоффманн^{1,2}, А. Хуг^{1,2}, Д. Варенцов¹, К. Вейрих¹, Э. Брамбринк³, А. Фертман⁴, А. Голубев⁴, А. Канцырев⁴, А. Худомясов⁴, В. Туртиков⁴, Н. Марков⁴, В. Минцев⁵, А. Пяллинг⁵, Н. Шилкин⁵, В. Терновой⁵, Л. Шестов⁵, Д. Юрьев⁵.

¹Технический университет Дармштадт, Германия, ²ГСИ, Дармштадт, ³ЛУЛИ, Париж, Франция, ⁴ИТЭФ, Москва; ⁵ИПХФ РАН, Черногоровка

В данном докладе будут представлены результаты экспериментов, выполненных в GSI, на экспериментальной площадке ННТ. Линейный интерферометр смещения в конфигурации Тваймана-Грина использовался для регистрации движения внешней поверхности сапфирового окна при нагружении его расширяющимися парами материала мишени (свинец), нагретого коротким импульсом ионного пучка; расстояние от поверхности мишени до сапфирового окна варьировалось от 0.4 до 1.5 мм. Из пространственных и временных профилей скорости было рассчитано давление паров свинца вблизи поверхности сапфира. Было зарегистрировано распределение давления вдоль поверхности сапфира, возникающее из-за квазигауссового пространственного распределения тока пучка. Оптический многоканальный пирометр использовался для одновременной регистрации температуры поверхности свинцовой мишени и паров свинца. Это стало возможным благодаря узкополосному диэлектрическому зеркальному покрытию, нанесенному на внешнюю поверхность сапфирового окна; отражая лазерное излучение интерферометра, оно оставалось прозрачным на рабочих длинах волн пирометра, В экспериментах были зарегистрированы давления до нескольких кБар, и температуры свыше 10 кК.

РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ В ЗАДАЧАХ ФИЗИКИ ВЕЩЕСТВА С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ.

Н.Ю. Орлов, О.Б. Денисов

Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований радиационных свойств плазмы, полученной в результате нагрева и сжатия различных материалов до состояния сверхвысоких температур и плотностей. Обсуждаются особенности теоретической модели плазмы, известной как ионная модель, которая используется для расчета радиационных характеристик плазмы сложного химического состава. Теоретический подход, основанный на использовании этой модели, применяется к плазме, которая может быть получена в результате взрыва проволок в X-пинче. Теоретическая оценка радиационной эффективности сравнивается с данными экспериментов по измерению полного энергосхода излучения X-пинча, где используются два типа проволок: из NiCr и из сплава Alloy 188. Проводятся расчеты радиационных характеристик плазмы (C12H16 O8) и (C8 H12 O6) для температурной диагностики плазмы пористых мишеней, которые применяются в экспериментальных исследованиях по физике экстремальных состояний вещества. Такие состояния создаются при взаимодействии пучка тяжелых ионов с плазменной мишенью.

КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА В СВЕРХСИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

М.И. Поликарпов
(ИТЭФ)

В нецентральных столкновениях тяжелых ионов возникают сверхсильные магнитные поля, которые кардинально меняют свойства кварк-глюонной плазмы, образующейся в этих же столкновениях. Происходит перемешивание сильных и электромагнитных взаимодействий, приводящее к ранее неисследованным экспериментальным эффектам. В докладе представлены результаты моделирования кварк-глюонной плазмы в сверхсильных магнитных полях, которые получены путем численных расчетов на многопроцессорных системах.

Формирование плотных пылевых структур и их структурные фазовые переходы в криогенной плазме неона

Д.Н. Поляков, В.В. Шумова, Л.М. Василяк, В.Е. Фортов
ОИВТ РАН
cryolab@ihed.ras.ru

Характеристики пылевых структур зависят от радиуса Дебая. Охлаждение пылевой плазмы до криогенных температур приводит к уменьшению расстояния между частицами и приводит к увеличению плотности пылевых структур. Ранее наблюдалось образование нитевидных неупорядоченных кластеров в тлеющем разряде.

В данной работе впервые экспериментально получена фазовая P-I (давление – ток) диаграмма состояния пылевых структур из частиц меламина-формальдегида диаметром 4,14 мкм в криогенной пылевой плазме в неоне при охлаждении от комнатной температуры до температуры кипения жидкого азота и приведенных давлениях 0,14-1,4 Тор.

Обнаружено, что расстояния между пылевыми частицами и формы пылевых образований имеют сложную зависимость от температуры тяжелой компоненты, давления газа и параметров разряда. При понижении температуры до $T = 200\text{K}$ в центре пылевой структуры наблюдалось образование плотного ядра, аналогично "центру кристаллизации". Дальнейшее охлаждение плазмы привело к образованию плотных равномерных структур с расстоянием 25-40 нм между частицами пыли, или цепочки кластеров с расстояния 125-150 нм между кластерами.

Наблюдались вертикальные колебания частиц пыли, амплитуда которых зависела от давления газа. Наблюдаемые колебания частиц можно объяснить изменением величины продольного электрического поля, которое обусловлено изменением плотности газа из-за продольного градиента температуры.

В отличие от разряда в воздухе, кластеры в плазме неона могли формировать регулярные структуры, напоминающие узлы гексагональной решетки. Было замечено, что с увеличением тока разряда кластеры плавятся, а расстояние между частицами и амплитуда продольных колебаний частиц возрастает. Увеличение давления газа приводит к слипанию кластеров в плотные однородные структуры.

Увеличение разрядного тока приводит к уменьшению продольного размера структуры пыли и увеличению ее диаметра. В отличие от экспериментов при комнатной температуре, в криогенной плазме не наблюдались пылевые структуры с центральной зоной, свободной от частиц при тех же токах разряда.

СЖАТИЕ КАНАЛА РАЗРЯДА В ГАЗЕ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

Ф. Г. Рутберг, А. А. Богомаз, М. Э. Пинчук, А. В. Будин,
С. Ю. Лосев, А. Г. Лекс, А. А. Позубенков

*Институт электрофизики и электроэнергетики Российской Академии наук (ИЭЭ РАН)
Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург, Россия*

Приводятся результаты исследований разряда с амплитудой тока 0.5 – 1.6 МА в среде водорода при начальном давлении 5 – 35 МПа, инициированного взрывом проволоки. Длительность первого полупериода разрядного тока 100-150 мкс. В этих условиях наблюдалось сжатие канала разряда, сопровождающееся мягким рентгеновским излучением. Обсуждаются эффекты, обусловленные высокой плотностью газа, окружающего канал разряда. В частности, к ним относятся увеличение критического тока, при котором начинается сжатие канала, и рост температуры осевой области канала разряда при увеличении начальной плотности газа.

Аномальные флуктуации давления и термодинамические неустойчивости в классической неидеальной плазме

Саитов И.М., Ланкин А.В., Норман Г.Э.

ОИВТ РАН, МФТИ

Предположение о плазменном фазовом переходе (ПФП) было выдвинуто в [1,2] по аналогии с газом ван-дер-Ваальса, в котором фазовый переход первого рода возникает в результате конкуренции дальнедействующего притяжения и короткодействующего отталкивания. Кулоновское взаимодействие между зарядами является дальнедействующим и, в силу поляризации их расположения в плазме, имеет в целом характер притяжения. Эффективное отталкивание на малых расстояниях возникает даже между электроном и протоном из-за квантовых эффектов. В отличие от неидеального газа, в низкотемпературной плазме присутствуют возбужденные атомы. Ограничение дискретного спектра в статистической сумме атома зависит от концентрации зарядов. В [3,4] было показано, что эта зависимость приводит к появлению в уравнении состояния нового слагаемого, имеющего характер эффективного отталкивания. Этот фактор может повлиять и на ПФП.

В [1 - 4] использовалась химическая модель плазмы. Более последовательным представляется применить флуктуационный подход [5], позволяющий производить самоогласованное совместное описание слабо связанных и свободных электронных состояний без их разделения. Используется метод молекулярной динамики. В качестве потенциала взаимодействия электронов и ионов выбирается кулоновский, обрезанный на глубине, не зависящей от концентрации и температуры частиц. Рассматриваемая система является равновесной. В работе исследовались флуктуации термодинамических параметров: температуры и давления. Было обнаружено, что распределение флуктуаций температуры – нормальное, что согласуется с классической теорией термодинамических флуктуаций. При рассмотрении функций распределения давления были обнаружены две особенности. (а) Была обнаружена область плотностей зарядов и температур, где функция распределения флуктуаций давления имеет явно выраженную асимметричную форму и может быть приближена суммой двух нормальных распределений. (б) Существует область параметров плазмы, где мгновенные значения давления могут быть отрицательны. Следует заметить, что данные области параметров находятся вне области действия вышеупомянутого стабилизирующего фактора. Так же была обнаружена область параметров плазмы, где давление системы заряженных частиц не зависит от плотности зарядов, и по аналогии с газом ван-дер-Ваальса была получена оценка критических параметров. Таким образом, полученный результат может служить косвенным указанием на существование двухфазной области в этом диапазоне параметров плазмы.

Литература.

- [1] Г.Э.Норман, А.Н.Старостин ТВТ. **6**, 410 (1968)
- [2] Г.Э.Норман, А.Н. Старостин. ТВТ Т. **8**, 413 (1970)
- [3] V.K. Gryaznov, I.L. Iosilevskiy, V.E. Fortov, J. Appl. Mech. and Tech. Phys. **3**, 70 (1973)
- [4] А. С. Каклюгин, Г. Э. Норман, Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том III-I (под ред. Фортова В. Е.) (Физматлит, Москва, 2004)
- [5] A. V. Lankin, G. E. Norman, J. Phys. A: Mathematical and Theoretical **42**, 214032 (2009)

Течение плазмы в лазерной мишени проекта КРЭШ и его чувствительность к уравнению состояния неидеальной плазмы и "плотного нагретого вещества"

*Игорь В. Соколов (Университет Мичиган),
Константин В Хищенко (ОИВТ РАН), Мишель Бускет, Марсель Клатиш (АРТЕП),
Барт Ван Дер Холст и Р. Пол Дрэйк (Университет Мичиган),*

Течение плазмы ксенона в мишени проекта КРЭШ [1] включает сильную ударную волну. Высокая плотность энергии в ксеноне, находящемся до выстрела при атмосферном давлении, создается с помощью десятипучкового лазера, являющегося частью установки Омега (энергия в пучках 4 КДж). При такой плотности энергии ударно-сжатый ксенон интенсивно излучает в диапазоне мягкого рентгена.

Известно, и многократно проверялось при сильных взрывах в атмосфере, что сильно излучающая ударная волна, распространяющаяся вдоль твердой преграды (при воздушном взрыве роль такой преграды играет земная поверхность), может существенно изменять форму – эффект Таганова. Излучение из-за фронта ударной волны может прогревать твердую поверхность, хорошо поглощающую излучение, которая, например, может прогревать узкий слой прилегающего воздуха за счет теплопроводности. По такому слою ударная волна может распространяться с более высокой скоростью, чем по невозмущенному воздуху, приводя к сильно неплоской форме волны с убегающим вперед предвестником.

В лазерных мишенях проекта КРЭШ физически сходная с эффектом Таганова конфигурация течения возникает из-за поглощения рентгеновского излучения из ударно-сжатого ксенона в пластиковой стенке газонаполненного цилиндрического капилляра, по которому распространяется ударная волна. Потоки излучения при этом столь интенсивны, что стенка еще до подхода к ней ударной волны начинает прогреваться до температур $T \sim \text{эВ}$, при этом возникает абляция вещества стенки по направлению к оси капилляра, формируя в ксеноне сходящуюся коническую ударную волну. Взаимодействие сходящейся волны с исходной волной, распространяющейся вдоль капилляра, может изменять конфигурацию последней – как и при эффекте Таганова.

Легко наблюдаемая при эксперименте и в численных расчетах ударно-волновая конфигурация оказывается весьма чувствительна к выбору уравнения состояния для вещества стенки. В настоящей работе мы приводим сравнение нескольких вариантов численного расчета течения плазмы в мишенях КРЭШ при различном выборе УРС полиимида, из которого выполнены капилляры в большинстве мишеней. Выбор согласующееся с экспериментом варианта позволит найти лучшую модель для полимера в диапазоне давлений, при котором вещество является не просто неидеальной плазмой, но еще и «тепло-плотной материей» (WDM). Численные модели и для УРС и коэффициентов поглощения представлены несколькими группами из России, США, Франции и Швейцарии. Расчеты течения проведены в модели радиационной гидродинамики с диффузионным многогрупповым переносом излучения.

[1] R.P.Drake et al, *High Energy Density Physics*, 7(1), 130-140 (2011)

СВОЙСТВА ФАЗОВОГО ПРЕХОДА ГАЗ-ЖИДКОСТЬ В SiO₂

*А.М.Соловьев*¹, *И.Л.Иосилевский*^{1,2,5}

¹МФТИ, Долгопрудный, Россия; ²ОИВТ РАН, Москва, Россия;

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия;

⁴UFTP, Frankfurt am Main, Germany; ⁵EMMI, Darmstadt, Germany

Высокотемпературная фазовая диаграмма перехода газ - жидкость с критической точкой, так же как и термическое (P, V, T) и калорическое (H, P, T) уравнения состояния (УРС) для двуокиси кремния (SiO₂) чрезвычайно важны для многих земных и космических приложений. Вместе с тем эти свойства диоксида кремния, включая параметры критической точки перехода газ-жидкость, недостаточно изучены теоретически, а экспериментальные исследования этих свойств трудны и немногочисленны. Поэтому важно сравнить существующие теоретические предсказания высокотемпературного поведения УРС кремния, и в частности, параметры его критической точки, предсказываемые различными теоретическими моделями и полуэмпирическими правилами. Все это важно сравнить с данными справочников и существующими экспериментальными данными. Такое сравнение проведено в настоящей работе. Для этого выбраны предсказания фазовой диаграммы и параметров критической точки, даваемые несколькими теоретическими моделями, сочетание которых не является исчерпывающим, но репрезентативно и показательно.

Атомистическое моделирование лазерной абляции металлов

Стариков С.В., Норман Г.Э., Стегайлов В.В.

Объединенный институт высоких температур РАН

Московский физико-технический институт

Лазерная абляция имеет множество технологических применений в микрообработке и создании поверхностных наноструктур. В то же время, механизм лазерной абляции во многом остаётся не ясным с точки зрения теории и моделирования. Проникновение импульсного лазерного излучения в вещество приводит к сильному нагреву электронной подсистемы. Характерное время установления теплового равновесия между электронами и ионами соизмеримо со временем самой абляции и временами кинетических процессов происходящих при этом (телоперенос, фазовые переходы, возникновение ударных волн и т.д.). Таким образом, процесс лазерной абляции происходит в крайне неравновесном состоянии двухтемпературного конденсированного вещества, теория которого только начинает развиваться. Данное состояние является промежуточным между нагретым конденсированным состоянием и плазмой.

В работе, на основании атомистической двухтемпературной модели, исследован процесс лазерной абляции золота и алюминия. Модель заключается в использовании приближения сплошной среды для электронной подсистемы и молекулярно-динамического моделирования для ионной подсистемы. Таким образом, совместно решаются система уравнений Ньютона для ионов и кинетическое уравнение теплопроводности для электронов. Электронная подсистема влияет на ионную подсистему через электрон-ионную релаксацию (ланжевеновский термостат в ионной подсистеме) и зависимость межионного потенциала взаимодействия от локального значения электронной температуры.

Результаты моделирования представлены в виде зависимостей глубины кратера от энерговклада, при различных характеристиках поглощенного импульса (варьировались длина волны и длительность). Проанализированы различные механизмы лазерной абляции и отмечена существенная роль электронного давления при описании данного процесса. Проведено сравнение результатов моделирования с имеющимися экспериментальными данными по абляции золота и алюминия.

О термосиле, действующей на пылевую частицу в полностью ионизированной плазме

А.А. Степаненко¹, Р.Д. Смирнов², В.М. Жданов¹, С.И. Крашенинников²

¹ НИЯУ «МИФИ», Москва, Каширское шоссе, 31, 115409

² University of California San Diego, La Jolla, California 92093, USA

Динамика пылевых частиц играет важную роль в различных плазменных средах [1,2]. Среди различных сил, действующих на пылевую частицу, выделяют силу сопротивления, возникающую за счет обмена импульсом между частицами плазмы и пылевой частицей. Одной из составляющих этой силы является термосила, обусловленная наличием градиентов температуры компонент плазмы.

В лабораторных экспериментах по пылевой плазме [1,2], при низких температуре и степени ионизации плазмы, обычно рассматривается термосила, вызванная нейтральными частицами. Однако недавно динамика пылевых частиц в термоядерных устройствах привлекла значительное внимание исследователей. Для описания динамики пылевой частицы в термоядерной установке необходимо учитывать различные силы, включая термосилу. В горячей термоядерной плазме степень ионизации высока, градиенты температуры компонент плазмы могут быть значительными, так что вклад заряженных частиц в величину термосилы становится преобладающим.

Выражения для термосилы, действующей на ион, хорошо известны [3]. Однако, в отличие от ионов, пылевая частица обладает конечными размерами и, таким образом, испытывает не только кулоновские столкновения с ионами и электронами плазмы, но и столкновения, приводящие к поглощению заряженных частиц. Общее выражение для расчета термосилы имеет вид:

$$\vec{F}_{dj} = m_j \int d^3\vec{v} \sigma_{dj}(\vec{v}) \vec{v} \vec{v} f_j(\vec{v})$$

где m_j , $f_j(\vec{v})$ - масса и функция распределения частиц сорта «j» соответственно, \vec{v} - относительная скорость частицы и пыли, $\sigma_{dj}(\vec{v})$ - сечение столкновения частиц сорта «j» и пыли.

В настоящей работе были получены выражения для ионной и электронной термосил и электронной силы трения, действующих на сферическую пылевую частицу в замагниченной полностью ионизированной плазме. Функция распределения частиц компонент плазмы при этом была взята в приближении 21N моментов метода Грэда. Кроме того, считалось, что пылевая частица имеет отрицательный либо небольшой положительный заряд, а её радиус много меньше ларморовского радиуса ионов и электронов [3]. Рассмотрены вклады в величины этих силы кулоновских столкновений и столкновений, приводящих к поглощению частиц. Было получено, что в зависимости от размера пылевой частицы может преобладать та или иная компонента термосилы. Для пылевых частиц, радиус которых больше радиуса Дебая, преобладает компонента термосилы, связанная с поглощением частиц. В противном случае преобладает компонента, связанная с кулоновским рассеянием частиц плазмы. Кроме того, было показано, что найденные силы могут играть важную роль в динамике пылевых частиц лишь в термоядерных устройствах с дозвуковым течением плазмы.

Доклад подготовлен на основе материалов одноименной статьи «On the thermal force acting on dust grain in fully ionized plasma» [4].

Литература.

1. P. K. Shukla and A. A. Mamun, Introduction to Dusty Plasma Physics (Institute of Physics, Bristol, 2002).
2. Complex and Dusty Plasmas, edited by V. E. Fortov and G. E. Morfill, (CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2010).
3. S. A. Khrapak, A. V. Ivlev, S. K. Zhdanov, and G. E. Morfill, Phys. Plasmas 12, 042308 (2005).
4. A.A. Stepanenko, R.D. Smirnov, V.M. Zhdanov, S.I. Krasheninnikov, Phys. Plasmas 18, 033702 (2011).

Роль квазисвязанных и континуальных состояний в термодинамических свойствах неидеальных молекулярных газов при повышенных температурах. Классический и квантовый подход.

А.Столяров^а, С.Суржиков^б

^а*Химический факультет, МГУ,
119991, Москва, Ленинские горы 1/3, Россия;*

^б*Институт проблем механики им. А.Ишлинского РАН,
119526, Москва, пр-т Вернадского 101/1, Россия*

Обсуждаются эффективные методы расчета термодинамических свойств сильно нагретых реальных газов в диапазоне температур 10 000 – 50 000К с учетом межатомного и внутримолекулярного (неадиабатического) взаимодействия образующих их частиц.

В частности, мы выполнили в широком интервале температур сравнительный анализ квантового, классического и квази-классического методов расчета термодинамических свойств молекулярного водорода и азота. Были вычислены внутренняя сумма по состояниям и теплоемкость данных веществ. При относительно низких температурах наблюдается хорошее согласие с имеющимися литературными данными, которое, однако, резко падает с ростом температуры из-за заметного вклада квази-связанных и континуальных уровней энергии. Утверждается, что учет несвязанных состояний, лежащих выше энергии диссоциации, является весьма существенным для корректного расчета термодинамических свойств, так как традиционный учет только вклада связанных состояний неизбежно ведет к нефизическому нарушению гладкости термодинамических функций системы при повышенных температурах.

Численно показано, что при низких температурах расчеты следует выполнять квантовым методом. При этом часто необходимо учитывать эффекты внутримолекулярного взаимодействия. При высоких и повышенных температурах приемлемую точность можно получить уже в рамках классического подхода, причем заметную погрешность метода, наблюдаемую при промежуточных температурах, можно эффективно учесть, введя поправки на квази-классичность движения.

Работа частично поддержана инициативным грантом РФФИ №11-03-00307а и в рамках 7ой европейской научно-исследовательской программы (грант №242311).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДА

Ж. Ж. Тасбаев, М. К. Досболаев, Т. С. Рамазанов, Л. Г. Дьячков*

*НИИЭТФ, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
Аль-Фараби 71, Алматы, Казахстан*

**Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия*

Исследовано влияние продольного постоянного магнитного поля на динамику пылевых структур в стратах тлеющего разряда постоянного тока. Целью работы является изучение влияния различных параметров разряда на вращение пылевых структур в стратифицированных разрядах под воздействием магнитного поля для более глубокого понимания механизмов такого воздействия.

Эксперименты выполнены на установке, описанной в [1]. Тлеющий разряд зажигался в цилиндрической стеклянной трубке диаметром 4.6 см, наполненной аргоном. Форма электродов коническая, расстояние между ними составляет 55 см. Магнитное поле создавалось двумя соленоидами, охватывающими разрядную трубку и размещенными так, чтобы страта с пылевыми частицами находилась в области однородного поля между соленоидами. Полидисперсные частицы Al_2O_3 инжигировались в плазму при помощи контейнера, расположенного в верхней части трубки. Визуализация пылевых частиц осуществлялась с помощью подсветки в горизонтальной или вертикальной плоскостях зондирующим лазерным лучом, который цилиндрической линзой формировался в плоский лазерный «нож» толщиной около 200 мкм. При прохождении тока через соленоиды наблюдалось вращение пылевой структуры. Движение частиц фиксировалось скоростной видеокамерой (250 кад/с). Получены зависимости скорости вращения от тока разряда и давления рабочего газа. Результаты эксперимента анализировались и сравнивались с данными других работ [2,3]. Выполненные оценки и предварительные расчеты показывают, что полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими представлениями о механизмах вращения пылевых структур в магнитном поле, развитыми в [4].

Литература:

- [1]. Ramazanov T.S., Dosbolaev M.K., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., Phys. Plasmas, 2008. **15**. 053704.
- [2]. Karasev V.Yu., Dzlueva E.S., Ivanov A.Yu., Eikhval'd A.I., Phys. Rev. E, **74** (2006) 066403.
- [3]. Vasiliev M.M., D'yachkov L.G., Antipov S.N., Petrov O.F., Fortov V.E., JETP Lett. **86** (2007) 358.
- [4]. Vasiliev M.M., D'yachkov L.G., Antipov S.N., Huijink R., Petrov O.F., Fortov V.E., EPL **98** (2011) 15001.

Измерение температуры в процессе динамического сжатия водорода до 150 ГПа и его фазовое превращение при сжатии.

Терновой В. Я., Николаев Д. Н., Пяллинг А. А., Квитов С. В., Фортов В. Е.

Институт проблем химической физики РАН

Проведена регистрация интенсивности оптического излучения водорода в процессе его динамического сжатия до конечных давлений 100-150 ГПа. Начальная плотность водорода задавалась его давлением при температуре жидкого азота, охлаждающего сборку. Измеренные температуры в состояниях максимального сжатия находятся в интервале температур 2500 - 7000 К. Зафиксирован пик температуры в конце процесса динамического сжатия во всех выполненных экспериментах. Вид экспериментально измеренного профиля температуры при сжатии исходно плотного образца (конечная температура сжатия находилась в диапазоне 2500-3700К) качественно отличается от полученного в результате гидродинамического моделирования с использованием многофазного уравнения состояния водорода [1]. Данный экспериментальный факт был объяснен формированием пленки «металлического» водорода на «холодной» поверхности LiF. В экспериментах с высокой конечной температурой данная пленка исчезала за времена проведения эксперимента. В экспериментах с температурой в состоянии максимального сжатия 6800К поведение водорода находится в согласии с поведением его «диэлектрической» фазы согласно модели [1]. Установлена оптическая прозрачность водорода в условиях данного эксперимента. Зарегистрированные состояния максимального сжатия с «диэлектрическим» и «металлическим» поведением на p - T диаграмме располагаются в соответствии с предсказаниями использованной модели уравнения состояния водорода.

Литература.

1. Пяллинг А. А. «Полуэмпирическое многофазное уравнение состояния водорода». ТВТ, т. 48, №2, стр. 1-7, 2010.

Разогрев колебаний пылевых частиц в плазме газового разряда

Тимофеев А.В., Норман Г.Э.

ОИВТ РАН

В лабораторных экспериментах было обнаружено, что пылевые частицы в плазме газового разряда при определённых условиях приобретают кинетическую энергию порядка 10 эВ и выше, что значительно превышает температуру ионов, а также температуру электронов в рассматриваемом разряде. Нередко средняя кинетическая энергия горизонтального движения значительно отличается от средней кинетической энергии вертикального движения пылевых частиц. Допустимость использования понятия «температура» для описания движения пылевых частиц и равенство её средней кинетической энергии также вызывает много вопросов у физического сообщества. В данной работе сделана попытка сформулировать механизм передачи энергии в плазменно-пылевой системе, объяснить эффект аномального разогрева колебаний пылевых частиц на основе учёта совместного влияния различных сил и явлений, а также сделана попытка обосновать допустимость использования термина «температура» и определить границы применения данного термина для описания динамики системы пылевых частиц.

Сформулирована система уравнений движения пылевых частиц в газовом разряде с учётом флуктуаций заряда и особенностей приэлектродного слоя газового разряда. Проведено молекулярно динамическое моделирование системы пылевых частиц. Использование метода молекулярной динамики позволяет учесть влияние на движение пылинок всех известных явлений в совокупности, включая нелинейные и стохастические. Варьирование параметров уравнений движения пылевых частиц позволяет обойти проблему отсутствия точных значений ряда параметров плазменно-пылевой системы. Предложен механизм передачи энергии от вертикальных колебаний к горизонтальным, основанный на явлении параметрического резонанса. Теоретические вычисления согласованы с молекулярно-динамическим моделированием. Построена схема переноса энергии от газового разряда к колебаниям пылевых частиц.

ФОРМИРОВАНИЕ КОРОНЫ И ПЛОТНОГО КЕРНА В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧЕК

Ткаченко С.И.^{1,2}, Жаховский В.В.^{2,3}, Пикуз С.А.⁴, Т.А. Шелковенко⁴

¹*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл., Россия;*

²*Объединенный институт высоких температур, РАН, Москва, Россия*

³*Университет Южной Флориды, Тампа, США*

⁴*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

При численных расчетах взрыва одиночных алюминиевых проволочек получено, что вещество, составляющее керны, длительное время находится в состоянии плотной неидеальной плазмы при температуре 1–3 эВ. Только после шунтирования основной части тока короной керн переходит в двухфазное состояние жидкость–пар в процессе расширения. Однако в том случае, если шунтирование основной части тока происходит на раннем этапе взрыва, например, когда большая часть вещества проволочки находится еще в жидком состоянии, возможен другой сценарий формирования структуры керна. В этом случае ввиду резкого падения сжимающего магнитного давления почти до нуля, вещество керна при разгрузке может по инерции проскочить в состояние растянутой жидкости с отрицательным давлением. В соответствии с молекулярно динамическими расчетами при распаде такого метастабильного состояния образуется сложная структура керна: внешняя цилиндрическая жидкая оболочка, заполненная малоплотным веществом в пенообразном состоянии. В дальнейшем пена распадается на капли, прежде чем распадается внешняя оболочка. Результаты расчетов находятся в качественном согласии с экспериментальными данными, полученными при обработке рентгеновских изображений взрывающихся проволочек.

Российско-европейский космический эксперимент “Плазменный кристалл – 4 Колумбус” – статус и цели работ.

А. Д. Усачев,¹ А. В. Зобнин,¹ О. Ф. Петров,¹ В. Е. Фортов,² М. Х. Тома,² Х. Хёфнер,² М. Кретчмер,² М. Финк,² Г. Е. Морфилл².

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

²*Институт внеземной физики Общества Макса Планка, Гархинг, Германия*

Проект "Плазменный кристалл-4" является логическим продолжением предыдущих проектов "ПК-1", "ПК-2", "ПК-3" и "ПК-3 Плюс" по исследованию плазменно-пылевых структур на борту обитаемых орбитальных станций в условиях микрогравитации. Главной его отличительной особенностью является оригинальная конструкция разрядной камеры трубчатой удлиненной формы, делающей возможными эксперименты по изучению течения сильнонеидеальной плазменно-пылевой жидкости и распространению различных типов плазменно-пылевых возмущений и волн. Кроме того, установка оснащена рядом различных плазменно-пылевых манипуляторов (мощный лазерный луч, подвижный ВЧ-индуктор, кольцевой электрод и локальный нагреватель), позволяющих значительно расширить спектр проводимых экспериментов. Эксперимент "ПК-4", изначально начинавшийся как российско-германский (постановщики ОИВТ РАН и Институт внеземной физики, Германия), в настоящее время расширил свою географию и включает участников из многих стран Европы, США и Японии.

Данное сообщение будет включать следующие разделы по описанию истории, статуса работ в настоящее время и целей проекта "Плазменный кристалл – 4 Колумбус" ("ПК-4К"):

- схему космического эксперимента "ПК-4К" и функциональное назначение различных частей космической аппаратуры;
- научную программу планируемых экспериментов на борту МКС;
- основные результаты тестирования аппаратуры "ПК-4" на борту специализированного самолета А-300 Zero-G;
- последние успехи в создании КА "ПК-4К" и схема ее расположения в европейском модуле "Колумбус" на борту МКС.

Данная работа была поддержана Программой Президиума РАН №12 (рук. ак. Фортов В.Е.), грантом Германского космического агентства № 50 WM 0804 и грантом РФФИ № 11-02-01333-а.

1. V. Fortov, G. Morfill *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **47**, 537B (2005).
2. A. D. Usachev, A.V. Zobnin, O. F. Petrov, V.E. Fortov *et al.*, PRL **102**, 045001 (2009).

О динамике пылевых частиц вблизи электрического зонда в плазме тлеющего разряда .

Усенов Е.А. , Досболаев М.К, Бастыкова Н.Х., Коданова С.К., Рамазанов Т.С.

*НИИЭТФ, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
Аль-Фараби 71, Алматы, Казахстан*

В работе экспериментально изучена динамика пылевых частиц в положительном столбе тлеющего разряда и численно рассчитаны траектории пылевых частиц вокруг электрического зонда с учетом силы ионного увлечения и силы торможения нейтралами [1,2]. С помощью введения пылевых частиц в плазму визуально определено наличие положительного ионного слоя вокруг зонда с отрицательным потенциалом относительно плазмы и были оценены его размеры. Изучены траектории уединенных пылевых частиц в зависимости от давления в разрядной трубке. Результаты показали что с увеличением давления в разрядной трубке траектория пылевых частиц существенно меняется. Наблюдаются большие углы отклонения частиц от начальной траекторий и вращение пылевой частицы вокруг зонда. Численные расчеты показывают, что с ростом давления сила ионного увлечения влияет сильнее силы торможения нейтралами и увеличивает притяжение пылевых частиц к зонду.

[1] Рамазанов Т.С., и др., *J.Phys.A:Math.Theor.*, **42**,214026(2009).

[2] Рамазанов Т.С., и др., *Physics of Plasmas* **15**, 053704(2008).

НЕРАВНОВЕСНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В ВОДЕ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ И ЕЕ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

О.А. Федорович,

Институт ядерных исследований НАН Украины; пр. Науки, 47, 03480, Киев

oafedorovich@kinr.kiev.ua

Одним из важнейших источников информации о параметрах плазмы в канале импульсных разрядов в воде (ИРВ) является его излучение. В работах [1,2] было показано, что излучение из канала ИРВ является неравновесным, а измеренные на разных длинах волн яркостные температуры плазменного канала могут существенно отличаться. Степень неравновесности зависит от начальных условий в разряде. В работе [3] показано, что излучение неидеальной плазмы (НП), полученной на магнитоплазменном компрессоре эрозийного типа, также неравновесно, а степень отклонения от равновесности излучения от АЧТ увеличивается с возрастанием напряженности электрического поля. Это связано с появлением сверхбыстрых немаксвелловских электронов, приводящих к повышению интенсивности излучения с большими энергиями квантов [4].

В работах [2, 5] неравновесность излучения НП ИРВ объяснялась влиянием градиента температуры наружных слоев плазменного канала и выходом коротковолнового излучения из больших глубин плазмы, где температура выше, чем в наружных слоях. Но этому объяснению противоречит то, что на начальной стадии разряда не наблюдается самая интенсивная линия водорода серии Бальмера H_{α} (656,3 нм) (даже в поглощении). Параметр неоднородности водородной плазмы, согласно [6], для линии H_{α} равен $M=0,95$ (а для сплошного спектра $M=0,91$ на $\lambda=600$ нм). Поэтому влияние неоднородности плазменного канала на интенсивность излучения водородной плазмы должно быть незначительным. Но различие в яркостных температурах, измеренных на длинах волн 400 и 700 нм, может отличаться вдвое [2], особенно при больших скоростях ввода энергии в канал ИРВ.

В данной работе приводятся результаты исследований влияния электрических параметров плазменного канала на неравновесность излучения НП. Обнаружено, что несмотря на то, что колебания интенсивности излучения плазменного канала не коррелируют с вкладом мощности в канал, величина степени неравновесности $\frac{\Delta T}{\Delta \lambda}$ К/нм коррелирует с колебаниями мощности. Наибольшая степень неравновесности практически всегда совпадает с первым максимумом тока. Рассматриваются также зависимости максимального значения неравновесности от начальной напряженности электрического поля в разряде; максимального тока в разряде; напряженности электрического поля в первом максимуме тока, длины разрядного промежутка при неизменном начальном напряжении на батарее. Обсуждаются возможные механизмы наблюдаемого эффекта.

1. E.Martin. Experimental Investigation of a High-energy Densiti High-pressure Arc Plasma. // J.Appl.Phys.–1960, V31, N2, p. 255-254.

2. Пасечник Л.Л., Старчик П.Д., Федорович О.А. Исследование непрерывного излучения ИРВ в диапазоне 400-700 нм. // Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы – т.1. Ленинград. 1983, С. 501-503

3. Kozlov N.P., Norman G.E., Protasov Y.S. Superradiation from non-ideal plasmas in electric field. //Phys.Letters.–1980, 77A, N6, p. 445-447.

4. Козлов Н.П., Протасов Ю.С. О механизме генерации быстрых частиц и коротковолнового излучения в сильноточных плазодинамических разрядах магнито-плазменного компенсатора. // Письма в ЖТФ. – 1981, 7, вып. 16, С. 1036-1041.

5. Войтенко Л.М., Кононов А.В., Порицкий П.В. Оптическое излучение импульсных электрических разрядов в воде. //Матер. 13 Межд. Научной школы-семинара ФИРКС 2007. Николаев. 2007. С. 14.

6. Методы исследования плазмы. Под ред. В. Лохте –Хольтгревена.–Мир 1971. - 552 с.

О РЕЗУЛЬТАТАХ СРАВНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСПАДА И ВРЕМЕН ЖИЗНИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НП ИРВ С РАСЧЕТНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ

О.А. Федорович, Л.М. Войтенко

*Институт ядерных исследований НАН Украины; пр. Науки, 47, 03480, Киев; e-mail:
oafedorovich@kinr.kiev.ua*

В работах [1-3] было показано, что коэффициенты распада (K_p), полученные в неидеальной плазме (НП) импульсных разрядов в воде (ИРВ) на несколько порядков ниже, чем рассчитанные по формулам для плотной водородной плазмы, непрозрачной для линий излучения Лаймановской серии [4]. При этом учитывалась также и ионизация плазмы [4], а рекомбинация считалась тройной. Сравнение K_p с расчетными по формулам для НП [5] также дали заниженные значения по сравнению с экспериментальными результатами на несколько порядков. При этом считалось, что характер рекомбинационного процесса в НП бинарный и рассматривались приближение ближайшего соседа и ячеечная модель [5]. Также были учтены изменения кулоновского логарифма при больших концентрациях электронов N_e [6]. Но экспериментальные значения K_p оказались намного ниже теоретических. Результаты экспериментальных измерений K_p начинают существенно сближаться с теоретически рассчитанными по [4, 5] только при снижении N_e до значений 10^{17} см⁻³ и меньше. Сближение результатов начинает проявляться с последовательным появлением в спектрах излучения водорода линий H_α (656,3 нм), H_β (486,1 нм), H_γ (4340,47 нм) и др. [7]. Это свидетельствует о том, что рекомбинация идет не только на основной уровень атома водорода. Существенный вклад в рекомбинацию вносят и более высокие уровни атома [8], которые начинают появляться в спектре излучения с уменьшением N_e [7].

Проводилось также сравнение экспериментальных значений K_p с теоретическими, рассчитанными по [9]. Экспериментально наблюдается изменение K_p на три порядка при увеличении Γ от 0,1 до 0,3. При дальнейшем увеличении степени неидеальности Γ значения K_p увеличиваются на порядок, проходят максимум и, при увеличении Γ от 2 до 4,5, наблюдается плавное уменьшение коэффициента распада на порядок. Качественно эти результаты совпадают с теоретическими расчетами по [9], хотя количественно есть расхождения. При $\Gamma < 1$ экспериментальные значения K_p на два порядка ниже расчетных, а при $\Gamma = 4$ они совпадают. Дальнейшее увеличение Γ приводит к тому, что теоретические значения скорости рекомбинации, вычисленные по [9], становятся меньше, чем экспериментальные данные. Из коэффициента распада можно получить среднее время жизни электронов и ионов (τ_j) в плазме. Проводится сравнение экспериментальных времен жизни с теоретическими, вычисленными по работам [4, 5, 9].

1. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. Experimental Researches of the Decay Coefficient of Nonideal Plasma Produced at Pulsed Discharges in Water. // Ukrainian Journal of Physics. 2008, v. 53, N 5, p. 450-457.
2. О.А. Федорович, Л.М. Войтенко. О коэффициентах распада НП при взрыве вольфрамового проводника в воде. // ВАНТ, сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения», вып.7 №4(68), 2010.
3. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. The empirical formula of dependence of factor of disintegration of nonideal plasma from electrons concentration. // Problems of atomic science and Technology, №1 (71), 2011, p. 122-124
4. L.C. Johnson, E. Hinnov. Ionization, recombination and population of excited levels in hydrogen plasmas. // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer, 1973, vol. 13, p. 333
5. Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов. Коэффициент рекомбинации в НП. // ДАН, 1987. Т.296. №33, с. 576-578.
6. Р.В. Митин, В.П. Канцедал, Г.П. Глазунов. Экспериментальное определение электропроводности плотной плазмы при малых значениях кулоновского логарифма. // Теплофизика высоких температур, 1975, том 13, №4, с. 706-711
7. О.А. Федорович, Л.М. Войтенко. Экспериментальные исследования коэффициентов распада неидеальной плазмы при концентрациях электронов не превышающих 10^{22} см⁻³. // Материалы XV международной научной конференции «ФИРКС», Николаев, 2011, с. 66-69
8. Ю.К. Куриленков. О влиянии неидеальности на коэффициент рекомбинации плотной плазмы // ТВТ 1980, 18, №6, с. 1312-1314
9. A. Lankin, G. Norman. Density and nonideality effects in plasmas // Contribution to Plasma Physics, 49, №10, 2009.p. 723-731

Ультрахолодная неравновесная плазма в однородном магнитном поле

Хихлуха Д.Р.***, Бобров А.А., Бронин С.Я., Зеленер Б.Б., Зеленер Б.В.*, Маныкин Э.А.**

* Объединенный институт высоких температур РАН

** Российский научный центр «Курчатовский институт»

*** Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ультрахолодная плазма- это неравновесная плазма, получаемая при сверхнизких температурах электронов $T_e \sim 1\text{K}$ при помощи ионизации лазерным излучением ультрахолодного газа с температурой $T < 10^{-4}\text{K}$. Изучение свойств этой плазмы методом молекулярной динамики [1-3] позволило установить, что температурная зависимость коэффициента столкновительной рекомбинации в области сильной неидеальности, когда параметр неидеальности $\gamma \geq 1$ (где $\gamma = e^2 n_e^{1/3} / T_e^{1/3}$, e – заряд электрона, n_e - концентрация электронов) меняется с $T_e^{-9/2}$ на T_e^{-2} . Это говорит о том, что процесс рекомбинации в сильно взаимодействующей плазме протекает медленнее, чем в слабонеидеальной.

В процессе изучения различных экспериментальных работ было обнаружено, что есть еще один фактор, который влияет на столкновительную рекомбинацию – это наличие магнитного поля. Причем, в случае ультрахолодной плазмы значения магнитной индукции магнитного поля, влияющего на этот процесс, начинаются с ~ 1000 Гс, что вполне достижимо в обычных лабораторных условиях.

При наличии магнитного поля, кроме радиуса Дебая, длины Ландау, плазма характеризуется ларморовским радиусом электрона, связанного с циклотронной частотой.

Эти три параметра длины, циклотронная частота и длина волны де-Бройля электрона определяют области классического и квантового описания движения частиц в плазме, а также область влияния магнитного поля на столкновительные и рекомбинационные процессы.

Для случая, когда ларморовский радиус много меньше длины Ландау и в области классического описания движения заряженных частиц в ультрахолодной плазме предложено выражение для коэффициента столкновительной рекомбинации. Это выражение получено по аналогии с формулой Томсона для плазмы без магнитного поля. Имеется хорошее согласие с экспериментальными данными по рекомбинации антиводорода [4].

Для изучения влияния магнитного поля во всем диапазоне значений магнитной индукции B , когда возможно классическое описание столкновительных и рекомбинационных процессов, методом молекулярной динамики были проведены расчеты модели ультрахолодной плазмы, аналогичной рассмотренной в [1-3], но с учетом влияния магнитного поля на уравнения движения частиц. Рассчитаны функции распределения, коэффициент диффузии в энергетическом пространстве, автокорреляторы скорости электрона и коэффициент рекомбинации при $\gamma \leq 0,5$.

Литература

1. Б.Б. Зеленер, Б.В. Зеленер, Э.А. Маныкин, Письма в ЖЭТФ, обзор, 9,696, 2010
2. А.А. Бобров, С.Я. Бронин, Б.Б. Зеленер, Б.В. Зеленер, Э.А. Маныкин, Д.Р. Хихлуха, ЖЭТФ, 139, 605, 2011.
3. С.Я. Бронин, Б.Б. Зеленер, Б.В. Зеленер, Э.А. Маныкин, Д.Р. Хихлуха, ЖЭТФ, 139, 822, 2011.
4. M. Amoretti, et al., ATHENA Collaboration, Nature (London), 456 (2002); G. Gabrielse, et al., ATRAP Collaboration, Phys.Rev.Lett., 213401 (2002); G.B. Andresen, et al., ALPHA Collaboration, Nature Physics (2011), doi:10.1038/nphys 2025, published online 05 June 2011.

Металлизация атомарного газа и переход пар-жидкость в парах щелочных металлов.

А.Л. Хомкин, А.С. Шумихин

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Под металлизацией атомарного газа будем понимать процесс делокализации электронов, находящихся в основном состоянии при сжатии газа атомов. Физические причины металлизации обусловлены появлением блоховских электронов (за счет перекрытия волновых функций) и увеличением (по абсолютной величине) энергии основного состояния (электронного терма) системы атомов в целом.

Основы теории металлизации атомарного газа заложены в работах Вигнера-Зейтца и Дж. Бардина. Результатом этой теории стали расчеты коллективной квантовой энергии связи (cohesive energy), сжимаемости и пр. для жидких щелочных металлов. Проявление эффектов металлизации следует ожидать в условиях, когда среднее межчастичное расстояние сравнивается с диаметром частицы и, следовательно, традиционное, попарно аддитивное описание межчастичного взаимодействия с использованием центрально-симметричных потенциалов не работает.

В данной работе, распространяя понятие энергии связи атомов (cohesive energy) на газовую область, строится физическая модель паров щелочных металлов с учетом эффекта металлизации атомарной компоненты. В рамках единого подхода модель охватывает газовую и жидкометаллическую фазы, претендуя на описание фазового перехода пар-жидкость. Предлагаемая модель развивает модель газообразных металлов Ликальтера.

Трудности применения теории Вигнера-Зейтца-Бардина к жидким щелочным металлам связаны с необходимостью учета ионного кора. Используются численные методы и различные способы экстраполяции, например метод квантового дефекта. В настоящей работе, придавая большое значение аналитичности модели, нами предлагается использовать в качестве внутриатомного потенциала щелочных атомов потенциал Кратцера, успешно использованного ранее для описания ионных молекул. По аналогии с потенциалом Леннарда-Джонса его можно назвать потенциалом (2-1). На больших расстояниях он имеет кулоновскую асимптотику, а на малых расстояниях содержит отталкивание, моделирующее наличие ионного кора. Уравнение Шредингера с потенциалом Кратцера имеет точное решение, что позволяет определить множитель при отталкивательном члене, приравняв найденную аналитически энергию основного состояния изолированного атома экспериментально измеренной величине.

Используя теорию Вигнера-Зейтца-Бардина для упорядоченной системы атомов с внутриатомным потенциалом Кратцера, рассчитана квантовая коллективная энергия связи (cohesive energy) для всех щелочных металлов во всем диапазоне размеров ячейки Вигнера-Зейтца. Эта энергия имеет два экстремума: минимум при жидкометаллических плотностях и небольшой максимум при более низких, когда радиус классической орбиты связанного электрона сравнивается с радиусом ячейки Вигнера-Зейтца, проходя через ноль между ними. Плотность, при которой энергия связи обращается в ноль близка к критической.

Термодинамика паров рассчитывается по термодинамической теории возмущений для однокомпонентной системы с учетом исключенного объема и металлизированной энергии связи атомов. Модель содержит фазовый переход пар-жидкость (петлю Ван-дер-Ваальса), параметры которого качественно согласуются с известными значениями. Выполнен расчет проводимости с использованием формулы Йоффе. Проводимость при околокритических температурах демонстрирует переход металл-диэлектрик. Обсуждается корреляция этого перехода и перехода пар-жидкость.

На наш взгляд, предлагаемый подход для учета эффектов металлизации («ионизации» давлением) атомарного газа открывает интересную перспективу дальнейшего развития термодинамических моделей плотных газов и жидкостей.

«Диэлектрическая катастрофа» и переход изолятор-проводник

А. Г. Храпак, В. Е. Фортов, Е. М. Апфельбаум

Феноменологическая концепция «диэлектрической катастрофы» была использована для объяснения экспериментально наблюдаемого при экстремально высоких давлениях перехода диэлектрик-проводник в гидридах металлов, водороде, инертных газах и щелочных металлах. Эта концепция в сочетании с простой ячеечной моделью применима в случае гидридов металлов и позволяет предсказать плотность перехода. Для остальных из указанных выше веществ концепция диэлектрической катастрофы не применима, однако ячеечная модель по-прежнему может использоваться для описания процессов металлизации и диэлектризации при экстремально высоких давлениях.

Влияние диссипации и неидеальности на теплопроводность пылевой компонентыЮ. В. Хрусталева^{1,2}, О. С. Ваулина²¹Московский Физико-Технический институт (Государственный университет)²Объединенный институт высоких температур РАН

Рассматривается квазидвумерная неидеальная диссипативная квазиравновесная система частиц, моделирующая пылевую компоненту комплексной плазмы. Модельный изотропный отталкивающий парный потенциал задается в виде

$$\phi(r) = \frac{(Ze)^2}{r} \exp(-r/\lambda),$$

где Ze – заряд частицы, а λ – длина экранирования потенциала. Для определения значения теплопроводности χ используется формула Грина-Кубо:

$$\chi = \frac{n}{sT^2} \int_0^\infty \langle \delta \mathbf{j}_Q(0) \delta \mathbf{j}_Q(t) \rangle dt,$$

где s – размерность системы, n – концентрация, T – температура, $\delta \mathbf{j}_Q$ – флуктуация поток тепла, который задается соотношением:

$$\mathbf{j}_Q(t) = \frac{1}{2} \mathbf{V} M V^2 + \frac{1}{2} \mathbf{V} \sum_{j \in \text{Sur}} \phi(\Delta r_j) - \frac{s}{4} \sum_{j \in \text{Sur}} (\Delta \vec{r}_j \vec{V}) \phi'(\Delta r_j) \frac{\Delta \mathbf{r}_j}{\Delta r_j},$$

где M – масса частицы, \mathbf{V} – ее скорость, а суммирование с индексом j производится по всем частицам, влияющими на выбранную частицу посредством парного взаимодействия.

Величина коэффициента теплопроводности полностью определяется двумя безразмерными параметрами (Γ^* и ξ). С уменьшением эффективного параметра неидеальности $\Gamma^* < 2$ отношение кинетической части коэффициента теплопроводности χ_k к коэффициенту диффузии D частиц в исследуемых системах стремится к величине близкой к коэффициенту теплоемкости при постоянном давлении $C_p \sim 2$. В этом же пределе для слабокоррелированных систем, как правило, наблюдаемых в эксперименте, кинетическая часть коэффициента теплопроводности χ_k приближается к его истинному значению χ .

Теплоперенос внутренней энергии (а именно, ее кинетической части и термической составляющей потенциальной энергии) обратно пропорционален коэффициенту диссипации в системе $\nu_{\text{dis}} \equiv \omega^* + \nu_{\text{fr}}$. При этом перенос тепла за счет «внешней» потенциальной энергии (связанной с собственным давлением частиц в системе) не зависит от коэффициента трения ν_{fr} и практически постоянен для всех $\Gamma^* > 10$.

Эта работа частично поддержана РФФИ (0-08-00389-а), CRDF (RUP2-2891-MO-07, Федеральным агентством науки и инноваций (МК-4112.2009.8) и Программой Президиума РАН.

РАСЧЕТ ИЗОЭНТРОПЫ СЖАТИЯ ДЕЙТЕРИЯ МЕТОДОМ КВАНТОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Ченцов А. В., Левашов П. Р.
ОИВТ РАН, Москва

В работе представлен расчет изоэнтропы сжатия дейтерия. Используется программа VASP [1], основанная на псевдопотенциальном методе функционала плотности с псевдопотенциалом PAW и обобщенно-градиентным приближением для обменно-корреляционного функционала. Используется метод квантовой молекулярной динамики, основанный на приближении Борна-Оппенгеймера. С помощью этого метода вычисляются давление и внутренняя энергия плотной дейтериевой плазмы. Расчеты выполнены в диапазоне температур 293–25000 К и плотностей 0.9–4.3 г/см³. Для восстановления изоэнтропы используется метод Зельдовича, результаты сравниваются с экспериментальными данными [2] и другими теориями. Положение вычисленной изоэнтропы слегка зависит от начальной точки, но согласуется с начальной частью экспериментальной изоэнтропы и точкой при самом высоком давлении (18 Мбар). Однако скачок плотности, зафиксированный в опытах [2], не обнаружен.

1. G. Kresse, J. Hafner, Phys. Rev. B. 1993, 47, 558; Ibid. 1994, 49, 14251.
2. V. E. Fortov et al., Phys. Rev. Lett., 2007, 99, 185001.

Гидриды легких металлов при высоких давлениях ударного сжатия.

Д.В. Шахрай, А.М. Молодец, А.А. Голышев, В.Е. Фортов

Институт проблем химической физики РАН, 142 432 Черноголовка, Россия

В работе представлены результаты по экспериментальному исследованию электрофизических и термодинамических свойств гидридов металлов и водородсодержащих соединений в областях фазовых диаграмм, которые достигаются квази-изэнтропическим сжатием в диапазоне давлений 10-150 ГПа.

Известно, что давление перехода чистого водорода в металлическое состояние по теоретическим оценкам составляет более 400 ГПа при комнатной температуре. Однако, эти параметры трудно достижимы на практике, как в алмазных наковальнях, где физически невозможно создать такие давления, так и в условиях динамического сжатия по причине сильного разогрева образца при таких давлениях. Вместе с тем существует целый класс гидридов металлов и водородсодержащих соединений, которые в обычных условиях являясь диэлектриками, при давлениях 90-150 ГПа обладают металлической проводимостью, причем проводимость обусловлена именно сближением атомов водорода, а не наличием атомов металлов в молекуле. В зависимости от природы связи все гидриды условно делятся на ковалентные, ионные и металлоподобные. Интерес к изучению ковалентных гидридов обусловлен еще и тем фактом, что появление проводимости в них связано в основном с эффектом так называемого *химического предсжатия водорода* в молекуле.

В работе исследованы электрофизические и термодинамические свойства ковалентных, ионных и металлоподобных гидридов на примере LiH, MgH₂ и TiH₂ соответственно. Показано, что в условиях ступенчатого сжатия до 140 ГПа эти гидриды приобретают проводимость на уровне 0,1-2 Ohm⁻¹, которая коррелирует с полиморфными переходами между фазами высокого давления.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества».