УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

совещания и конференции

537.56

VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ЯВЛЕНИЯМ В ИОНИЗИРОВАННЫХ ГАЗАХ

(22-27 августа 1965 г., Белград, Югославия)

VII Международная конференция по явлениям в ионизированных газах проходила через два года после одноименной конференции во Франции (июль 1963 г.) и почти одновременно с близкими по тематике конференциями: по физике электронных и ионных столкновений в августе в Квебеке (Канада) и по физике горячей плазмы (проблемы управляемого термоядерного синтеза) в сентябре в Калэме (Англия). На белградской конференции рассматривался ряд вопросов, представляющих общий интерес и перекрещивающихся с тематикой двух вышеуказанных конференций. Так, работала секция электронных и ионных столкновений и в ряде секций рассматривались вопросы, имеющие непосредственное отношение к физике горячей плазмы (нагрев, устойчивость и т. п.). Взаимосвязь этих конференций как по тематике, так и по срокам стала традицией, ряд делегатов был на всех конференциях.

Конференция в Белграде была весьма представительной. В ней участвовало

Конференция в Белграде была весьма представительной. В ней участвовало 944 делегата из 27 стран, в том числе 136 делегатов от Советского Союза, 134 от ФРГ, 130 от США, 112 от Англии, 102 от Франции, 57 от Югославии, 46 от ГДР, 37 от Гол-

ланлии и т. п.

За шесть дней работы конференции на ее шести одновременно работавших секциях было сделано около 600 докладов, из них 105 от советской делегации. Одновременно проводились неофициальные заседания — обсуждения особенно острых проблем (неустойчивости плазмы, Q-машины, лазеры и плазма, ударные волны в плазме, 0-пинчи и т. п.). Каждое утреннее и вечернее заседание начиналось с обзорных лекций (по 45 мин.; их общее число 9). Доклады на конференции отличались многочисленностью, разнообразием по тематике и по ценности. Длительность докладов составляла 10—15 мин.

Все доклады на конференции были сгруппированы по тематике в пяти секциях: 1. Электронные и ионные столкновения. 2. Поверхностные явления. 3. Электрические разряды в газах. 4. Физика плазмы. 5. Методы диагностики и применения.

Из одного перечисления названий секций видпа широта программы конференции, отражающей современные тенденции в развитии физики ионизированных газов.

В ходе дальнейшего изложения мы попытаемся отразить содержание основных докладов конференции, выбор которых весьма затруднителен и в какой-то степени определяется вкусами авторов.

1. ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ (25 ДОКЛАДОВ)

В обзорном докладе Ш у л ь ц а (США) рассматривались связанные состояния электронов с атомами и молекулами, проявляющиеся в виде «резонансов» при столкновениях их с электронами при малых энергиях; давался анализ механизма возбуждения при понизационных и диссоциативных столкновениях. Х а с т е д (Англия) дал анализ работ по неупругому взаимодействию ионов и атомов с атомами и молекулами при энергиях в сотни эв и выше. (Сообщались наиболее важные результаты, доложенные на конференции в Квебеке.) Б и о н д и (США) проанализировал механизмы потерь электронов в ионизированных газах. А ф р о с и м о в (СССР) рассмотрел методы диагностики с использованием корпускулярных пучков.

Доклады на секции были посвящены следующим проблемам. Проводилось определение коэффициента рекомбинации в плазме и газах (Томас, Хэкем, Ленном, Бальфур, Харрис (Англия); Бреме (ФРГ); Кузнецов,

Райзер, Саясов (СССР)). Сообщалось о получении численных значений подвиж-Раизер, Саясов (СССР)). Сообщалось о получении численных значений подвижности ионов при различных температурах и давлениях, в частности при экспериментах с плазменным инжектором (Айбер, Фример, Манге (ФРГ)). Определялась частота столкновений и подвижность электронов в плазме (Ингрехем, Уорд (США)). Изучалась вероятность прилипания и отщепления электронов (Прасад (Англия); Риси Джори (Австралия)), а также ионизации и диссоциации; определялись коэффициенты Таунсенда, в этом отношении оригинальны исследования разряда в тритии (Эдельсон (США)). Представляют интерес работы по диссоциации ионов H_2^+ в электрическом поле (Уинд (Англия)) и ионизации атомов водорода в сильном магнитном поле до $60~\kappa sc$ (Боровик, Бусол, Коваленко, Скибенко (ФТИ АН УССР)).

2. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ (44 ДОКЛАДА)

2.1. Взаимодействие с твердым телом (28 докладов)

Рассматривалось взаимодействие электронов и ионов с твердым телом (эмиссия заряженных и нейтральных частиц, отражение ионов от бомбардируемой поверхности, фотодесорбция и газоотделение при ионной бомбардировке). Обзорный доклад Перович (Югославия) был посвящен вопросам бомбардировки мищеней ионами высокой энергии.

В работах по электронной бомбардировке поверхности твердого тела сообщалось как о статистике вторичной электронной эмиссии, которая оказалась близкой к распределению Пуассона для малых энергий первичных электронов и к экспоненциальному — для больших (Филиппов (ФТИ АН СССР)), так и о десорбции и диссоциации окиси углерода на поверхности молибдена при воздействии медленными электронами (Дегра, Лекант (Франция)).

Наибольшее число докладов (17) относилось к явлениям, происходящим при бомбардировке ионами поверхности твердого тела (часто монокристалда). Основные результаты этих работ сводятся к следующему. Энергетический спектр ионов, отраженных от поверхности монокристалла, имеет тонкую структуру — ряд характерных пиков, соответствующих соударениям определенной кратности (Парилис (ФТИ АН УССР), Молчанов, Соошка, Машкова (МГУ)). Коэффициент отражения ионов H_1^+ , H_2^+ , H_3^+ с энергией в интервале 3-25 кв от молибдена и вольфрама прямо пропорционален массе иона (Мак-Кракен, Маил (Англия)).

При воздействии ионов криптона на поверхность (110) меди обнаружено отклонение максимального распыления от направления плотной упаковки атомов, что связано со спецификой строения этой грани (Вайсенфельд (Голландия)). Различие в угловой зависимости распыления монокристаллов ряда металлов может быть объяснено разной длиной образующихся в них цепей сфокусированных соударений (Ондерделинден, Сарис (Голландия)). Существует немонотонная зависимость интенсивности распыления в плотноупакованном направлении от угла падения ионного пучка на грань монокристалла (Ю расова, Буханов (МГУ)). Распыление монокристалла меди в среде кислорода приводит при определенных условиях к эпитаксиальному наращиванию на него слоя окиси с ориентацией, отличной от случая окисления при нагреве (Мейер, Хейман, Трийё (Франция)).

В изучении электронной эмиссии, возникающей при ионной бомбардировке, необходимо учитывать неадиабатический характер передачи энергии при оже-нейтрализации (Хэгструм (США)). Коэффициент ионно-электронной эмиссии зависит нелинейно от массы изотопа элемента (стронция, вольфрама, криптона и др.), бомбардирующего мишень из никеля или сплава медь — бериллий (Д е б е в е ч (Югославия)). Электронная эмиссия из сплава медь — бериллий прямо пропорциональна энергии и заряду ионов инертных газов для интервала 3—10 каз (Ш р а м и др. (Голландия)). Вид кривых зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии монокристаллов меняется для разных бомбардирующих ионов и их энергий (Машкова (МГУ)). Для изучения ионной и электронной эмиссии целесообразно использовать импульсную технику, позволяющую практически безынерционно регистрировать указанные процессы (А р и ф о в (ФТИ АН УССР)).

Энергетическое распределение ионно-электронной эмиссии обнаруживает на фоне непрерывного спектра отдельные пики, соответствующие однократным соударениям ионов с атомами мишени. Положение пиков дает возможность определить неупругие потери. Для комбинации $Ar^+ - 50 \kappa g - Al$ они составляют 450 - 600 g зависят от угла вылета ионов (угла рассеяния), но не зависят от направления падения ионного пучка на поверхность (Даль, Магьяр (Дания)). При бомбардировке ионами Ar* с энергией 40—90 къв грани (110) Си и газообразной мишени из Си, обнаружено, что неупругие потери не зависят от агрегатного состояния вещества мишени (С н о е к и др. (Голландия)). Исследована температурная зависимость

газоотделения при ионной бомбардировке алюминия, серебра и тантала ионами ксенона с энергией 80 кв (Жокич, Перович (Югославия)) и стекла ионами инертных газов с энергией в несколько кв (Грант, Картер (Англия)). Температурная зависимость и величина эффективности газоотделения показывают, что процесс сводится к испарению атомов инертного газа из тепловых клиньев, возникающих при ионной бомбардировке (Грант, Картер (Англия)).

2.2. Эмиссия из твердого тела (16 докладов)

При исследовании плазмы, образованной в пламени смеси спирта и воздуха, обнаружена низкотемпературная электронная эмиссия (Т э р к о т, В о л ь ф (США)). Сообщается об измерениях работы выхода, омического сопротивления и излучения оксидного катода во время эмиссии; наблюдалось усиление излучения в видимой и инфракрасной областях (Б л о с, М у ц (ФРГ)). Приведены результаты изучения обратимых и необратимых флуктуаций токов в предпробойной области разряда в вакууме (Ю т н е р, В о л ь ф (ГДР)). Автоэлектронная эмиссия из Au - Cs - O-катода с заметными токами получена при поле $10^3 - 10^4$ e/cm (Х о л л (Англия)). Фотоэлектрические определения работы выхода для Ni, Мо, Ti, Ва в неоне и аргоне проведены при хорошо очищенных поверхностях катодов (М и л о в а н о в а, Ч и ст и к о в (МИФИ)). Рассматривалась работа выхода тугоплавких карбидов, металов и графита при различных условиях их обработки в парах цезия (Б о л ь ш о в (ФТИ АН СССР)).

Ряд докладов был посвящен взаимодействию газовых молекул с поверхностью твердых тел. Новая модель твердого тела использовалась при расчете аккомодации молекул для случая чистой поверхности и поверхности, покрытой монослоем адсорбированных молекул (Триллинг (США)). Опыты по рассеянию медленных нейтронов метаном, адсорбированным на древесном угле, были проведены с целью обнаружения дискретных энергетических уровней адсорбированных молекул (Комса пдр. (Румыния)). Дано объяснение явлению сильного выделения СО2 и N2 из нержавеющей стали при температурах 600—1000° С (Арманд, Лапюжулад,

(Франция)).

Приведены основные кинетические характеристики адсорбции и десорбции газов на поверхности вольфрама, полученные методом прокаливания катода (вспышками) (Агеев, Ионов, Устинов (ФТИ АН СССР)). Представлены доклады по термоионной эмиссии и поверхностной ионизации: термоионные свойства рения и некоторых других тугоплавких металлов (Запдберг, Тонтегоде (ФТИ АН СССР)), положительная поверхностная ионизация атомов и молекул на неметаллах (Зандберг, Палеева), поверхностная понизация щелочных металлов на накалённом вольфраме (Макфарлан, Кинней (США)), влияние кристаллической структуры вольфрама на поверхностную понизацию металла (Бидерман, Вальхер (ФРГ)), теоретическое исследование вольт-амперных характеристик цезиевого диода (Дерфлер, Бургер (США)), термически ионизированная плазма с отрицательными ионами (Голер и др. (США)).

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ (150 ДОКЛАДОВ)

3.1. Разряды низкого давления (77 докладов)

Представлены в основном работы по пробою при низких давлениях (12 докладов) и тлеющим разрядам (16 докладов), несколько работ посвящено вакуумным дугам, пеннинговскому разряду, высокочастотному разряду и процессам в магнетронах.

- пенинговскому разряду, высокочастотному разряду и процессам в магнетронах. а) Пробой при низких давлениях. Исследованы (Бурмакин (СССР)) положительная корона, пробой и переход к тлеющему разряду для коаксиальных электродов в водороде при давлениях $50-1600\ mop$. Дан расчет относительной заселенности возбужденных и метастабильных уровней ртути в функции E/p и указана их роль при пробое (О вертон, Давиес (Дания)). При исследовании стабильности нарастания тока в мощных ртутных разрядах обнаружены небольшие колебания тока, связанные с ударными волнами в разряде (Паркер, Мангаи (Англия)). Определены пробойные напряжения для благородных и молекулярных газов для широкого интервала значений pd (в частности, для малых pd) (Ш онхубер (Швейцария)). Исследованы предпробойные процессы и пробой в вакууме с точки зрения приложения к вакуумным искровым разрядникам (О у е н, Бейнон (Англия)).
- б) Тлеющие разряды низкого давления. Исследованы характеристики тлеющего разряда в различных газах в широком диапазоне токов и давлений (Клярфельдидр. (ВЭИ)). На базе этих исследований предложена новая классификация тлеющих разрядов на основе их электрических свойств

и световых характеристик. Этими же авторами получен тлеющий разряд с высокой плотностью тока (общий ток через разрядную камеру достигал 1000 а). Исследована контрактация положительного столба газового разряда и дана теория этого явления (Каган, Голубовский (ЛГУ)). Исследован обрыв тока в газовом разряде при ограничении поперечного сечения разряда апертурой (Фрезер и др. (США)). Исследовалась оптическая подкачка положительного столба гелиевого разряда, и обнаружено образование возбужденных молекул гелия (Харт, Коллинс (США)). Ряд работ посвящен исследованию природы страт в тлеющем разряде, исследованию плазмы в области катодного падения потенциала, исследованию разряда в полом

Проведено исследование стационарной дуги постоянного тока в вакууме (Маном, Ринглер (ФРГ)). Дуга стабилизировалась аксиальным магнитным полем, ток в дуге — 2.6 ка.

в) Пеннинговские разряды. Дан расчет стартовой электрической напряженности для начала пеннинговского разряда в магнитном поле (И с а к и е в а, P е й х p у д е л ь (МГУ)). Исследовался тороидальный пеннинговский разряд (Б е p е з и н, И о ф ф е, К а л м ы к о в (ФТИ АН СССР)).

г) Высокочастотные разряды. При исследовании ВЧ разряда обнаружено, что введение возбужденных молекул ведет к снижению пробойного напряжения (фон Энгель, Виданд (Англия)). Исследована ионизация и нагрев предварительно ионизированной плазмы с помощью мощного микроволнового излучения от магнетронного импульса (Блок и др. (США)). При исследовании ионизации магнитным полем в тороидальных камерах обнаружено, что ионизация наблюдается только для момента прохождения магнитного поля через нуль и отсутствует в остальном интервале времени (Бревильд (ФРГ)).

Было представлено также несколько работ по циклотронному резонансу.

3.2. Разряды высокого давления (73 доклада)

Были представлены в основном работы по пробою и начальным стадиям развития искровых каналов (21 доклад) и исследованию дуг высокого давления (26 докладов). Кроме того, представлен ряд работ по сильноточным импульсным разрядам,

взрыву проволочек и разрядам, инициированным лазером.

- а) Предпробойные процессы и искры. Рассмотрена роль поля пространственного заряда в развитии электронной лавины при пробое (Х е й-(Англия)). Результаты работы позволили объяснить экспериментально наблюдаемую величину дрейфовой скорости электронов в лавине и ее радиальное сжатие. Исследован переход электронной лавины в стример (Вагнер (ФРГ)). В системе координат, движущейся с электронами, скорости фронтов стримера к аноду и катоду одинаковы; величина скорости зависит от типа газа, E/p и p. Обпаружен значительный разброс в величине пробивных напряжений газов при высоких давлениях (Льюйс (Англия)). Предполагается, что неустойчивый характер пробоя связан с образованием на одном из электродов микроразряда, инициирующего основной пробой. Исследовались предразрядные процессы в тригатроне (Шкуропат (ЛПИ)). После подачи поджигающего импульса между основными электродами наблюдалось два токовых импульса, время развития которых соответствовало времени задержки основного разряда. Изучался разряд наносекундной длительности в коаксиальном промежутке (3 и г м о н д (Норвегия)). При пробое образуется канал диаметром 0.05 мм с плотностью тока 10^6 a/cм². На фронте катода обнаружен слой пара высокого давления, выброс которого происходит в момент прекращения токового импульса. Доложено подробное исследование стримерной и искровой стадий разряда по поверхности диэлектрика (Дашук (ЛПИ)). Исследовалось развитие импульсного разряда в смесях цезия с инертными газами (Волков (СССР)). В этом случае разряд расширяется медленно и напоминает волну горения в слабовоспламенимых смесях.
- высокого давления. Изучалось резонансное излучение б) Дуги и параметры разрядов в парах щелочных металлов при высоких давлениях (К а йлесс (Англия); Смит (США)). При токах $10-20~a/cm^2$ и температуре плазмы от 2000 до 3500 °K разряды дают интенсивное излучение на резонансных линиях, ширина которых превосходит 1000 Å. Рассчитаны характеристики гелиевой дуги высокого давления в охлаждаемой трубке в зависимости от диаметра трубки и разрядного тока (Питт, Винзор (США)). Исследованы сильноточные аргоновые дуги высокого давления, которым посвящено несколько докладов. В каскадной дуге имеет место следующий баланс энергии: 70% вложенной энергии передается уходящей из дуги плазме, 20% — сжимающей трубке, 10% — аноду и около 1% — катоду (П ф е и д е р и др. (США)). Рассчитаны параметры переноса для плазмы каскадной дуги в зависимости от внешних нараметров и температуры (Фишер, Уленбуш (ФРГ)). Выполнены спектральные исследования, определены характеристики

плазмы и эпергетический баланс дуги. Дано распределение температуры в свободно горящей аргоновой дуге при давлениях до 100 атм. (В о н п др. (ФРГ)). Доложено исследование потерь на излучение и теплопроводность в ртутиом разряде высокого давления (Эленбаас (Голландия)). Дан метод расчета радиационных потерь для неизотермической горячей и холодной плазмы (Абрамов, Коган (ИЛЭ)).

Несколько работ посвящено исследованию дуг в магиптных полях.

в) И м п у л ь с н ы е р а з р я д ы. Исследован личейный высоковольтный разряд с гоком 220 ка через понрзированный канал диаметром 10 мк, ударные волны, спектральный и временной характер излучения (Кабаниес, Скавронек (Франция)). При разряде мощной батарей конденсаторов через канал дуги, горящей при давлении 100 атм, нолучен разряд, по свойствам аналогичный прямому ппичу (Б о р о в и к и др. (ФТИ АН УССР)). Илотность заряженных частиц в илазме $10^{19}~cm^{-3}$, температура ($3 \div 7$)- $10^4~^{\circ}$ К.

г) В з р ы в а ю щ и е с я проволочки. Взрывающаяся проволочка просвечивалась импульсом рентгеновского излучения (Че й с и др. (США)). Исследования показали, что ток течет по понизированному слою, окружающему проволочку; плотность частиц во время взрыва и темпой паузы $10^{22}\ cm^{-3}$. Исследовался взрыв литиевых проволочек при малых энергиях (Якобп и др. (Израпль)). Получен разряд, по свойствам апалогичный обычному разряду в парах щелочных металлов при высоких давлениях.

д) Разряды, пипципрованные лазером. По исследованию разрядов в газе, вызванных лазером, было представлено 4 советских работы (ФИАН, МГУ и ИАЭ). Также исследовался пробой в фокусе неодимового дазера мощностью 20 Мвт в различных газах при давлениях от 1 до 25 атм. Исследованы свойства илазмы и спектрально-временные характеристики излучения (К ретто и и др. (Франция)).

п спетарально-временные характеристики излучения (К р е т т о и и др. (Франция)). Среди прочих работ нужно отметить исследование магинтно-стабилизованной высокотемпературной гелиевой и водородной плазмы ($n_e = 10^{16} \ c.u^{-3}, \ T = 2 \cdot 10^{5} \ ^{\circ}$ К, длительность стационарного состояния 1,5 мсек) (В у л ь ф (ФРГ)). Исследован безэлектродный высокочастотный разряд в благородных газах при давлениях до $20 \ amm$ (М и г и и др. (ФТИ АН УССР)). Полученный разряд но свойствам аналогичен обычной дуге высокого давления. Описан импульсный источник типа лаймановского разряда со сплощным спектром излучения для вакуумного ульграфиолета (Стейнберг (Югославия)).

Среди доложенных работ не были представлены исследования прямого пинча и мощных наносекундных искр, получаемых с помощью малопидуктивных конден-

саторов.

4. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ (231 ДОКЛАД)

4.1. Процессы транспортировки (19 докладов)

Обзорный доклад Делькруа (Франция) был посвящен вопросу электрической проводимости плазмы. Приводятся теоретические и экспериментальные работы по явлениям переноса в плазме: электропроводности, теплопроводности и диффузии. Дается теория явлений транспортировки с получением коэффициентов проводимости, теплопроводности и диффузии (Рамазашвили, Цинцадзе (ИФ АН ГрузССР)), а также электрической проводимости (Огава (Япония)) для слаботурбулентной плазмы. Приводятся расчеты ВЧ проводимости илазмы (Клеванс, Ву. Примак (США)). Исследуется электропроводность частично понизпрованной плазмы (Долик (Франция)), нелинейная проводимость (Кальма, Помо (Франция)). Обсуждается влияние небольшой примеси многозарядных понов на температуру дейтериевой плазмы (Коган, Чашечкин (ИАЭ)). Измеряется теплопроводность в цезпевой и азотной плазме. В ударной трубе проведены измерения сечения рассеяния электронов с энергиями 0,2—1 эв (3 а у д е р е р (США)). Изучена диффузия плазменного столба, окруженного металлическим цилицаром, при наличии магнитного поля, имеющая не амбинолярный характер (Гейслер (ФРГ)), а также диффузия при отсутствии экрана (Кано, Маттиоли (Франция): Польман (Голландия)); диффузия плазмы термононизированных щелочных металлов (Q-машина) (Роджерс, Вольф (США)).

4.2. Плазма магнитном поле (22 доклада)

Проведен ряд работ по исследованию взаимодействия илазменных сгустков с магнитными нолями (Бостик (США); Круиник, Шулика, Демченко, Демидсико, Ломино, Падалка, Сафронов, Синельни-ков (ФТИ АН УССР); Комельков, Церевитинов, Васильев (ИАЭ); Аллен, Кокс, Спадлинг (Англия); Поффе, Сэнд, Ваэльброек (Франция)). Рассматривалась инжекция плазмы из различных инжекторов

¹/₄ 9 УФН, т. 89, вып. 2

(коакснальных, конических и т. д.) вдоль или поперек магнитных полей. Имеется работа по цезневой плазме в магнитном поле и несколько работ по 0-пинчу, в частпо **0**-пинчу в магнитном поле (Волков, Дятлов, (ФТИ АН УССР)). Представляет интерес эксперимент по нагреву электронов плазмы (до 40 кж) мощным СВЧ полем в магнитной ловушке при электронно-циклотронном резонансе (Фессенден, Смуллин (США)) и измерения флуктуаций плотности (10—30%) плазмы при турбулентном движении на установке «Зета» (Робинсон, Расбридж (Англия)). Заслуживают внимания весьма наглядные работы по моделированию космической плазмы и ее взаимодействия с магнитным полем Земли. Проведены эксперименты по взаимодействию быстрых плазменных потоков с трехмерными магнитными диполями (Ваник, Касаи, Пирс (США): Осборн, Башинский (Канада); Кавашима, Мори (Япония)) с использованием зондовой и фотографических методик.

4.3. Взаимодействие воли с плазмой (65 докладов)

а) Электронные волны (18 докладов). Приводится ряд теоретических работ, посвященных распространению волн в горячей бесстолкновительной плазме, в магнитном поле (Татаронис, Кроуфорд (США); Патарая (ФИ АН ГрузССР); Кивер, Морикава (США)), поверхностных волн в плазменном волноводе (Лепреиц (Франция)), резонансным частотам бесконечной одномерной неоднородной плазмы (Харкер, Кино (США)); решению линеаризованных уравнений Власова (Хейбек (ГДР)), исследованию движения электронов с релятивистскими скоростями вблизи циклотронного резонанса (Ш р а м, Ш радер (Голландия)) и т. д. Изучается прохождение микроволи через цезиевую плазму с измерением концентрации и частоты соударений электропов (Бальфур (Англия)), поглощение 4-мм сигнала вблизи 2-й гармоники электронной циклотронной частоты в плазме стелларатора С (Арунасалам, Гарни, Месервей, Давидсон (США)). Проводятся измерения на 1200 Мец стоячих электростатических волн (поперек пеоднородной плазменной колонны) вблизи электронно-циклотронных гармоник (Грубер, Бекефи (США)). Заслуживают внимания измерения с циклотронными волнами в бесстолкновительной плазме (плазменная колонна длиной 2 м, диапазон частот от 30 до 520 Мгц). Тщательно исследованы волны с частотой вблизи циклотронной частоты (две - выше и одна - ниже) (В ортон, Маль-

берг (США)). б) Ионные б) Йон йые волны (18 докладов). В целом ряде работ исследовалось возбуждение и распространение низкочастотных колебаний в плазме, в частности поннозвуковых, ионноциклотронных и магнитозвуковых волн. Рассматривается возбуждение низкочастотных колебаний в магнитоактивной плазме вблизи ионноциклотронных и гибридных частот (Ломинадзе, Степанов (СССР)). Изучение возбуждения альвеновских воли в частично ионизированной плазме в области частот намного меньших ионной циклотронной частоты, позволяет оценить сечения валимодействия ионов с нейтральными атомами (Браун, Уотсон-Мунро (Австралия)). Проводится измерение фазовых скоростей и затухания ионных колебаний в слабо ионизированной плазме (Сесслер (США)). Изучено распространение электростатических звуковых волн трех типов в ртутном разряде (Крауф о р д. К у п е р (США)). Представляет интерес исследование свойств ионнозвуковых воли в илазме с $T_e\gg T_i$ (Д ж о и с, А л е к с е в (США)). Полученные зависимости от массы ионов, температуры электронов, отсутствие дисперсии, бесстолкновительный характер подтверждают теорию. Эти волны фокусируются, прямолинейно распространяются, интерферируют, не отражаются от твердых поверхностей. Изучено возбуждение двух типов волн плотности в положительном столбе газового разряда (Барретт (Англия)). Измерения дисперсии и поглощения электроакустических волп в плазме дают значения в пределах 10% теоретических (Вудс, Литтл, Джонс (Англия)). Наблюдалась модуляция СВЧ сигнала понными волнами плазмы (Пануцци, Магистрелли (Италия)). Имелись также работы по возбуждению воли вблизи ионной циклотронной частоты и ее гармоник. Изучались электрические и магнитиые поля, возбуждаемые на гармониках ионной циклотронной частоты (вилоть до 70-й) в илазме с концентрацией $3\cdot 10^9~cm^{-3}$ и средней эпергией понов 700 к $_{76}$ (Белл, Келли, Лазар, Стреттон (США)). Рассматривалось распространение электромагнитных воли вблизи циклотронной частоты и ее гармоник (Парколаб, Кино (США)). Для диагностики плазмы может быть использовано изучение формы линий ионного циклотронного резонанса (Глен, Браун, Вайтхауз (США)). Резонансный нагрев плазмы ВЧ магнитным полем изучен в области частот $\omega_{H,\,i} \leqslant \omega \ll \omega_{H,\,\rho}$ (Чечкин, Васильев, Григорьева, Смердов, Лонгинов (ФТИ АН УССР)).

в) Волны в системе плазма— пучок (14 докладов). Имелся целый ряд докладов по взаимодействию пучков заряженных частиц с плазмой. Показано несогласне результатов эксперимента с линейной теорпей пучковой неустойчивости (Абрахам, Кроуфорд (США)). При взаимодействии пучков с плазмой при наличии сплыных магнитных полей наблюдались низкочастотные волны (Хопман, Кистмекер, Матити, Вермер (Голландия)). Эти волны отождествлялись с поннозвуковыми. Наблюдались гибридные частоты и частоты, кратные $\omega_{H,e}$, вплоть до 3-й гармоники, а также интенсивное излучение на частотах, близких к плазменной. Эти эффекты интерпретируются как циклотронное возбуждение плазменных колебаний. В ряде работ (Иден (Англия); Литтл. Авис (Англия): Перулли, Этьеван, Лютод (Франция)) изучалось взаимодействие двух встречных потоков плазмы. Сильное взаимодействие оказалось не связанным с соударениями частиц. Анализируется теоретически неустойчивость пучков, нижектируемых в плазму поперек внешнего магнитного поля (Нойфельд, Райт (США)). Экспериментально изучались потери знергии пучка в плазме, находящейся в магнитном поле (Херман (ФРГ)). Исследовалось возбуждение колебаний в плазме, находящейся в магнитном поле (Апель, Стоун (США)). Получено удовлетворительное согласие с теорией, учитывающей ограниченность плазмы. г) Ускорение плазмы бегущими электромагнитными волнами, распространяющимися в передающих линиях. Эксперименты по радиационному ускорению плазмы осуществляются в 10-см диапазоне (напряженность поля несколько кв/см) на волне H_{11} в круглом волноводе (Геккер, Гольц, Кононов, Саркасм, Силин, Цопп (ФИАН)).

4.4. Излучение плазмы (38 докладов)

а) Излучение, испускаемое свободными нами (16 докладов). В большинстве работ исследуется радпоизлучение плазмы, находящейся в магнитном поле. Проводятся как спектральные измерения, так и регистрация отдельных гармоник электронно-циклотронной частоты. Так, измеряется форма линий циклотронных гармоник гелиевой плазмы пеннинговского источника на частотах 18 и 36 Ггц (Дрейсер (США)), спектр излучения в СВЧ диапазоне (до 35 линий) ртутного разряда в магнитном поле (Кроуфорд, Икегами (США)), проводятся абсолютные измерения интенсивности излучения (от $\lambda=4$ мм до 0,2 мм) горячей плазмы (40—80 кэв) в поле 30—60 кгс (Л и х т е н б е р г, С е снич, Трайвелпис (США)), сообщаются результаты исследования излучения на 8,8 $\Gamma e u$ разряда с регистрацией гармоник циклотронной частоты $\omega = n \omega_H$ (до 10-й), гармоник с $\omega = \left(n + \frac{1}{2}\right) \omega_H$ и надтеплового излучения вблизи $\omega = \omega_H$ (II а вличенко, Душин, Кузнецов, Адамов (ФТИ АН УССР)). Механизмы излучения анализируются Бойдом (США), Каноббпо и др. (Франция), Рёшлем (ФРГ). Голдом (США) и др. Представляют интерес также работы по отрицательному поглощению излучения и отрицательной проводимости частично понизированных газов (Танака, Такаяма и др. (Япония)). Интересны исследования излучения вблизи гармоник электронно-циклотронной частоты в положительном столбе разряда постоянного тока при наличии внешнего СВЧ поля, т. е. при нагреве электронов плазмы, приводящем к более интенсивному возбуждению воли в плазме и увеличению числа линий в спектре (Танака, Такаяма (Япония)). Особенно интересно получение (Ваник, Граннан, Свансон (США)) сильного излучения от пеннинговского источника в 500 вм в 3-ся дпалазоне и 30 вт в 1-см диапазоне при плазменной частоте вблизи электронно-циклотронной частоты (электроны с энергией до 200 кэв).

б) Теория спектральных линий (ушпрение спектральных линий) *). Определение интенсивности, спектроскопп ческие исследования плазмы. Перенос из лучения (22 доклада). Обзорный доклад Лохте-Хольтгревена (ФРГ) был посвящен в основном ушпрению спектральных линий в илазме. Приведенный экспериментальный материал показывает, что по уширению линий можно определить концентрацию электронов с точностью порядка 20%.

В ряде работ — Иенсен (Дания); Эрман (Франция); Машке, Вослембер (Франция); Шлютер, Авила, Дурхэн (США); Бриджес, Визе (США); Видал (ФРГ) — исследовалось уширение водородных спектральных линий в плазме. В первой из этих работ обсуждался эффект поляризации лиший, связанный с наличием микронеустойчивостей в плазме. Во второй и третьей работах исследовалось влияние магнитного поля на уширение линий.

^{*)} В этот раздел включены также работы по уширению спектральных линий в плазме, доложенные в секции, 5.1, в).

Было новазано (Грим (США)), что сдвиг сиектральных линий нонов, вызываемый поляризацией плазмы, существенно меньше, чем это следовало из предыдущих оценок автора, и вряд ли имеет практическое значение.

Обсуждалась возможность изучения упругого и неупругого рассеяния медленных электронов на атомах (Собельман (ФИАН)) спектроскопическими мето-

дами (по уширению спектральных линий).

Дано обобщение (Фрис (Голландия)) известной процедуры выделения эффекта давления при наличии допплеровского уширения на случай контуров с отлич-

ным от лоренцева спаданием интенсивности в крыдьях линии.

Предлагается новый метод измерения электронной температуры по отношению сдвига и ширины спектральных линий (Бриджес, Купер (Англия)). Возможность практического использования этого метода вызывает сомнение. В той области, где отношение сдвига к ширине чувствительно к температуре, вычисления сдвига становятся малоначежными. К тому же при этом, как правило, сдвиг мал и труднов эмерим.

45. Проблемы устойчивости (30 докладов)

Основные вопросы устойчивости плазмы были освещены в обзорном докладе Каломцева. На секции рассматривались доклады по электростатическим нестабильностим илазмы малой плотности, инэкотемпературной илазмы и т. и. Доклады, непосредственно связанные с термоядерной проблемой, практически отсутствовали. Примерно половина сообщений относилась к неустойчивостям системы илазма — пучок. Отмечается выявление ВЧ нестабильности илазмы при относительном электроннопонном дрейфе с $T_i > T_e$ (К леванс, Примак (США)). Рассмотрено влияние радиального электрического поля на спектр дрейфовых воли (Байков, Богданкевич, Рухадзе (ФИАН)). Изучены нестабильности электронных и плазменных пучков в магнитном поле (Незли (ИАЭ)). Теоретическое исследование по электростатическим нестабильностям в анизотропной плазме в магнитном поле (Холл, Хекротт (США)) является развитием работы Розенблюта и Поста. Отмечаются преимущества Q-машин для плазменных экспериментов. Обнаружен

Отмечаются преимущества Q-машии для плазменных экспериментов. Оонаружен ряд интересных эффектов (Л а ш п н с к и й (США)), связанных с универсальной нестабильностью плазмы. Существенно изучение положительного влияния шнура на подавление универсальной неустойчивости низкотемпературного плазменного столба калиевой плазмы концентрацией $10^8 - 5 \cdot 10^{10}$ см⁻³ в магнитном поле 500 - 2000 гс (Х а р т м а н, М а н ж е р (США)). Проведено изучение электростатической неустойчивости плазмы, образованной импульсным нонным потоком, нейтрализованным электронами, выходящими из накаленной нити (Б о л ь ц и н г е р, М а н у с, С и и с с (Франция)). Развита теория устойчивости цилиндрической ограниченной плазмы в однородном продольном магнитном поле (Р о б е р т с о н, Х а у к и н с (США)). Два типа неустойчивостей обнаружены в плазме с горячими электронами (СВЧ нагрев), в магнитной ловушке пробочной геометрии. При этом концентрация горячих электронов составляла $3 \cdot 10^{11}$ см⁻³ при средней энергии 50 - 100 кэв (А р д, Д а н д л ь (США)).

4.6. Ударные волны (29 докладов)

В'обзорном докладе Н и б л е т т а (Франция) был рассмотрен вопрос нагрева

ионизированных газов ударной волной.

Приводятся исследования параметров плазмы, создаваемой при распространении ударной волны. Измеряется электрическая проводимость, концентрация электронов, частота соударений. При измерениях используются различные методики: двойные зонды, резонаторная и волноводная СВЧ аппаратура, интерферометры, оптические методы. Измерения проводятся в широком диапазоне давлений в разных газах при числах Маха от нескольких единиц до нескольких десятков. Так, для измерения концентрации электронов от 10^9 до 10^{11} $c.м.^{-3}$ используется резонатор на H_{011} -типе рения концентрации электронов от 10° до 10° см. "используется резонатор на H_{011} -типе колебаний на $\lambda=3$ см. в который входит 2-см ударная труба; предыонизация осуществляется другим резонатором, питаемым от импульсного магнетрона (Φ о к с, X о б с о н (Ирландия)). Исследуется время ионизации за ударными волнами при числах Маха от 8 до 12 с помощью СВЧ метода (Φ а ж а н о в а, Φ д о б а с т о в, C а я с о в (Φ и и их Φ АН СССР)); изучается механизм понизации в сильных магнитозвуковых волнах, распространяющихся в малоплотной плазме нормально к маг-(Загородников, Смолкин, Шолин (ИАЭ)); исследуются возможности создания однородного ударного потока с помощью коаксиального плазменного источника при числах Маха от 30 до 65, при этом применяются пьезодатчики (1 мм), оптическая интерферометрия и регистрация светового излучения (СО АН СССР)). Проведено исследование бесстолкновительных (Солоухин ударных воли в замагниченной плазме (Поль, Холмс, Паркинсон,

Ш е ф ф и л д (Англия)). С помощью магнитных и электрических зондов измеряется структура указанных фронтов, распространяющихся вдоль радиуса плазменной колонны (водород или дейтерий, $10^{14}-10^{15}$ см⁻³) диаметром 50 см, длиной 100 см, находящейся в аксиальном магнитном поле (0,1-1,5 кгс). Волны создаются мощным г-пинчем между электродами на концах колонны. Измерена толщина ударного фронта (до 1,5 мм). Выполнены исследования плазменного слоя в нецилиндрическом z-пинче (Колесников, Филиппов, Филиппова (ИАЭ)) в дейтерии при токе до 10⁶ а.

5. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЯ (115 ДОКЛАДОВ)

5.1. Методы диагностики плазмы (80 докладов)

- а) Зонды (15 докладов). В большинстве докладов приводятся данные теории и эксперимента по исследованию ленгиюровских зондов в различных условиях: при н эксперимента по исследованию ленгмюровских зондов в различных условиях: при высоких давлениях (К о з е н с (Англия)), при наличии отрицательных ионов (Н г у е н Те Х о н г, П а к е т (Канада)), в сильных магнитных полях до 5—9 кгс (Г о л, О л е с о н (США); М п о ш и, Ш и о б а р а, С а к а м о т о (Япония)), при наличии бариевой (Э к х а р д т и др. (ФРГ)) п цезиевой (М о р о (Франция)) нлазмы, при измерениях в ударной трубе (Л э р д (Англия)). Отметим также исследования электрической проводимости пламени (К о р д у с (Польша)) и падения потенциала в z-пинче (Г р е й г, С в и ф т (Англия)). Существенный интерес представляет разработка нового зонда, являющегося магнитным аналогом электростатирового допреморовского допремо ческого ленгиюровского зонда (Алексев и др. (США)). Зонд представляет собой неизолированную медную проволоку диаметром 1 мм, по которой кратковременно (в течение нескольких секунд) пропускается ток до 1000 а. Проволока помещается в плазму; создаваемое магнитное поле отклоняет заряженные частицы. Из зависимости тока частиц на проволоку от величины магнитного поля получается распределение частиц по импульсам (ленгмюровский зонд дает распределение по энергиям).
- б) Йикроволновая и радиочастотная техника (21 доклад). Большинство сообщений посвящено различным СВЧ методикам измерения лад). Большинство сооощении посвящено различным СВЧ методикам измерения электронной концентрации в плазме и их усовершенствованию. Так, говорится о разработке интерферометра Фабри — Перо на $\lambda = 2.2$ мм (К а д а р и др. (Франция)), об увеличении точности измерения сдвигов фазы до $\pm 2\pi \cdot 10^{-4}$ рад на $\lambda = 8$ мм (Я х аги (Япония)), использовании открытых резонаторов (Г о л а н т и др. (ФТИ АН СССР)) и резонаторов, возбуждаемых на высших типах волн с $\lambda = 8$ мм (А к ули и на (ФИАН)) и $\lambda = 3$ см (Фессенден, Смуллин (США)), измерении эффекта Фарадея для плазмы в магнитном поле (К ю н ц т л е р (ФРГ)), создании зонда с поверхностной волной HE_{11} на $\lambda = 8$ мм, представляющего собой кварцевый стержень, возбуждаемый рупором и имеющий отражающий металимеский имеся из зонда с поверхностном волюм и металической квардевым стержень, возбуждаемый рупором и имеющий отражающий металический диск на другом конце, вводимом в плазму, и позволяющего измерять распределение концентрации электронов (Робсон, Стюарт (Англия)); двухэлектродного резонансного диэлектрического зонда (Мессианен, Ванденилас (Бельгия)). В нескольких работах исследовалось отражение электромагнитных волн как от плазменных цилиндров (Ваднял, Буффа (Италия); Фогера (Франция), Джонс и Вудинг (Англия)), так и от полубесконечной плазмы (Шиллинг (ФРГ); Днестровский и Костомаров (МГУ)). Интересна диагностика движущейся плазмы по электромагнитному излучению (Болотовский, Столяров (ФИАН)). Существенна работа Ворта (Англия) по исследованию турбулентной плазмы на установке «Зета», в которой по прохождению волны через плазму оценены флуктуации плотности плазмы в 10—12%, по допплеровскому сдвигу частоты— скорость движения турбулентности в 10^5-10^6 см/сек, по разрешенным во времени наблюдениям отдельных турбулентных элементов— их размеры около 10 см.

 в) Спектральная интенсивность и профили линий
- (11 докладов). Вопросы, относящиеся к данному разделу, были рассмотрены в разделе 4.5.
- г) Лазерная техника (12 докладов). Большинство работ посвящено применению лазеров для измерения больших электронных концентраций (от 10^{12} до 1019 см-3) в различных плазменных экспериментах. При измерениях регистрировались сдвиги резонансной частоты дазерного резонатора при введении плазмы, рассеяние света лазера, фарадеевское вращение поляризованного света и т. п. В работах использовались импульсные рубиновые лазеры с модулированной добротностью, газовые неон-гелиевые лазеры и т. п. Исследовалась плазма импульсных ртутных дуг, разряда Пенвинга, водина, взрыва проволочки, воздушного пробоя в фокусе лазера и др. Наибольший интерес представляет интерферометрическое изучение лазерного пробоя в воздухе (Алкокс, Панарелла, Рамсден (Канада)). Было проведено прямое измерение с помощью интерферометра Маха — Цендера

10 уфн, т. 89, вып. 2

электронной концентрации и фотографирование фронта ударной волны. При этом показано, что воздух в искре сильно ионизирован, а фронт ударной волны распро-

страняется в соответствии с теорией взрывной волны.

д) Масс-спектры и другая техника (15 докладов). Рассматриваются различные способы измерения энергии и массы частиц, распределения плотности частиц и электрических полей в плазме, давления плазмы и т. п. Так, приводятся результаты измерений энергетического распределения ионов и электронов с помощью трехсеточного электростатического анализатора на установке «Альфа» (Галактионов, Подушникова (ФТИ АН СССР)), энергетических и массовых спектров ионов в магнетронном разряде (Чович, Цивин, Тошич (Югославия)), использования 1,8-Мэв дейтонного пучка для измерения распределения плотности в дейтериевой дуге по получаемым при ядерной реакции протонам (Хикок, Джобс, Маршалл (США)), анализа энергий ионов в разряде газового лазера (Вада, Хейль, Кнехтли (США)), использования радиочастотного массспектрометра (Хартнагель (Англия)), измерений с пьезоэлектрическими зондами (Готам, Курзон, Альхор (Канада)), регистрации нейтральных частиц с энергией 0,5—40 кэв, испускаемых «Деса-II» (Рено (Франция)), и т. д.

5.2. Ионные и плазменные источники (20 докладов)

Большинство докладов относится к ионным и электронным источникам. Исследованию собственно плазменных источников посвящено только несколько работ: улучшение параметров и использование предыонизации в коаксиальных инжекторах (Комельков, Скворцов, Терещенко (ИАЭ)), использование предыонизации в коническом источнике с θ -пинчем с энергией ионов до нескольких кав при числе частиц $10^{17}-10^{19}$ (Аллен, Краддаче, Хилл (Англия)). Среди различных источников ионов отметим: секторный источник фрименов-

Среди различных источников ионов отметим: секторный источник фрименовского типа, дающий ионы лития и водорода с током до 100 жа с цилиндрической симметрией скрещенных электрических и магнитных полей (Бранди, Прево (Франция)), источник водородных ионов на 100 жа с цилиндрической симметрией скрещенных электрических и магнитных полей (Брандт, Клювер, Шурман (Голландая)), источник магнетронного типа (Тошч, Перович, Станич, Юрела (Югославия)), источник типа Пеннинга на 100 жа с горячим катодом (Лютод, Этьеван, Перули (Франция)), индукционный электростатический источник (ожидаемая энергия ионов в 100 каз, плазма 1014—1015 см-3) (Джонс, Леви, США)), использование палладия и быстродействующих электромеханических клапанов в водородных источниках, извлечение ионов пли электронов из потока плазмы, выходящего из ускорителя с градиентами СВЧ и статического магнитного полей (Консоли идр. (Франция)), извлечение ионов водорода (ток 400 ма) с помощью сеток (Уизенга, Реге (Голландия)). Для инжекции быстрых частиц в плазменные установки создан кольцевой источник типа Пеннинга с холодным катодом, имеющим средний диаметр 1 м и ток до 1000 ма при извлекающем напряжении 40 кв и токе разряда 160 а (Барио, Бешерер, Прево (Франция)).

Представляет интерес работа (Боровик, Бусол, Юферов, Скибенко (ФТИ АН УССР)) по созданию перезарядных мишеней (сверхзвуковой поток газа) с анизотропным распределением скоростей, предназначеных для ввода пучков быстрых нейтральных атомов в условиях сверхвысокого вакуума для заполнения магнитных ловушек. В другой работе (Артеменков и др. (ИАЭ)) создается пучок быстрых атомов водорода при перезарядке ускоренных ионов на газовой мишени

(ток 1,3 а, энергия 160 кэв).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что на конференции не было докладов, которые можно считать сенсационными, очевидно, что физика явлений в ионизированных газах имеет тенденцию роста как по количеству работ, так и по различным областям применения.

Среди новых областей, представленных на конференции, можно назвать: 1) создание плазмы с помощью лазеров; 2) создание сверхмощных импульсных плазменных источников в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах; 3) исследования стимулированного излучения плазмы на циклотронных частотах; 4) моделирование явлений в космической плазме.

Следует отметить широкое использование так называемых Q-машин — установок, в которых создается термически ионизированная калиевая или цезиевая холодная плазма, являющаяся удобным объектом для различных плазменных исследований. Широкий размах имеют исследования распространения волн в плазме и особенно взаимодействия и трансформация волн разных типов, т. е. вопросов, актуальных для исследований космоса и ионосферы, для создания эффективных излучателей

электромагнитных волн. В работах по моделированию условий космоса рассматривается обтекание плазмой различных магнитных и немагнитных тел, являющихся моделями Земли (явления в верхней ионосфере и магнитосфере), спутников и ракет.

Все больше и больше в физике плазмы используются сильные ВЧ поля для образования, удержания, нагрева и ускорения плазмы. В этом отношении особый интерес представляет режим электронно-циклотронного резонанса.

Интересны работы (Алексев (США)) по нагреву плазмы электронными пучками. Эти работы начаты на основе идей Я.Б. Файнберга (ФТИ АН УССР). Растет число случаев использования дазеров для диагностики и для создания плазмы в вакууме.

Совершенствуется техника исследований по физике плазмы: создаются мощные инжекторы плазмы, сверхмощные батареи конденсаторов, разрабатываются новые

методы диагностики и т. п.

Большое значение имеет использование плазмы (пинч-эффект, взрыв проволоки и т. п.) для создания мощных источников света и ультрафиолета для подсветки лазеров.

Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР,

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Московский инженерно-физический **И**НСТИТУТ

И. Р. Геккер, Г. В. Михайлов, М. С. Рабинович, И. И. Собельман,

П. Н. Чистяков, В. Н. Цытович, В. Е. Юрасова

