

прерывного действия и лучше не в видимом, а в ИК-диапазоне, т. к. коэф. поглощения в плазме довольно быстро уменьшается с частотой.

Применение П. Плазмотроны широко используются в *плазмохимии* и плазменной металлургии. В нагретых до высоких темп-р низов. газах могут интенсивно протекать хим. реакции, не происходящие или очень медленно протекающие в др. условиях. Это уже практически используется для целого ряда производств. С помощью П. осуществляются спец. технол. процессы, такие как плазменное нанесение покрытий, плазменная резка, сварка и др. (см. *Плазменная технология*). П. является генератором плазмы для нек-рых научных исследований и модельных тепловых испытаний МГД-генераторов, исследований теплообмена и испытаний средств теплозащиты для условий входа космич. аппаратов в атмосферу и пр. П. служит для создания плазменных источников света, в т. ч. эталонных источников высокотемпературного излучения. С помощью П. исследуются свойства низкотемпературной плазмы, создаётся неравновесная плазма низкого давления для электр. прибор. устройств; в частности, П. является источником заряд. частиц для ускорителей.

Лит.: Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков В. А., Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны), М., 1973; Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков В. А., Прикладная динамика термической плазмы, Новосиб., 1975; Райзер Ю. П., Основы современной физики газоразрядных процессов, М., 1980. *В. М. Иселев.*

ПЛАЗМОХИМИЯ — наука, изучающая закономерности физ.-хим. процессов и реакций в низкотемпературной плазме. Низкотемпературная плазма представляет собой совокупность заряд. частиц (электронов, ионов), возбуждённых по внутр. степеням свободы (электронным, колебательным, вращательным), тяжёлых частиц, свободных радикалов; обычно она также содержит высокотемпературные и высокоэнтальпийные газовые потоки (струи) большого динамич. напора и является источником мощного эл.-магн. излучения. В такой плазме распределение реагирующих частиц по скоростям и внутр. степеням свободы отличается от распределения Максвелла — Больцмана, т. е. система является неравновесной и плазмохим. процессы и реакции существенно отличаются от реакций традиц. химии. В реагирующей плазмохим. системе ср. энергия молекул реагентов и их продуктов составляет от 0,1 до 50 эВ; при этом роль неупругих соударений (и в частности, реактивных) резко возрастает. Характерные времена физ., хим. и физ.-хим. процессов сближаются, так что эти процессы уже нельзя считать независимыми; поэтому необходимо рассматривать многоканальные процессы, учитывая взаимодействие каналов между собой и влияние внеш. среды на реагирующую подсистему. Кроме обычных для газов столкновений молекул (атомов и т. п.), в плазме имеют место взаимодействия на больших расстояниях, вызванные эл.-магн. полями и взаимодействием заряд. частиц между собой и с нейтральными частицами. Энергия внутр. степеней свободы частиц плазмы и поступат. энергия, как правило, сильно отличаются друг от друга по величине: разл. компоненты плазмохим. системы могут иметь разл. энергию (или темп-ру при наличии почти максвелловского распределения). Так, в тлеющем разряде, ВЧ- и СВЧ-разрядах при низких давлениях ср. энергия электронов $\sim 3-10$ эВ, ср. колебат. энергия молекул и радикалов ≤ 1 эВ, а ср. энергия поступат. и вращат. степеней свободы молекул $\sim 0,1$ эВ.

Неравновесность плазмохим. процессов может быть обусловлена не только разл. физ. воздействиями (потоками частиц или излучений), но и самой хим. реакций (особенно быстрой), к-рая, будучи пороговым процессом, уменьшает кол-во молекул, обладающих энергией, превышающей пороговую, изменяя тем самым вид ф-ции распределения молекул по энергиям.

Кинетика плазмохимических реакций. Для её описания применяется неравновесная хим. кинетика, к-рая

учитывает квантовую энергетич. структуру молекул и атомов, т. е. концентрацию каждого компонента в каждом энергетич. состоянии и их ф-ции распределения, а также переходы между энергетич. состояниями и канала хим. реакций. Система ур-ний традиционной хим. кинетики при этом заменяется на систему *Паули уравнений*, описывающих многоканальные процессы, причём каждое отдельное ур-ние этой системы связывает скорость изменения концентрации реагирующих молекул (атомов, ионов, радикалов) данного вида в нек-ром *i*-м энергетич. состоянии с концентрациями этих молекул во всех возможных энергетич. состояниях, с вероятностями перехода между состояниями, с частотой столкновения частиц и со скоростью возбуждения данного уровня («накачкой» уровня).

Ур-ние Паули может быть получено или на основе общих положений теории вероятности и теории случайных процессов, или на основе *Лиувилля уравнения*. В простейшем случае для мономолекулярной реакции в термостате инертного газа он имеет вид

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \sum_j v(p_{ji} - p_{ij})N_j(t) - k_i N_i(t) + R_i(t),$$

где N_i — концентрация реагирующих молекул в *i*-м энергетич. состоянии в момент времени *t*; p_{ij} — вероятность (на одно столкновение) перехода при столкновении реагирующей частицы с молекулой термостата из состояния *j* в состояние *i*; p_{ji} — то же для перехода из состояния *i* в состояние *j*; k_i — коэф. скорости хим. реакции для молекул, находящихся в *i*-м состоянии; R_i — скорость возбуждения *i*-го уровня («накачка»); v — частота столкновений. Интегрирование на ЭВМ системы ур-ний Паули позволяет в ряде случаев получить полное описание плазмохим. реакций в конкретной реагирующей системе. В общем случае надо решать сложную систему, состоящую из *Навье — Стокса уравнений* (или их аналогов), ур-ний Паули и ур-ний электродинамики. Кроме ур-ний Паули для концентраций отд. типов частиц в неравновесной кинетике используются также ур-ния Больцмана для ф-ции распределения и ур-ние Ланжевена, включающее стохастич. силу. Коэф. скорости плазмохим. реакции k_i является ср. скоростью (на единицу концентрации реагирующих компонент) по всем динамически и энергетически доступным каналам столкновений. Усреднение производится по скоростям и квантовым состояниям реагирующих молекул, т. е. в выражение k_i должны входить в явном виде ф-ции распределения $f_i(r, r', t)$ реагентов и продуктов реакций. В простейшем случае диссоциации двухатомной молекулы, являющейся малой добавкой в инертном газовом термостате, при учёте только колебат. степеней свободы имеем для *i*-го колебат. уровня:

$$k_i = \int_{\mathcal{E}_{пор}}^{\infty} \sigma_i(\mathcal{E}) V \bar{f}_i(\mathcal{E}) d\mathcal{E},$$

где σ_i — сечение реакции, \mathcal{E} — энергия, $f_i(\mathcal{E})$ — ф-ция распределения. Это выражение для k_i наз. *уравнением* коэф. скорости хим. реакции. Сущест. роль в плазмохим. реакциях играет процесс смешения реагентов разл. энергий и реакций в турбулентных потоках. Скорости плазмохим. реакций очень велики (длительность контакта реагентов порядка $10^{-3}-10^{-5}$ с).

Механизмы плазмохимических реакций зависят от состава плазмы, длины свободного пробега реагирующих частиц, давления плазмы, распределения молекул по электронным, колебат. и вращат. уровням энергии. Наиб. важные и часто встречающиеся плазмохим. процессы, при к-рых идёт хим. реакция, следующие: *понижение*, возбуждение электронных, колебат. и вращат. уровней, диссоциация, рекомбинация. В плазме атомарных газов часто образуются кластеры и *кластерные ионы*, напр. в плазме Ag происходят реакции:

