

Релятивистская П. э., в особенности экспериментальная, сделала только первые шаги. Теория уже сформулировала ряд интересных физ. проблем, связанных с релятивизмом и сильноточностью пучков, к-рые требуют эксперим. исследования. Тем не менее много нерешённых проблем осталось и у теории, и в первую очередь исследования разл. механизмов взаимодействия электронных пучков с плазмой.

Лит.: 1) Файнберг Я. Б., Ускорение частиц в плазме, «Атомная энергия», 1959, т. 6, с. 431; 2) его же, Ускорение заряженных частиц в плазме, «УФН», 1967, т. 93, с. 647; 3) Бернштейн Г. А. и др., Плазменные и электронные усилители и генераторы СВЧ, М., 1965; 4) Рабинович М. С., Рухадзе А. А., Принципы релятивистской СВЧ плазменной электроники, «Физика плазмы», 1976, т. 2, с. 715; 5) Богданкевич Л. С., Рабинович М. С., Рухадзе А. А., Релятивистская сильноточная СВЧ плазменная электроника, «Изв. ВУЗов. Физика», 1979, т. 10, с. 47; 6) Файнберг Я. Б., Некоторые вопросы плазменной электроники, «Физика плазмы», 1985, т. 11, с. 1398; 7) Богданкевич Л. С., Кузель М. В., Рухадзе А. А., Плазменная СВЧ электроника, «УФН», 1981, т. 133, с. 3; 8) Кузель М. В. и др., Релятивистская сильноточная плазменная СВЧ электроника: преимущества, достижения, перспективы, «Физика плазмы», 1987, т. 13, с. 1370. Я. Б. Файнберг, А. А. Рухадзе.

**ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВЫЙ РАЗРЯД** — один из видов электрического разряда в газе, в к-ром в межэлектродное пространство вводится ускоренный электронный пучок и плазма разряда разогревается (см. обр. за счёт плазменно-пучковой неустойчивости (гл. Пучковая неустойчивость). В результате развития неустойчивости электронный пучок размывается по скоростям с уменьшением ср. энергии электронов в пучке и передачей части первонач. энергии пучка ленгмюровским колебаниям. Затем значит. часть энергии ленгмюровских колебаний передаётся тепловым электронам плазмы. Разогрев тепловых электронов происходит за счёт затухания ленгмюровских колебаний при электрон-атомных и электрон-ионных столкновениях, при рассеянии ленгмюровских колебаний на тепловых электронах с трансформацией ленгмюровских волн в ионно-звуковые, при затухании ленгмюровских колебаний в области уменьшающейся концентрации плазмы и т. д.

Доля  $\alpha$  энергии пучка, трансформируемая в энергию ленгмюровских колебаний, зависит от первонач. разброса скоростей электронов пучка  $\Delta v$  и от длины  $L$  взаимодействия пучка с плазмой. Наиб. значения  $\alpha$  ( $\alpha \sim 1$ ) реализуются для достаточно размытого пучка  $\Delta v/v_1 > (n_1/n)^{1/2}$  при  $L > (v_T/\omega_{pe})(v_T/v_1)(n/n_1)\Lambda$ . Здесь  $v_1$  и  $n_1$  — скорость и концентрация электронов в пучке,  $v_T$  и  $n$  — средняя скорость и концентрация тепловых электронов,  $\omega_{pe} = \sqrt{4\pi n e^2/m_e}$  — ленгмюровская частота,  $\Lambda$  — кулоновский логарифм.

В П.-п. р. значительный, а зачастую определяющий вклад в ионизацию вносят разогретые тепловые электроны плазмы, концентрация к-рых по мере развития разряда обычно начинает превышать концентрацию электронов в пучке. На формирование ф-ции распределения тепловых электронов оказывают влияние упругие и неупругие столкновения, а также ускорение электронов в электрич. полях ленгмюровских колебаний.

Диапазон токов  $i$  и напряжений  $u$  в П.-п. р. весьма широк:  $i \approx (0,1-10^6)$  А,  $u \approx (10-10^6)$  В. В основном П.-п. р. изучен в протяжённой геометрии. Часто в экспериментах для фокусировки пучка использовалось продольное магн. поле с напряжённостью  $H > 10^3$  Э. Изучен также маломощный П.-п. р. в узком зазоре, возникающий при наложении импульса напряжения на кнуденовскую плазму низковольтной дуги, в к-рой длина свободного пробега электронов пучка больше разрядного промежутка. Пучок здесь формируется на катодном падении напряжения.

Для мощных импульсных П.-п. р. характерно возникновение обратного тока, к-рый создаётся образующимися в результате ионизации газа вторичными электронами. Последние ускоряются под действием индуцированного электрич. поля, возникающего при импульсном увеличении тока разряда. В сильноточном импульс-

ном П.-п. р. обратный ток вносит существенный вклад в полный ток.

Лит.: Кингсен С. С. и др., Механизм ионизации газа сильноточным пучком электронов, «ЖЭТФ», 1972, т. 63, с. 2132; Лебедев П. М. и др., Теория плазменно-пучкового разряда, «Физика плазмы», 1976, т. 2, с. 407; Иванов А. А., Соболева Т. К., Юшманов П. Н., Перспективы использования плазменно-пучкового разряда в плазмохимии, «Физика плазмы», 1977, т. 3, с. 152; Бакшт Ф. Г. и др., Математическое моделирование процессов в высоковольтном плазменно-пучковом разряде, М., 1990. Ф. Г. Бакшт, В. Г. Юрвев.

**ПЛАЗМЕННЫЕ ДВИГАТЕЛИ** — космич. реактивные (ракетные) двигатели с рабочим веществом в плазменной фазе, использующие для создания и ускорения потока плазмы электрич. энергию. П. д. представляют собой соответствующим образом оптимизированные плазменные ускорители. П. д. — составная часть семейства электроракетных двигателей (ЭРД), в к-рое входят также ионные и эл.-нагревные двигатели. При эл.-магн. ускорении плазмы скорость истечения существенно превосходит тепловую скорость, характерную для хим. (тепловых) ракетных двигателей, что в соответствии с ф-лой Мецковского — Циолковского (см. Механика тел переменной массы) расширяет диапазон достижимых характеристик. скоростей и увеличивает долю полезной нагрузки на космич. летат. корабле (КЛА). П. д. функционируют на борту КЛА в условиях невесомости либо очень малых гравитац. полей. П. д. имеют малую тягу ( $10^{-2}-10^{-1}$  Н), работают длит. время ( $\geq 10^3$  ч) при большом числе включений. С учётом огранич. возможностей совр. космич. энергетики осн. критериями оптимизации П. д. являются весовые и габаритные характеристики электроракетных двигат. установок (ЭРДУ), ресурс их работы, энергетич. цена тяги  $u/2\eta$  ( $u$  — скорость истечения,  $\eta = Fu/2N$  — тяговый кпд, где  $F$  — тяга,  $N$  — потребляемая электрич. мощность), уменьшающаяся при заданной скорости истечения по мере роста  $\eta$ .

Использование П. д. (ЭРД) даёт возможность прецизионно установить требуемые параметры орбиты КЛА, поддерживать их неизменными и осуществлять перевод КЛА с одной траектории на другую.

Интенсивная разработка П. д. началась в кон. 1950-х гг. В качестве прототипов П. д. рассматривались все схемы плазменных ускорителей. Однако до сих пор применяются только два типа П. д.: эрозионный импульсный П. д. (ИПД) и стационарный (неимпульсный) П. д. (СПД). В эрозионных ИПД электрич. разряд развивается вдоль поверхности рабочего вещества (типа фторпласта, напр. тефлона), к-рое испаряется, частично ионизуется, и образовавшаяся плазма термически ускоряется. С помощью таких П. д. создаются регулярные малые, точно дозированные импульсы тяги, недоступные при работе ракетных двигателей др. типов. Первый ИПД создан в СССР в 1930. В космич. условиях эрозионные ИПД впервые были успешно испытаны в 1964 на борту советской межпланетной космич. станции «Зонд-2». ЭРДУ с четырьмя эрозионными ИПД (рис.) функционировала в 1968 в течение более

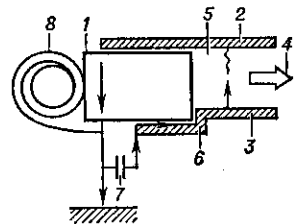


Схема эрозионного импульсного плазменного двигателя спутника LES-6: 1 — брусок тефлона; 2 — катод; 3 — анод; 4 — струя плазмы; 5 — устройство для поджига разряда; 6 — буртик; 7 — конденсатор; 8 — пружина подачи.

чем 2 лет на борту американского спутника связи LES-6, поддерживая параметры его орбиты. Чтобы удержать разряд в одном месте, брусок тефлона 1 закреплён с одной стороны буртиком (выступом) 6, с другой — пружиной 8, к-рая подаёт брусок вперёд по мере его выгорания. Запасаемая энергия 1,85 Дж, унос