

04;09  
©1995

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ВРЕМЕННÓЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, БОМБАДИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОД В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ

*А.С.Смирнов, А.Ю.Уставщиков, К.С.Фролов*

Ионная и электронная бомбардировка электродов в высокочастотном разряде оказывает существенное влияние на процессы, происходящие на его поверхности. В зависимости от энергии частиц и плотности их потока она может приводить к распылению материала электрода или подложки, стимулировать химические реакции на поверхности, приводящие к травлению или, наоборот, росту пленки, приводить к образованию дефектов или их отжигу. Ионная или электронная бомбардировка является причиной анизотропии процессов плазменного травления. Это делает задачу измерения энергетического распределения потоков заряженных частиц на электрод чрезвычайно актуальной с точки зрения исследования физических процессов в плазменных технологических установках и управления технологическими процессами. С другой стороны, измерение энергетических спектров частиц может дать важную информацию о процессах в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда и приэлектродных слоях, где они ускоряются. Исследованию энергетических спектров ионов, бомбардирующих электрод, посвящено значительное число работ (см., например, [1]). Значительно меньший интерес привлекают исследования электронных спектров [2,3], хотя уже в [2] было показано, что энергия электронов может более чем в два раза превышать энергию ионов при сравнимых плотностях потока [3]. В большинстве работ для измерения энергетических спектров частиц используются многосеточные анализаторы тормозящего поля [1], которые дают усредненные по большому числу периодов кривые задержки. Движение ионов, которые обладают большой инерцией и практически не чувствуют переменной составляющей поля, определяется в основном усредненными полями. Поэтому их поток и энергия не должны сильно меняться во времени и отличаться от средних. Движение электронов, напротив, определяется мгновенным значением электрического поля, следовательно, энергия и поток электронов, бомбардирующих электрод, должны существенно зависеть от фазы поля. В данной работе приведены результаты измерений с вре-

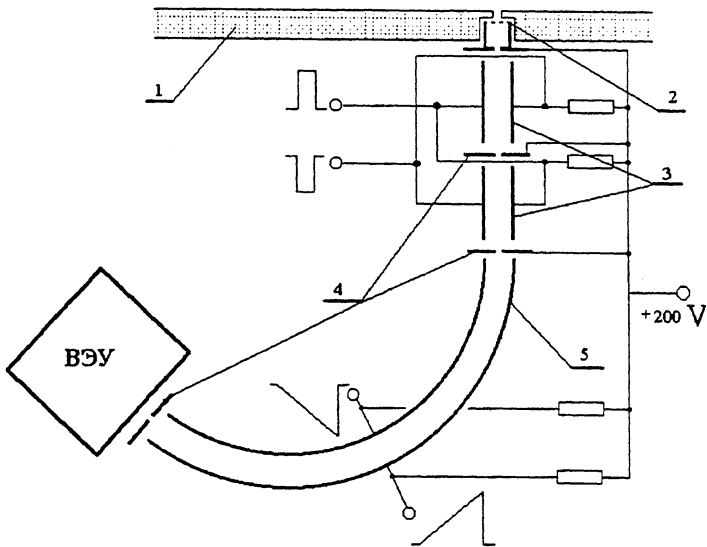


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — заземленный электрод, 2 — ускоряющая сетка, 3 — пластины затвора и компенсатора, 4 — диафрагмы, 5 — отклоняющие пластины анализатора.

менным разрешением энергетических спектров электронов, бомбардирующих электрод, в ВЧ-разряде.

Эксперименты проводились на установке, описанной в [3], в высокочастотном разряде на частоте  $\omega/2\pi = 13.56$  МГц при давлении аргона  $p = 4-20$  мТорг и мощности  $W = 5-60$  Вт. Схема измерений иллюстрируется рис. 1. Энергоанализатор располагался в высоковакуумной камере за заземленным электродом 1. Давление в высоковакуумной камере не превышало  $10^{-5}$  Торг. Заряженные частицы проходили через отверстие в электроде диаметром 1 мм и ускорялись потенциалом  $\pm 200$  В, подававшимся на сетку 2, и через диафрагмы 4 попадали в анализатор Юза-Рожанского 5. Для управления пучком электронов служил компенсированный затвор 3. В нормальном состоянии затвор был заперт напряжением 400 В и открывался импульсами длительностью  $\sim 10$  нс, синхронизированными с высокочастотным напряжением. Изменяя задержку между затворным импульсом и моментом перехода ВЧ-напряжения через нуль, можно было измерять напряжение в разные фазы разрядного тока. Для регистрации малых импульсных токов использовался вторично-электронный умножитель (ВЭУ).

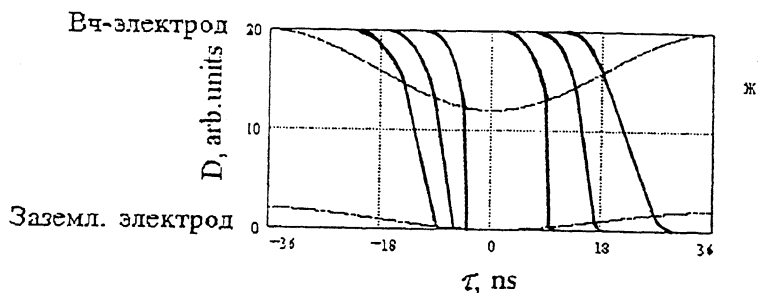
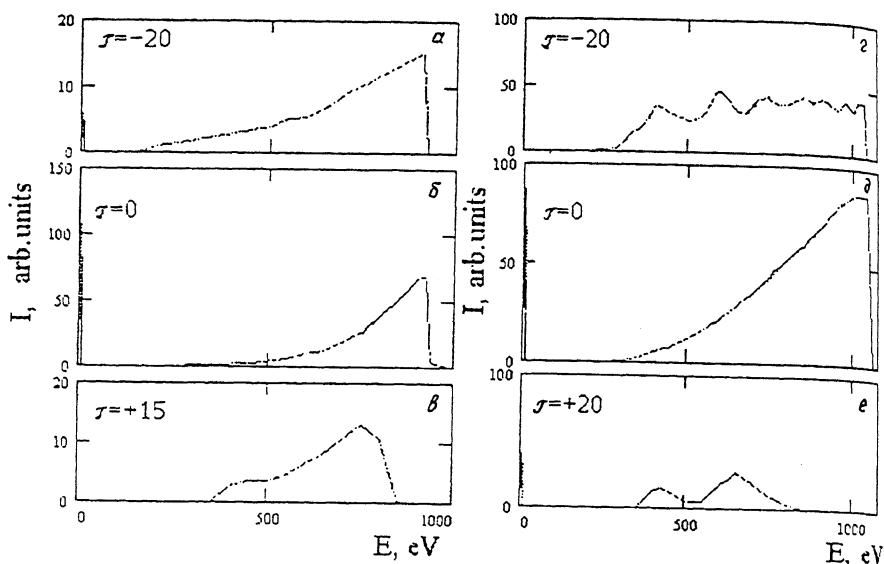


Рис. 2. Энергетические спектры электронов в различные фазы ВЧ-поля:

$a-e$  —  $p = 18$  mTorr,  $W = 45$  W,  $U = 480$  V;  $z-e$  —  $p = 4$  mTorr,  $W = 40$  W,  $U = 530$  V; ж — схематичное изображение траекторий  $\gamma$ -электронов.

Типичные энергетические распределения электронов, полученные при различных задержках при двух давлениях, показаны на рис. 2,  $a-e$ :  $\tau = 0$  соответствует моменту максимального приближения границы плазма — слой к заземленному электроду,  $\tau < 0$  — движению границы слоя к электроду, а  $\tau > 0$  — в противоположном направлении. При  $\tau \cong 0$  (рис. 2,  $b, d$ ) наблюдаются две группы электронов: медленные, тепловые электроны плазмы с энергиями до 20 eV и быстрые  $\gamma$ -электроны с энергиями до 1000 eV. Тепловые электроны имели распределение, близкое к максвелловскому с температурой  $\sim 9$  eV. Их поток уменьшался с ростом  $|\tau|$  при неизменной форме распределения. Зависи-

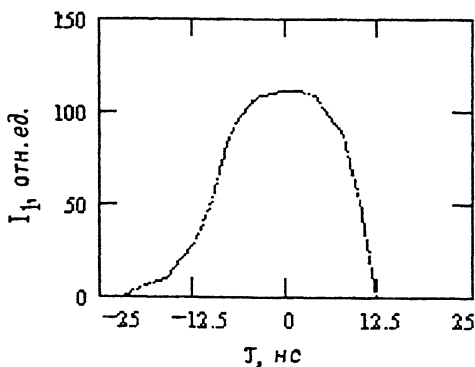


Рис. 3. Зависимость от времени тока медленных электронов на заземленный электрод.

мость от времени ( $\tau$ ) тока медленных электронов на электрод представлена на рис. 3. Видно, что эта зависимость несимметрична — при  $\tau < 0$  наблюдается “хвост” плазменных электронов, начиная с задержек  $\sim 25$  ns. Грубо оценить реальную ширину импульса медленных электронов можно, вычтя из наблюдаемой ширины ( $\sim 30$  ns) ширину затворного импульса ( $\sim 10$  ns). Полученная величина ( $\sim 20$  ns) близка к четверти периода электрического поля (74 ns). Это не согласуется с простейшими моделями приэлектродных слоев [4], предполагающими резкую границу плазмы.

Поведение энергетических спектров быстрых электронов значительно сложнее (рис. 2). При  $\tau = 0$  (рис. 2, б, д) они имеют треугольную форму с максимальной энергией, близкой к удвоенному амплитудному значению приложенного к электродам напряжения [2,3]. При  $\tau < 0$  (рис. 2, а, г) спектр расширяется в сторону малых энергий, в то время как максимальная энергия практически не меняется. При давлении 18 mTorr форма спектра остается треугольной (рис. 2, а), при меньшем давлении (4 mTorr) на нем наблюдаются многочисленные особенности (рис. 2, г). При  $\tau < 0$  (рис. 2, в, е) наблюдается сдвиг пика быстрых электронов в сторону малых энергий, возрастающий с  $|\tau|$ . Для объяснения указанных особенностей поведения энергетических спектров рассмотрим движение  $\gamma$ -электронов, образующихся на высокочастотном электроде. На рис. 2, ж схематично (без соблюдения масштабов) показано положение границ плазмы в различные моменты времени и траектории  $\gamma$ -электронов, образующихся на высокочастотном электроде. При  $\tau < 0$  толщина слоя у этого электрода возрастает, поэтому электроны, которые стартуют позже, ускоряются в большем электрическом поле и догоняют электроны, стартовавшие раньше.

Таким образом, траектории электронов при  $\tau < 0$  фокусируются, т.е. в один и тот же момент времени на заземленный электрод приходят электроны, эмитированные в различные фазы и ускорившиеся до различных энергий. Следовательно, энергетический спектр при  $\tau < 0$  должен быть широким, что и наблюдается экспериментально. При  $\tau > 0$ , наоборот, электрон, стартующий позже, попадает в меньшее поле и отстает от стартовавшего раньше — траектории расходятся. Следовательно, при  $\tau > 0$  в каждый момент времени на заземленный электрод поступают электроны, стартовавшие в определенную фазу тока, причем чем больше  $\tau$ , тем в меньшем поле они ускорились, т.е. должен наблюдаться сдвиг спектра в область меньших энергий. Следует отметить, что поток быстрых электронов падает с ростом  $|\tau|$  (см. рис. 2), особенно при  $p = 18 \text{ mTorr}$ . Если исходить из предположения, что он определяется  $\gamma$ -процессами на противоположном электроде, это означает, что поток ионов и/или коэффициент  $\gamma$  зависит от потенциала слоя. Это противоречит предположению, что движение ионов определяется средним электрическим полем. Изменение  $\gamma$  еще менее вероятно, так как его величина в значительной мере определяется не ионами, а фотонами и возбужденными нейтралями [1].

Таким образом, в результате данной работы получены энергетические спектры быстрых и медленных электронов, бомбардирующих электрод в различные фазы ВЧ-поля. Показано, что простая модель позволяет качественно объяснить характер изменения спектров быстрых электронов с фазой поля, однако для более детального описания свойств спектров, по-видимому, требуется отказаться от предположений о резкой границе плазмы и отсутствии влияния высокочастотного поля на движение ионов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты No 93-02-16847 и No 94-02-04761.

### Список литературы

- [1] *Böhm C., Perrin J.* // Rev. Sci. Instrum. 1993. V. 64. P. 31-44.
- [2] *Koenig H.R., Maissel L.I.* // IBM J. Res. 1970. V. 14. P. 168-174.
- [3] *Смирнов А.С., Устаевщиков А.Ю., Фролов К.С.* // Материалы конференции "Физика и техника плазмы". Минск, 1994. Т. 2. С. 120-124.
- [4] *Smirnov A.S., Tsandin L.D.* // IEEE Trans. on Plasma Science. 1991. V. 19. P. 130-140.

Санкт-Петербургский государственный  
технический университет

Поступило в Редакцию  
24 апреля 1995 г.