

ВЛИЯНИЕ КЛАСТЕРОВ НА ПРОЦЕССЫ В СТРУКТУРЕ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОТОК—ПОВЕРХНОСТЬ

О. Ю. Цыбин

Структура электронный поток—поверхность (ЭП—П) является общим элементом устройств вакуумной электроники, и закономерности физических процессов в ней представляют значительный интерес для исследований. Недостаточно изучен сложный комплекс явлений, связанных с бомбардировкой поверхности ионами, образующимися при ионизации электронным ударом атомов остаточного или напускаемого газа (например, [1]). В данной работе показано, что учет кластеров в спектре масс и ионизации материала, распыленного ионами, позволяет выявить неустойчивость и нестационарную динамику потоков частиц в структуре ЭП—П.

Рассмотрим схематически возникновение и движение потоков частиц в модели ЭП—П (рис. 1). Основными элементами являются: поверхность $y=0$; электронный поток с плотностью тока j_0 , направленный, например, вдоль линии $y=\text{const}$ вблизи поверхности; электрическое поле E_y в электронном потоке. Поток j_0 обусловлен ионами газа, поток j образован выбитыми с поверхности нейтральными частицами, которые при ионном распылении составляют обычно около 0.9 всех продуктов процесса и содержат значительную составляющую нейтральных кластеров [2]. Часть j_1 потока j ионизуется в электронном пучке и ускоряется электрическим полем к поверхности, вызывает ее самораспыление и, следовательно, возрастание потока j . Определим условия нарастания процесса, рассматривая его по временным шагам длительностью τ , соответствующей периоду цикла. Потоки распыленных частиц j в моменты времени t и $t+\tau$ представляются выражениями

$$j(t) = \sum_N v(N) f(N, t) n(t), \quad (1)$$

$$j(t+\tau) = \sum_N v(N) f(N, t+\tau) n(t+\tau) = \\ = \sum_N v(N) f(N, t) R(j_0, N) S(E, N) \gamma(N) n(t), \quad (2)$$

где $v(N)$ — скорость нейтрального кластера, состоящего из N -атомов; $f(N, t)$ — функция распределения частиц в потоке j по размерам; $n(t)$ — концентрация частиц; $S(E, N)$ — коэффициент ионного распыления или самораспыления поверхности, зависящий от N и энергии ионов E .

Коэффициент ионизации частиц в электронном потоке R определяется выражением

$$R(j_0, N) = j_1/j = 1 - e^{-l\lambda(N)}, \quad (3)$$

где l — размер ЭП вдоль оси y ; $\lambda(N)$ — длина пробега частицы в ЭП,

$$\lambda(N) = ev(N)/j_0\sigma(N). \quad (4)$$

В (4) e — заряд электрона, $\sigma(N)$ — сечение ионизации частицы электронным ударом. Коэффициент γ в (2) учитывает баланс потерь потоков j , j_1 и их увеличение за счет многозарядной ионизации, ионизационной фрагментации. Объединяя выражения (1)—(4), получаем

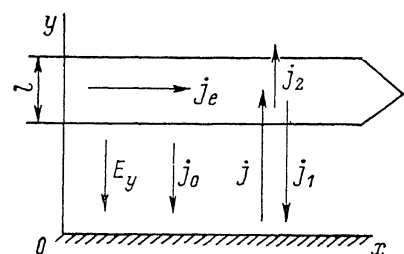


Рис. 1. Схема потоков частиц в структуре ЭП—П.

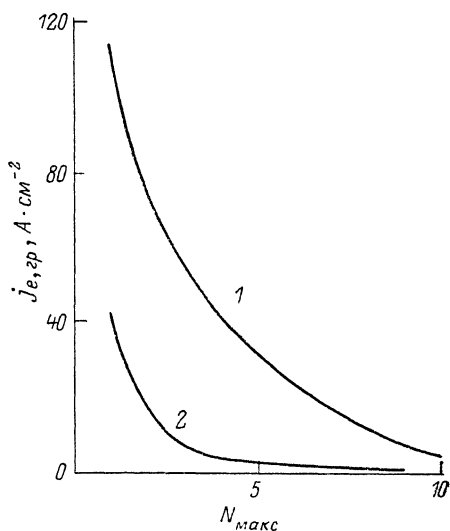


Рис. 2. Расчетные зависимости плотности граничного тока от наибольшего размера кластеров в потоке распыленных частиц.

соотношение для определения граничного значения плотности электронного тока j_e, j_p , при превышении которого возникает нестационарный процесс в структуре ЭП—П:

$$\sum_N v(N) f(N) \left((1 - e^{-j_e \tau(N) l / e v(N)}) S(N) \gamma(N) - 1 \right) = 0. \quad (5)$$

Динамическое состояние структуры, следовательно, определяется количественными характеристиками этапов цикла и зависит от параметров спектра масс частиц в распыленном и ионизованном потоках.

Для вычислений формула (5) использовалась в следующем виде:

$$\sum_{N=1}^{N_{\max}} N^{-3/2} / \sqrt{N} \left(S(N) (1 - e^{-p N^{3/2} j_e \tau}) - 1 \right) = 0. \quad (6)$$

Здесь учтено, что сечение ионизации $\sigma(N)$ нейтрального кластера, состоящего из N -атомов, составляет $\sigma(N) = N \tau$ ($N \leq 50$) [3], средняя скорость кластеров, получаемых при ионном распылении, соответствует приблизительно 0.1...1.0 эВ, коэффициент распыления S нелинейно возрастает с ростом N , функция распределения $f(N)$ при увеличении N ($N \geq 5$) спадает приблизительно как $N^{-3/2}$, распыленные частицы вылетают с поверхности в направлении, близком к нормали [4]. Результаты расчетов приведены на рис. 2 в виде зависимостей плотности j_e, j_p граничного тока неустойчивости от наибольшего размера частиц N_{\max} при $p = 10^{-2}$. Кривая 1 получена при $S(N) = 1.5^N$, кривая 2 — для $S(N) = 3^N$ при $N \leq 4$, таким образом, $S(N) = 3^4$, $N > 4$. Расчеты показали, что влияние кластерной структуры частиц приводит к значительному снижению граничного значения плотности электронного тока, при превышении которого возникает нестационарный процесс вплоть до 1...10 А·см⁻², и расширяет тем самым круг электронно-вакуумных устройств, подверженных неустойчивости рассматриваемого типа. Проявления неустойчивости возможны, например, в сильноточных диодах, электронных пушках, магнетронных приборах, где рассматриваемый механизм позволяет дать объяснение наблюдаемых аномальных явлений, в том числе самопроизвольного возрастания токов [5].

Возникновение ионной кластерной неустойчивости в структуре ЭП—П зависит, таким образом, от характеристик электронного потока, электрического поля, геометрии системы и от свойств поверхности (эффективности ионного распыления, спектра масс распыленных частиц, их распределений по скоростям и углам вылета и т. д.). Учет кластерной структуры распыленного материала позволяет выявить механизм неустойчивости не только в системах с электронным потоком, но также и при наличии иных приповерхностных ионизаторов, например излучений или плазмы.

Литература

- [1] Болотов В. Е., Зайцев Н. И., Кораблев Г. С. и др. // ПЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 16. С. 1013—1016.
- [2] Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бернса. М.: Мир, 1986. 488 с.
- [3] Mark T. D., Dunn G. H. Electron Impact Ionization. Wien: Springer-Verlag, 1985. 383 с.
- [4] Битенский И. С., Парилус Э. С. // Поверхность. 1984. Вып. 7. С. 14—20.
- [5] Соколов И. В. // Тез. докл. Всесоюз. семинара «Физические процессы в приборах М-типа, проблемы их теории и машинного проектирования». Л., 1979. С. 34.

Ленинградский
политехнический институт
им. М. И. Калинина

Поступило в Редакцию
3 декабря 1987 г.
В окончательной редакции
11 мая 1988 г.