

01;04
©1995

АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ АНСАМБЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ В ГЕЛИИ

А.А.Абрамов, А.И.Мащенко, Г.Н.Толмачев

Рассмотрим кинетическое уравнение Больцмана, описывающее поведение электронов в газе в электрическом поле:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot \nabla f + \frac{e}{m} \cdot \mathbf{E} \cdot \frac{\partial f}{\partial \nabla} = \hat{S}_{el} f + \hat{S}_{ex} f + \hat{S}_{io} f, \quad (1)$$

где $f = f(\mathbf{q}, \nabla)$ — функция распределения электронов по координатам и скоростям, e и m — заряд и масса электрона, \mathbf{E} — электрическое поле, а члены в правой части описывают соответственно интегралы столкновений для упругих соударений, возбуждения и ионизации. В условиях стационара по времени ($\frac{\partial f}{\partial t} = 0$), умножая обе части уравнения на ε — энергию электронов и интегрируя по d^3v , пренебрегая потерями энергии при упругих соударениях, получим

$$\nabla \cdot (\langle \nabla \cdot \varepsilon \rangle) + I_{ex} \cdot \langle v \cdot \sigma_{ex} \rangle + I_{io} \cdot \langle v \cdot \sigma_{io} \rangle = e \cdot \mathbf{E} \cdot \langle \nabla \rangle, \quad (2)$$

где $V_{ex} = 19.8$ эВ — потенциал возбуждения гелия, $V_{io} = 24.6$ эВ — потенциал ионизации гелия, σ_{ex} — сечение возбуждения, σ_{io} — сечение ионизации; угловые скобки обозначают усредненные по функции распределения величины: $\langle \nabla \cdot \varepsilon \rangle = \int \nabla \cdot \varepsilon \cdot f \cdot d^3v$, $\langle v \cdot \sigma_{ex} \rangle = \int v \cdot \sigma_{ex} f \cdot d^3v$, $\langle v \cdot \sigma_{io} \rangle = \int v \cdot \sigma_{io} \cdot f \cdot d^3v$, $\langle \mathbf{v} \rangle = \int \mathbf{v} \cdot f \cdot d^3v$. В случае однородного электрического поля, когда дрейф электронов происходит в направлении поля, это уравнение преобразуется к следующему:

$$v_d \cdot \frac{d\langle \varepsilon \cdot v_x \rangle / v_d}{dx} + \nu_{ex} \cdot V_{ex} + \nu_{io} \cdot V_{io} + \nu_{io} \cdot \frac{\langle \varepsilon \cdot v_x \rangle}{v_d} = e \cdot E \cdot v_d, \quad (3)$$

(а) (б) (в) (г) (д)

где v_d — скорость дрейфа электронов, ν_{ex} — частота возбуждения, ν_{io} — частота ионизации.

Все члены в (3) имеют размерность мощности, и данное соотношение представляет собой баланс мощностей.

Член (а) отражает убегание электронов: за некоторый промежуток времени часть набираемой электронами от поля энергии идет на увеличение средней кинетической энергии ансамбля электронов. Член (б) отражает энергию, теряемую электронами в процессах возбуждения, а (в) и (г) — в процессах ионизации, причем (в) связан с потерей энергии на преодоление энергетического барьера, равного потенциалу ионизации, а (г) — с отдачей части энергии рождающемуся в акте ионизации электрону. Член (д) характеризует мощность, набираемую электронами в электрическое поле, которая тратится в выше перечисленных процессах.

Целью данной работы являлось нахождение значений мощностей процессов для широкого диапазона электрических полей при помощи компьютерного моделирования методом Монте-Карло [1]. Найденные значения могут быть использованы при анализе энергетических процессов разряда. Уравнение (3) также может использоваться для верификации различных методов моделирования ансамбля электронов в электрических полях произвольной конфигурации в газе.

Алгоритм расчета вместе с техникой нулевых сечений взят из [1]. В качестве рабочего газа был взят гелий при давлении 1 Тор. Сечения возбуждения и ионизации (включая дифференциальные сечения ионизации) взяты из [2], упругие сечения — из [3], аппроксимационная формула для дифференциальных упругих сечений — из [1]. Расстояние между катодом и анодом было 5 см, а шаг сетки по координате составлял 0.05 см.

Расчеты параметров электронных лавин проводились для диапазона полей от 30 до 200 В/см с шагом 10 В/см. Для всего диапазона полей, начиная с некоторого расстояния от катода, нормированная на единицу ФРЭЭ и различные усреднения по ней (в том числе мощности процессов) перестают зависеть от координаты. В дальнейшем все значения мощностей приведены именно для этого промежутка, которому в данном эксперименте соответствовала зона от 2 до 4 см. С увеличением расстояния между катодом и анодом зона тоже соответственно растягивается, а параметры электронного ансамбля в этой зоне сохраняют свои значения.

Как показал численный эксперимент, значение члена (а) растет с увеличением поля и при полях 200 В/см достигает 0.3% от мощности, набираемой в электрическом поле. Из-за малости этого члена в дальнейшем он не рассматривается. На рис. 1 приведены абсолютные значения мощностей выше описанных процессов в зависимости от электрическо-

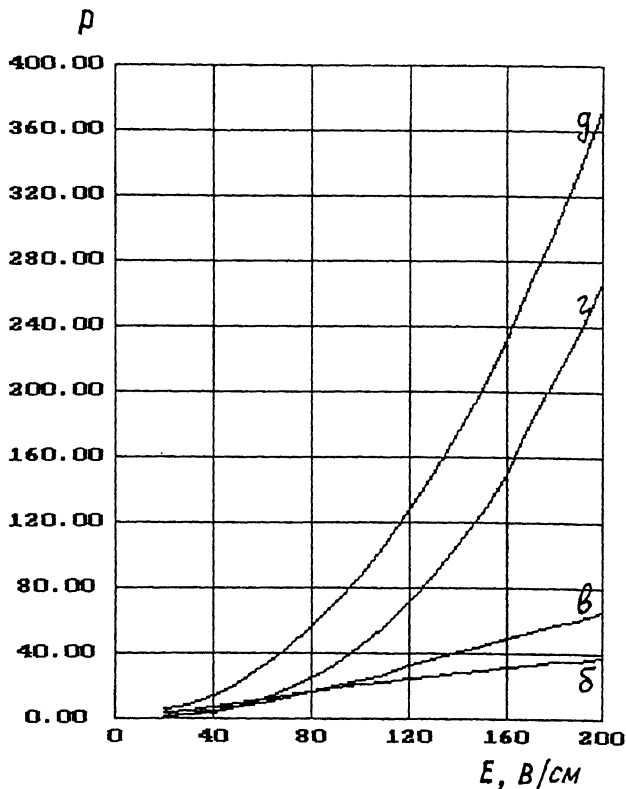


Рис. 1.

го поля, а на рис. 2 приведены относительные (по отношению к мощности, набираемой электронами от поля) потери мощности. Из рис. 2 видно, что при малых полях мощность, набираемая от поля, тратится в основном на процессы возбуждения, а при больших — на процессы ионизации. Интересно, что член (в) на рис. 2 представляет собой $V_i \cdot \alpha / E$, где $\alpha = v_i / v_d$ — ионизационный коэффициент, и имеет оптимум в точке Столетова [4] (условие точки Столетова $d(\alpha/E)/dE = 0$). Из этого следует, что в точке Столетова относительная мощность, связанная с потерей энергии на преодоление энергетического барьера, равного потенциалу ионизации в ионизирующих процессах, в расчете на один электрон максимальна. Следует отметить, что в этой же точке члены (б) и (г) на рис. 2 имеют одинаковые значения. Кроме того, среднеквадратичное отклонение относительных мощностей процессов от средней относительной мощности, приходящейся на один процесс ($1/3$) минимально в точке Столетова.

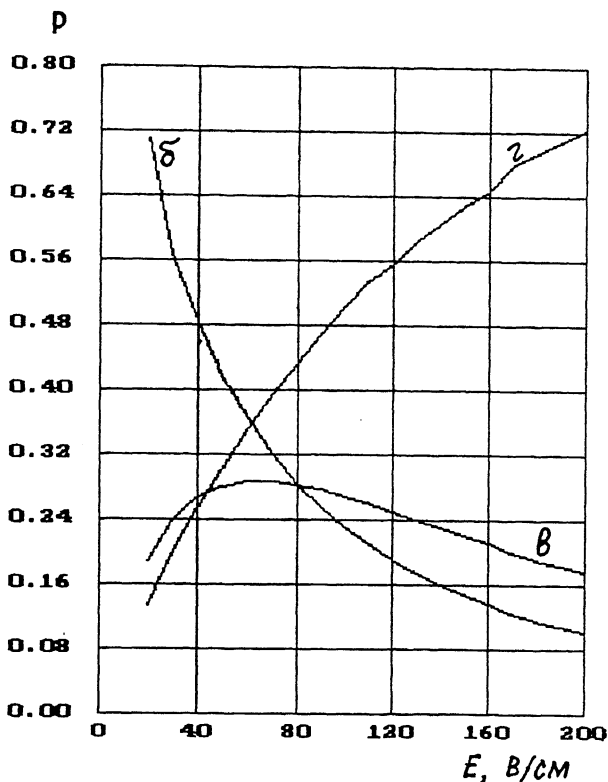


Рис. 2.

Интересно, что мощность, набираемая от поля, пропорциональна E^2 , это связано с пропорциональностью скорости дрейфа величине электрического поля для широкого диапазона полей. Нарушение уравнения баланса мощностей не превышает 1.5%, что свидетельствует о корректности метода Монте-Карло применительно к данной задаче. С увеличением числа статистических электронов и уменьшением шага сетки по координате погрешность падает.

Список литературы

- [1] Boeuf J.P., Marode E.A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2169-2187.
- [2] Алгазов Г.Д. // ЖТФ. 1970. Т. XL. В. 1. С. 97-107.
- [3] Labahn R.W., Callaway J. // Phys. Rev. 1970. A. V. 2. N 2. P. 366-369.
- [4] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. С. 543.

Поступило в Редакцию
26 июля 1995 г.