Math-Net.Ru
All Russian mathematical portal

L. I. Pushina, V. D. Yuditskii, Применение метода Монте-Карло к расчету термоэлектронного преобразования, *TVT*, 1967, Volume 5, Issue 1, 152–154

https://www.mathnet.ru/eng/tvt5371

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
https://www.mathnet.ru/eng/agreement

Download details:
IP: 18.97.9.175
January 21, 2026, 15:15:01

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Том 5 *1967* *№ 1*

УДК 537.581:517.11.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО К РАСЧЕТУ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Л. И. Пушина, В. Д. Юдицкий

Метод Монте-Карло использован для расчета процессов переноса в ТЭП с учетом рассеяния. Построена вольтамперная характеристика. Проводится исследование влияния магнитного поля на процесс переноса.

Затруднения, возникающие при аналитическом исследовании процессов переноса в термоэлектронном преобразователе, можно преодолеть путем моделирования процесса переноса на ЭВМ. В простейшем случае целесообразно ограничиться лишь расчетом переноса электронов. Метод расчета аналогичен методу Монте-Карло для расчета переноса нейтронов, с той разницей, что движение электронов рассматривается в электрическом и магнитном полях.

Процесс переноса в постоянном электрическом поле. Физические условия задачи следующие:

1) имеются две бесконечные пластины, поддерживаемые при температурах $T_к > T_а$ (катод и анод), разделенные межэлектродным зазором шириной L. Зазор заполнен слабоионизированным паром цезия, давление которого p.

2) источником электронов является катод; коэффициент отражения электронов от катода и анода равен нулю,

3) рассеяние электронов учитывается введением среднего сечения парного соударения с атомом цезия $\sigma = 2 \cdot 10^{-14}$ *см*^{2}. Рассеяние считается изотропным в системе центра масс и практически изотропно в лабораторной системе координат,

4) в межэлектродном зазоре существует полная компенсация пространственного заряда. Это предположение соответствует принятому в работе [2] для расчета бесстолкновительного режима. Соответственно напряженность электрического поля в зазоре E не зависит от координат.

Основу расчета вольтамперной характеристики составляет определение методом Монте-Карло вероятности для электрона, покинувшего катод, достижения анода. Статистический метод расчета применяется потому, что траектория движения электрона в заданном электрическом поле и при фиксированных $T_к$, $T_а$ и p — случайная функция координат ввиду наличия рассеяния. Между столкновениями движение электрона описывается уравнениями механики материальной точки (не учитываются коллективные процессы). Длительность свободного движения или фактическая длина свободного пробега «разыгрывается» в процессе счета. Другими случайными величинами, участвующими в расчете, являются вектор начальной скорости и вектор скорости после соударения. В результате факт падения электрона на анод или на катод — случайное событие. При достаточно большом числе испытаний

$$P_а \approx n / N, \tag{1}$$

где n — число электронов, достигших анода; N — полное число испытаний; $P_а$ — вероятность достижения анода.

Решение задачи было запрограммировано для ЭВМ М-20.

Задавая различные значения электрического поля и проводя серии испытаний для различных полей, можно получить зависимость

$$P_а = P_а(E), \tag{2}$$

которая пересчитывается в вольтамперную характеристику

$$j = I_0 P_а = f(V), \quad V = W_к - W_а + EL, \tag{3}$$

где j — ток через преобразователь; I_0 — ток электронной эмиссии катода; V — напряжение на нагрузке; $W_к$, $W_а$ — работы выхода катода и анода.

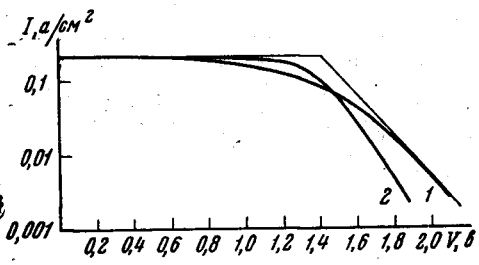

Рис. 1

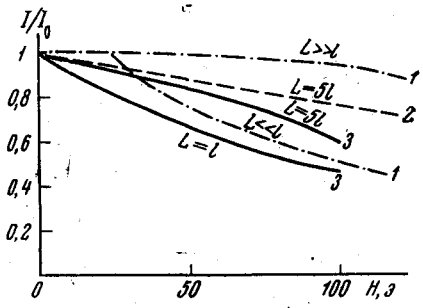

Рис. 2

Рис. 1. Результат расчета $V - A$-характеристики методом Монте-Карло

1 — экспериментальная вольтамперная характеристика диода в плазменном режиме [3]; *2* — расчетная характеристика. $T_к = 1800°$ К; $T_а = 703°$ К; $T_{Cs} = 503°$ К; $W_к = 3{,}33$ *эв*; $W_а = 1{,}93$ *эв*

Рис. 2. Результаты расчета влияния магнитного поля на ток насыщения

1 — эксперимент [4]; *2* — расчет [5]; *3* — расчет методом Монте-Карло (L — величина зазора, l — средняя длина свободного пробега)

Здесь не учитываются приэлектродные скачки потенциала, что объясняется стремлением сделать программу доступной для вычислительной машины, имевшейся в распоряжении авторов. Тем самым применимость метода ограничивается случаями, где учет скачков несуществен (недокомпенсированные режимы, малые разности потенциалов, приложенные к плазме).

Пример расчета вольтамперной характеристики показан на рис. 1. Ввиду упрощающих предположений, принятых в расчете, результаты, представленные на рис. 1, носят иллюстративный характер. В общем случае ТЭП для адекватного описания процессов требуется значительно более детальное рассмотрение, которое, видимо, возможно принципиально, но ограничивается быстродействием и объемом памяти ЦВМ.

Перенос электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Расчет вольтамперной характеристики в присутствии поперечного магнитного поля отличается лишь уравнениями движения электрона между столкновениями. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Поскольку относительное изменение вероятности $P_а$ зависит лишь от соотношения между шириной зазора, длиной свободного пробега электрона и ларморовским радиусом, учитываемых нашей моделью, можно ожидать качественного совпадения результатов расчета с экспериментом, что действительно имеет место.

Зависимость точности метода от числа испытаний. «Точное» значение величины $P_а$ есть математическое ожидание n/N

$$P_а = M(n/N). \qquad (4)$$

Согласно теореме Бернулли, для всякого $\varepsilon > 0$ и $\delta > 0$ существует число испытаний N, такое, что с вероятностью, большей $(1-\varepsilon)$, n/N будет отличаться от $P_а$ меньше, чем на δ

$$\mathcal{P}\left(\left|\frac{n}{N} - P_а\right| < \delta\right) > 1 - \varepsilon. \qquad (5)$$

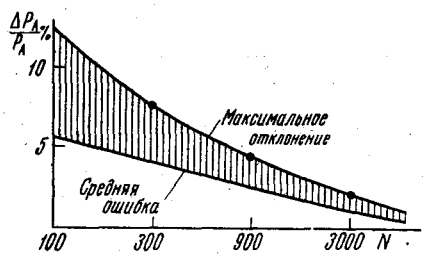

Рис. 3. Зависимость относительной ошибки метода от числа испытаний в серии

Если $P_а$ известно, то $\overline{|n/N - P_а|}$ есть средняя погрешность метода. При неизвестном $P_а$ оценка ошибки может быть сделана, если взять в качестве достоверного значения $\bar{P}_а = \overline{n/N}$, где $\overline{n/N}$ — среднее по достаточно большому числу серий испытаний. Было просчитано пять серий испытаний при некотором фиксированном поле и величине зазора. Каждый набор серий отличался числом испытаний в серии: $N_1 = 100$, $N_2 = 300$, $N_3 = 900$, $N_4 = 3000$. Погрешность определялась из соотношения

$$\Delta P_а = |\bar{P}_а - P_а|. \qquad (6)$$

Результаты расчета приведены на рис. 3. Выбранная для расчета погрешности точка соответствует значению $P_а = 0{,}6$, тогда как на вольт-амперной характеристике есть точки, в которых $P_а = 1$ или $P_а \ll 1$. При $P_а \to 1$ погрешность уменьшается пропорционально $\sqrt{1 - P_а}$, а при $P_а \to 0$ — увеличивается как $\sqrt{1/P_а}$ [1].

Москва

Поступила в редакцию
3 II 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Шрейдер и др. Метод статистических испытаний (метод Монто-Карло), 1962.
2. А. И. Ансельм. Термоэлектронный вакуумный термоэлемент. Изд-во АН СССР, 1951.
3. Г. Н. Хатсопоулос. Proc. IEEE, 51, 5, 1963.
4. Н. Д. Моргулис, Ю. П. Корчевой. Укр. физ. ж., 7, 1014, 1962.
5. Ю. К. Гуськов, В. П. Пащенко, И. П. Стаханов, Э. А. Стумбур. Ж. техн. физики, 34, 6, 1964.