

спектра сигналов и расстройкой несущих частот для получения заданного коэффициента фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Китокова К. Proc. IEEE, **61**, 10, 1973.
2. Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М., 1963.
3. Казаков И. А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. М., 1973.
4. Тагер А. С., Ходневич А. Д., Цебиев А. М. «Изв. вузов», радиоэлектроника, **12**, 9, 1969.

Поступила в редакцию
6.9 1974 г.

Кафедра
физики колебаний

УДК 534.222 : 621

Л. М. ВОЛКОВА, А. М. ДЕВЯТОВ, Е. А. КРАЛЬКИНА,
Н. Н. СЕДОВ, М. А. ШЕРИФ

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛЯРИЗУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ В ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) является одной из важнейших характеристик плазмы газового разряда. Теоретический расчет ФРЭЭ сильно затруднен, так как неизвестны сечения многочисленных элементарных процессов, происходящих в плазме, поэтому тем большее значение приобретают экспериментальные методы определения ФРЭЭ. Сейчас наиболее широко распространенным методом определения ФРЭЭ является метод второй производной тока на зонд [1]. Однако в ряде случаев применение этого метода технически затруднено. Е. К. Ерощенко в [2] предложил применить метод регуляризации А. Н. Тихонова для расчета ФРЭЭ по измеренной зондовой кривой, т. е. для решения уравнения

$$j(x) = \frac{N_e}{2\sqrt{2m}} \int_x^\infty \frac{V-x}{\sqrt{V}} f(V) dV, \quad (1)$$

где j — плотность электронного тока на зонд, $x=eU$, а U — потенциал плазмы относительно зонда, e — заряд электрона, m — масса электрона, V — энергия электрона, $f(V)$ — ФРЭЭ.

К недостаткам метода второй производной относится невозможность получить информацию об электронах больших энергий, т. е. об электронах, определяющих неупругие процессы 1-го рода, происходящие в плазме. В работе [3] предложено использовать результаты спектроскопических исследований для определения ФРЭЭ в области больших энергий. Действительно, при условии, что возбужденные уровни атомов заселяются в основном за счет прямого возбуждения и каскадных переходов, а рассеяются за счет спонтанных переходов, интенсивности спектральных линий связаны с ФРЭЭ формулой

$$I(x) = N_0 N_e h \nu(x) \int_{eV_k(x)}^\infty Q(x, V) \sqrt{V} f(V) dV, \quad (2)$$

где $I(x)$ — интенсивность спектральной линии, x — параметр, характеризующий данную спектральную линию, N_0 — концентрация нормальных атомов, N_e — концентрация электронов, h — постоянная Планка, $\nu(x)$ — частота спектральной линии, $Q(x, V)$ — оптическая функция возбуждения спектральной линии, $V_k(x)$ — потенциал возбуждения спектральной линии. Решая уравнение (2), можно получить ФРЭЭ в области энергий, превышающих величину $eV_k(x)$.

В нашей работе апробируются изложенные методы. Прежде всего уравнения (1) и (2) являются интегральными уравнениями Вольтерра 1-го рода, которое после

несложных преобразований можно свести к интегральному уравнению Фредгольма 1-го рода [2, 3], для решения которого необходимо применить метод регуляризации А. Н. Тихонова [4]. Предварительно следовало выяснить влияние погрешности исходных данных, т. е. погрешности измерения зондового тока для уравнения (1) и погрешности измерения интенсивностей спектральных линий для уравнения (2) на точность восстанавливаемой ФРЭЭ. Результаты решения ряда модельных задач убедительно показали, что погрешность в определении средней энергии по рассчитанным распределениям для обоих уравнений порядка погрешности исходных данных [5]. Кроме того,

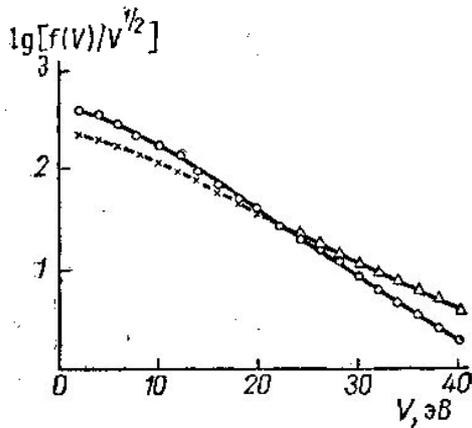


Рис. 1. ○ — ФРЭЭ, рассчитанная по формуле (1), △ — ФРЭЭ, рассчитанная по формуле (2), × — ФРЭЭ, полученная методом второй производной

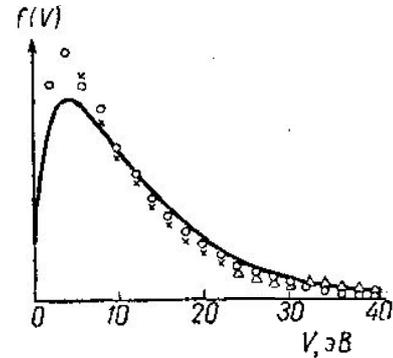


Рис. 2. — — функция распределения Максвелла, ○ — ФРЭЭ, рассчитанная по формуле (1), × — ФРЭЭ, рассчитанная по формуле (2) по линиям цезия, △ — ФРЭЭ, рассчитанная по формуле (2) по линиям гелия

рассчитывая ФРЭЭ по зондовому току, можно получить надежную информацию о распределении электронов больших энергий. Все расчеты проводились по программе, разработанной в ВЦ МГУ [6].

Далее следовало применить изложенные методы для расчета ФРЭЭ по результатам эксперимента. Измерения проводились в положительном столбе низковольтной дуги в гелии в интервале давлений 0,05—0,4 мм рт. ст. при токах от 10 до 100 мА. На рис. 1 приведены результаты вычислений ФРЭЭ по зондовой кривой и по интенсивности спектральных линий в чистом гелии при давлении 0,1 мм рт. ст. и разрядном токе 50 мА. Кривые представлены в полулогарифмическом масштабе. Из рисунка видно, что при энергии электронов порядка 24 эВ кривые, полученные методом второй производной и рассчитанные по интенсивностям спектральных линий, перекрываются и имеют одинаковый наклон; в этой точке они сшиты. Как видим, кривые согласуются вполне удовлетворительно, так как наклон их отличается не более чем на 20%.

На рис. 2 представлены ФРЭЭ, рассчитанные по (1) и (2), а также распределение Максвелла с температурой, определенной из зондовой характеристики. Измерения проводились в смеси гелия и цезия при давлении гелия 0,2 мм рт. ст. и цезия 10^{-4} мм рт. ст., разрядный ток равнялся 100 мА. Спектральные линии цезия имеют низкий потенциал возбуждения (порядка 3 эВ), поэтому, используя для расчета интенсивности линий цезия и гелия, можно получить ФРЭЭ в широком диапазоне энергий. Из рисунка видно, что распределения, полученные по формулам (1) и (2), практически совпадают. Таким образом, из вышеизложенного можно сделать вывод об эффективности применения метода регуляризации А. Н. Тихонова для расчета ФРЭЭ в плазме газового разряда как по зондовой кривой, так и по интенсивностям спектральных линий.

Авторы признательны А. С. Меченову за обсуждение и полезные замечания при проведении расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каган Ю. М. В сб.: «Спектроскопия газоразрядной плазмы». под ред. С. Э. Фриша. Л., 1970, стр. 201.

2. Ерощенко Е. К. Труды Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы и генераторам. Алма-Ата, 1970.
3. Арбузов А. С., Девятков А. М., Шущурин С. Ф. Труды Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы. Москва, 1971.
4. Тихонов А. Н. ДАН СССР, **151**, 501, 1963.
5. Volkova L. M., Devyatov U. M., Kralkina E. A., Shushurin S. P. Proc. XI th ICPIG, Contributed, Paris, Prague, 1973, p. 13.
6. Киуру Э. М., Меченов А. С. Стандартная программа решения интегральных уравнений Фредгольма 1 рода методом регуляризации. Вып. 45, Ротапринт, ВЦ МГУ, 1971.

Поступила в редакцию
10.10 1974 г.

Кафедра
электроники