

Rev., 1973, D8, p. 3446. [5] Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Физматгиз, 1963. [6] Волосов В. М., Моргунов Б. М. Метод осреднения в теории нелинейных колебательных систем. М.: Изд-во МГУ, 1971, с. 28. [7] Михлин С. Г., Смолицкий Х. Л. Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений. М.: Наука, 1965. [8] Дубровин Б. А., Новиков С. П., Фоменко А. Т. Современная геометрия. М.: Наука, 1979. [9] Архангельский Ю. А. Аналитическая динамика твердого тела. М.: Наука, 1977. [10] Краснов М. А. Интегральные уравнения. М.: Наука, 1975. [11] Полевой Б. Г., Рытов С. М. УФН, 1978, 125, с. 519. [12] Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. Т. 2. М.: Мир, 1977. [13] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1973, с. 392. [14] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. [15] Павленко Ю. Г. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1982, 23, № 2, с. 61. [16] Павленко Ю. Г. Изв. вузов. Физика, 1983, № 8, с. 46. [17] Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. М.: Наука, 1978. [18] Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1961.

Поступила в редакцию  
28.11.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 6

УДК 621.372.233

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УСЛОВИЙ ТЕРМАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ ПОЛЯ

**М. Н. Девятков**, Г. И. Дьяконов, Г. И. Овчинникова

(кафедра радиофизики СВЧ)

В некоторых типах вакуумных электронных приборов СВЧ диапазона электронный поток после взаимодействия с переменным электрическим полем поступает в область с высокой плотностью пространственного заряда. Это имеет место, в частности, в приборах с отражающимся электронным пучком, к которым относятся отражательные клистроны, отражательные генераторы дифракционного излучения, а также электронные детекторы и смесители, работающие в режиме существования потенциального барьера пространственного заряда. Оценки, сделанные в работах [1, 2], показывают, что в таких ситуациях могут реализоваться условия, когда возмущения, внесенные в электронный поток воздействием СВЧ поля (их можно рассматривать как возбуждение в потоке волн пространственного заряда или просто как модуляцию скоростей электронов), затухают. Энергообмен же, имевший место при взаимодействии с полем, проявляется в этом случае в изменении температуры, характеризующей восстановившееся равновесное распределение электронов по скоростям. Это и означает, что электронный поток термализован. Косвенные эксперименты (например, [3]) подтверждают такие представления, однако желательна и прямая экспериментальная проверка точности условий термализации [1], поскольку эти условия получены в рамках определенных допущений.

Схема эксперимента заключается в следующем. Электронный поток последовательно пропускается через систему взаимодействия с СВЧ сигналом и межэлектродный промежуток, в котором создается потенциальный барьер пространственного заряда, а затем поступает в анализатор скоростей электронов. Сопоставляя спектры, полученные в отсутствие и при воздействии СВЧ сигнала, можно установить, соответствует ли спектр возмущенного потока температуре, отличной от исходной. Если это так, то при данных условиях термализация имеет

место. Поскольку при такой постановке задачи достаточная информация содержится лишь в значениях температуры, целесообразно использовать простейший метод анализа спектров — метод задерживающего потенциала.

При использовании метода задерживающего потенциала исследуется не непосредственно сама функция распределения электронов по скоростям (энергиям), а ее интегральное представление (измеряются так называемые кривые задержки). В случае термализованного электронного потока ток на коллекторный электрод с задерживающим потенциалом  $U_{\text{зад}}$  равен  $I_{\text{колл}} = I_0 e^{U_{\text{зад}} \epsilon_0 / (kT)}$  ( $I_0$  — ток, входящий в анализатор) и кривая задержки, т. е.  $I_{\text{колл}} = f(U_{\text{зад}})$ , позволяет непосредственно определить значение температуры электронов  $T$ . Если же электронный поток подвергнется воздействию СВЧ поля, но термализация отсутствует, то отражение этой ситуации на виде кривых задержки требует дополнительного обсуждения.

Максвелловский спектр начальных скоростей невозмущенного электронного потока, записанный в единицах кинетической энергии, имеет вид [4]

$$dn(\epsilon_x) = \frac{1}{kT} e^{-\epsilon_x / kT} d\epsilon_x, \quad (1)$$

где  $dn$  — количество электронов, кинетическая энергия которых, соответствующая их скорости вдоль оси  $x$ , лежит в интервале  $\epsilon_x \div \epsilon_x + d\epsilon_x$ ,  $k$  — постоянная Больцмана. Воздействие СВЧ сигнала приводит к синусоидальной модуляции скоростей электронов, которая накладывается на спектр (1). Результирующая вероятность распределения электронов по энергиям в этом случае (при усреднении по времени) связана с начальным распределением (1) соотношением [5]

$$\frac{dn'(\epsilon_x)}{d\epsilon_x} = \frac{1}{\pi kT} \int_{\epsilon_x - E}^{\epsilon_x + E} e^{-\epsilon'_x / (kT)} / \sqrt{E^2 - (\epsilon_x - \epsilon'_x)^2} d\epsilon'_x. \quad (2)$$

Здесь  $E$  — кинетическая энергия, соответствующая амплитуде модуляции скоростей.

Вид распределения, полученный численным интегрированием (2) для нескольких значений амплитуды модуляции, показан на рис. 1, а (кривая 1 — невозмущенное распределение (1)). Отметим две характерные особенности. Первая из них заключается в том, что в результате модуляции существенно трансформируется начальная область спектра ( $\epsilon_x \leq E$ ), которая в принципе отличается от начального стационарного распределения и распространяется на значения  $\epsilon_x < \epsilon_0$ , где  $\epsilon_0$  — минимальная энергия электронов в невозмущенном потоке. Вторая особенность наблюдается в области  $\epsilon_x > E$ . Здесь характер зависимости  $dn'(\epsilon_x)/d\epsilon_x$  чисто экспоненциальный, причем показатель экспоненты определяется той же температурой, что и начальное невозмущенное распределение. В соответствии с этими результатами кривые задержки нетермализованного потока должны иметь вид, показанный на рис. 1, б. Можно видеть, что воздействие СВЧ сигнала приводит к сдвигу кривых задержки на шкале потенциала на величину, соответствующую амплитуде модуляции, и к отклонению от линейной зависимости вблизи нулевого задерживающего потенциала. Эти признаки, однако, трудно использовать для определения состояния электронного пучка, поскольку такого же вида деформации кривых задержки могут наблюдаться и в случае невозмущенного потока, правда, по совершен-

но другим причинам (контактная разность потенциалов, неоднородность реального электронного потока и т. п. [6]). Поэтому целесообразно ориентироваться на экспоненциальные (линейные в полулога-

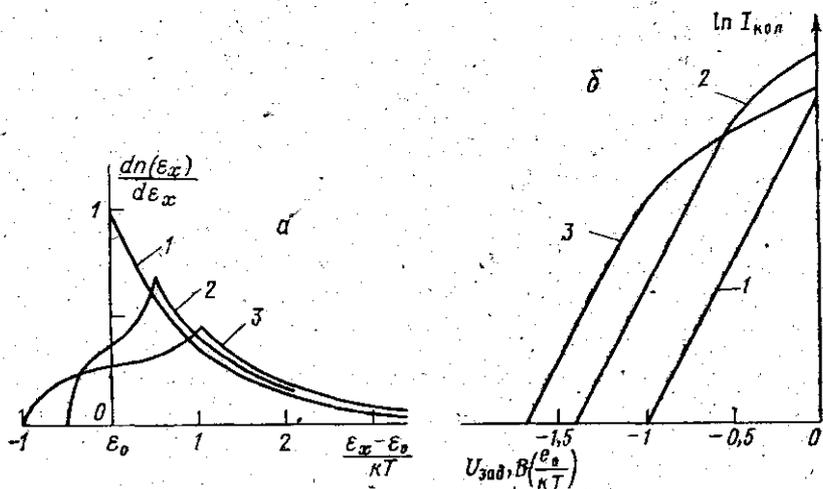


Рис. 1. *а* — Распределение электронов по энергиям: кривая 1 — невозмущенный поток, 2 — при наличии модуляции с амплитудой  $E=0,5kT$ , 3 — с амплитудой  $E=kT$ . *б* — Кривые задержки, соответствующие спектрам 1, 2, 3 рис. *а*

рифмическом масштабе) участки кривых задержки: в случае возмущенного, но нетермализованного потока наклон этих участков, определяемый температурой электронов, должен быть точно таким же, как и для невозмущенного пучка. Наличие же термализации будет приводить к изменению наклона, т. е. к изменению температуры на некоторую величину  $\Delta T$  по сравнению с ее начальным значением.

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено специальное устройство, конструкция которого схематически показана на рис. 2, *а*. Оно состояло из электронной пушки (катод 1 и ускоряющая сетка 2), двухэлектродного промежутка (сетки 3 и 4), к которому через коаксиальный ввод 5 подводился СВЧ сигнал, промежутка, образованного сеткой 4 и электродом 6, в котором создавался потенциальный барьер пространственного заряда (распределение потенциала  $U(x)$  и плотности пространственного заряда  $\rho(x)$  в этом промежутке показаны на рис. 2, *б*), и, наконец, промежутка между электродом 6 и коллектором 7, который представлял собой анализатор скоростей по методу задерживающего потенциа-

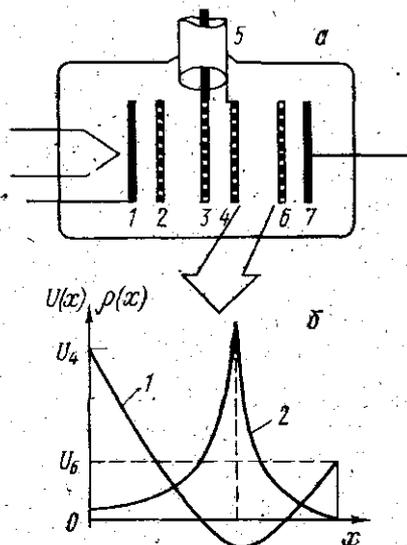


Рис. 2. *а* — Схематическая конструкция экспериментального устройства. *б* — Распределение потенциала  $U(x)$  (1) и плотности пространственного заряда  $\rho(x)$  (2) в промежутке между электродами 4 и 6

ла. Эксперименты проводились в интервале частот сигнала 0,5—1,0 ГГц, где для данного устройства в высокочастотном зазоре (между электродами 3 и 4, см. рис. 2, а) пролетные углы были порядка  $\lambda$ . Амплитуда сигнала в зазоре определялась по сдвигу кривых задержки и составляла доли вольта, т. е. была порядка и менее  $kT/e_0$ . Плотность тока, проходящего высокочастотный зазор и поступавшего в промежуток между электродами 4 и 6, могла изменяться в пределах  $10\text{--}10^3$  А/м<sup>2</sup>. Контроль за существованием потенциального барьера в этом промежутке проводился по виду вольт-амперных характеристик — зависимости тока на электрод 6 от его потенциала относительно катода.

Измерения показали, что при токах  $10^3$  А/м<sup>2</sup> в указанном выше интервале частот действие СВЧ сигнала не приводило к изменению температуры электронов, т. е. термализация отсутствовала. При уменьшении плотности тока наступал момент, когда удавалось зарегистрировать некоторое увеличение температуры  $\Delta T$ , причем оно росло по мере дальнейшего уменьшения тока. Полученные таким образом зависимости отнесенных к току изменений температуры от плотности тока представлены на рис. 3, а. Эти графики показывают, что значения токов, при которых на каждой частоте начинает проявляться процесс термализации, могут быть определены достаточно четко, т. е. регистрируемое изменение температуры превышает ошибку измерений. На частоте сигнала 1 ГГц наблюдается своего рода насыщение рассматриваемой зависимости в области малых токов. Это свидетельствует о достижении условий полной термализации. Для сопоставления наблюдаемых в эксперименте условий начала полной термализации с теоретическими прогнозами на рис. 3, б приведена (по данным работы [1]) расчетная диаграмма. На ней выделены следующие области значений частот и плотностей тока. Области I соответствует случай, когда возбужденные в потоке волны отражаются, не достигнув минимума потенциала, от участка с максимальной плотностью пространственного заряда (см. рис. 1, б). В области II потенциальный барьер становится прозрачным для волн, но распространяются они с затуханием, постепенно увеличивающимся по мере приближения к границе между областями II и III. Область III соответствует полному поглощению волн (на расстоянии порядка электронной длины волны) в окрестности плоскости минимального потенциала. Таким образом, в области II вблизи границы с областью I должна начинаться частичная термализация, на границе же с областью III — полная термализация.

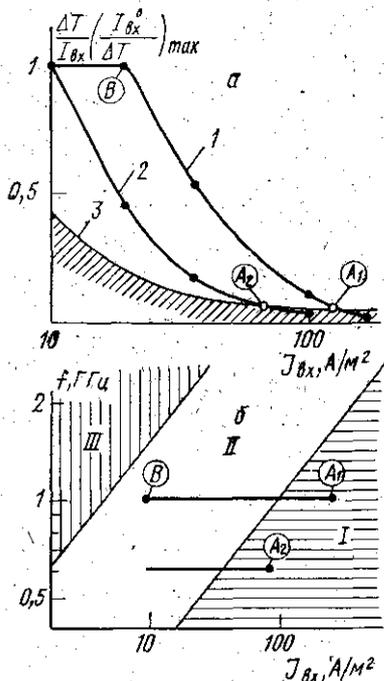


Рис. 3. а — Относительные изменения температуры, вызванные воздействием СВЧ поля с частотой 1 ГГц (1) и 0,6 ГГц (2); кривая 3 — уровень ошибки измерений. Точки  $A_1$ ,  $A_2$  — начало термализации,  $B$  — полная термализация. б — Диаграмма условий отражения возмущений потока от потенциального барьера (область I), прозрачности барьера (II) и полного поглощения (III).  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B$  — экспериментальные точки

зация, соответствующая переходу всей энергии взаимодействия электронного потока с СВЧ полем в нагрев электронов. Заметим, что указанные условия справедливы лишь в случае малых возмущений, когда изменения энергии электронов порядка и меньше их средней тепловой энергии. Наши эксперименты соответствовали этому ограничению.

На диаграмму рис. 3, б нанесены точки, отражающие установленные экспериментально условия начала термализации на частотах 0,6 ГГц ( $A_2$ ) и 1 ГГц ( $A_1$ ) (см. рис. 3, а), а также условия полной термализации, полученные для частоты 1 ГГц (точка В). Некоторое отклонение экспериментальных данных от теоретических оценок объясняется тем, что в расчетах фигурировала плазменная частота неограниченной среды, тогда как в реальных условиях плазменная частота оказывается редуцированной. В целом же эксперимент демонстрирует соответствие условиям, определенным теоретически, и приведенные здесь данные можно считать первым прямым экспериментальным подтверждением представлений о преобразовании СВЧ возмущений электронного потока в его нагрев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Девятков М. Н. Радиотехн. и электроника, 1984, 29, № 3, с. 543. [2] Пирогов Ю. А. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1980, 21, № 5, с. 86. [3] Девятков М. Н., Овчинникова Г. И. Радиотехн. и электроника, 1977, 22, № 6, с. 1239. [4] Иви Г. Проблемы современной физики, 1956, № 6, с. 5. [5] Левин Б. Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. М.: Сов. радио, 1957. [6] Царев Б. М. Контактная разность потенциалов и ее влияние на работу электровакуумных приборов. М.: ГИТТЛ, 1955.

Поступила в редакцию  
13.12.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 6

УДК 535.621.375

### РОЛЬ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ РЕЛАКСАЦИИ В НЕЛИНЕЙНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

В. М. Петникова, С. А. Плешанов, В. В. Шувалов

(кафедра общей физики и волновых процессов)

1. Развитие нелинейной спектроскопии конденсированных сред привело к появлению целого ряда новых экспериментальных методов [1—4]. В основу каждого из них положена некоторая модель нелинейной восприимчивости, базирующаяся на упрощенной системе материальных уравнений. Полученные в ходе эксперимента данные сравниваются с исходной моделью, и, таким образом, проводится идентификация различных механизмов релаксации.

Объективная трудность подобных исследований состоит в том, что в каждом конкретном эксперименте выделение одного из многих механизмов релаксации разной природы, как правило, невозможно. Следствием этого является некоторый разрыв между теорией и экспериментом. В теоретических исследованиях обычно разрабатываются самые общие модели [5], которые малоприменимы в конкретных экспериментальных ситуациях. Экспериментальные же данные часто без должных оснований сопоставляются с простейшими моделями того или иного выделенного процесса.

Целью настоящей работы являлось построение более полной модели нелинейной восприимчивости, учитывающей сразу несколько ти-