

в плоской звуковой волне (после введения поправки на сферичность волны) показана квадратными знаками. Выше 2,5 кГц поправка не вводилась в силу ее малости. X-образными знаками дано усредненное значение чувствительности трех каналов того же приемника, полученное при калибровке в натуральных условиях. На рис. 3 видно хорошее совпадение результатов калибровки в ближнем поле с натурными измерениями. Прямая линия соответствует росту чувствительности градиентного гидрофона по закону 6 дБ на октаву, что находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Теоретически чувствительность рассматриваемого приемника должна расти по этому закону, так как в качестве приемных элементов в нем использованы датчики ускорения. В плоской же волне модули звукового давления p и колебательного ускорения \dot{v} связаны соотношением $p = \frac{\rho c}{\omega} \dot{v}$.

В заключение отметим, что нижняя частотная граница измерений (315 Гц) определялась уровнем излучаемого сигнала и принципиально может быть понижена при использовании более мощного излучателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bauer V. B. Laboratory calibrator for gradient hydrophones.— J. Acoust. Soc. Am., 1966, 39, N 3, p. 585—586.
2. Bauer V. B., Abbagnano L. A., Shumann J. Wide-range calibration system for pressure-gradient hydrophones.— J. Acoust. Soc. Am., 1972, 51, N 5, (2), p. 1717—1724.
3. Herbert H. J., Paine W. L. Velocity hydrophone calibration.— J. Acoust. Soc. Am., 1971, 49, N 3(2), p. 931—932.
4. Захаров Л. Н. О методах калибровки гидроакустических приемников колебательной скорости.— Акуст. журнал, 1971, 17, № 4, с. 553—562.
5. Schloss F., Strasberg M. Hydrophone calibration in a vibrating column of liquid.— J. Acoust. Soc. Am., 1962, 34, N 4, p. 958—960.
6. Sims C. C. Rapid calibration for small hydrophones.— J. Acoust. Soc. Am. 1964, 36, N 2, p. 402.
7. Strasberg M., Schloss F. Calibration of pressure-gradient transducers in an oscillating liquid column.— J. Acoust. Soc. Am., 1973, 54, N 2, p. 533.
8. Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н., Романюк Б. И. О методах градуировки векторного приемника.— Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1976, 17, № 5, с. 529—535.
9. Захаров Л. Н., Иваников А. Н., Андреев М. Ю., Исаев В. В., Нюнни Б. Н. Определение частотных характеристик чувствительности векторного приемника на низких частотах в замкнутых объемах.— В кн.: Тезисы докладов научно-технической конференции по договору о сотрудничестве между МГУ и ПО АвтоЗИЛ. М., 1978, с. 42.

Поступила в редакцию
21.06.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1980, т. 21, № 5

УДК 621.372.233

Ю. А. ПИРОГОВ

ЗАТУХАНИЕ ЛАНДАУ В НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКАХ

Распространение волн пространственного заряда в электронных потоках обычно рассматривается без учета диссипативного рассеяния волновой энергии [1]. Чаще всего это оправдано, так как в отличие от

газоразрядной плазмы [2] в ускоренных электронных потоках плотность пространственного заряда и число захваченных волной электронов недостаточны для эффективного действия затухания Ландау [3], основного механизма релаксации неравновесных бесстолкновительных ансамблей заряженных частиц. Однако поглощение (затухание) плазменных волн в электронных потоках оказывается существенным, когда электроны затормаживаются до уровня тепловых скоростей и плотность объемного заряда становится значительной. В таких условиях действует широкий класс электронных приборов СВЧ: генераторов с тормозящим полем, отражательных клистронов, электронно-волновых детекторов [4, 5] и др. Параметры подобных электронно-волновых систем весьма неоднородны, так как потенциал пространства падает вдоль потока от сотен — тысяч вольт до нуля, и рассмотрение волновых процессов в них требует разработки специальных методов анализа с учетом диссипации волновой энергии. Метод кинетического уравнения Власова в применении к электронным потокам пока не привел к желаемым результатам: соответствующие решения [6], к сожалению, не охватывают режим ограничения тока пространственным зарядом (ОТПЗ), а, как показано ниже, практически только в этом режиме затухание волн в потоке и является существенным.

В этой связи оказывается весьма продуктивным применение метода импедансных характеристик [7], при котором электронный поток представляется в виде отрезка неоднородной линии передачи [1]. Волновой импеданс $Z(x)$ и постоянная распространения $\beta(x)$ в каждом сечении x такой эквивалентной линии связаны, как нетрудно показать с помощью выражений [1], соотношением:

$$Z(x) = \frac{1}{\epsilon_0 S \omega \beta(x)}, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S — сечение потока; $\omega = 2\pi f$.

В отличие от традиционной формулировки [1], когда $Z(x)$ и $\beta(x)$ являются действительными (среда без потерь), обобщим (1) на электронно-волновую среду с поглощением, определяемым затуханием Ландау [3]. Для этого будем полагать $\beta(x)$ комплексным в виде:

$$\beta(x) = \frac{\omega_p(x)}{v(x)} - i \frac{\gamma_L(x)}{v(x)}, \quad (2)$$

где $v(x) = \sqrt{\frac{2e}{m} V(x)}$ — скорость электрона в точке x ;

$$\gamma_L(x) = \omega_p(x) \sqrt{\frac{5}{8}} (kD)^{-3} \exp\left(-\frac{1}{2k^2 D^2} - \frac{3}{2}\right)$$

— параметр затухания Ландау [3];

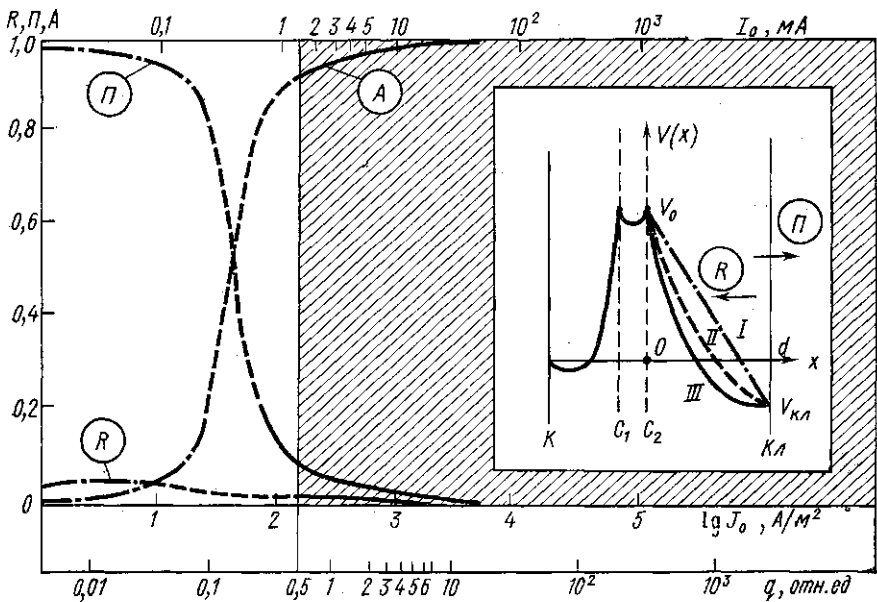
$$\omega_p(x) = 1,83 \cdot 10^8 \left(\frac{J_0}{\sqrt{V(x)}}\right)^{1/2} \text{ — плазменная частота;}$$

$$kD = \frac{\omega}{v_\phi(x) \omega_p(x)} \sqrt{\frac{k_B T}{m}}; \quad v_\phi(x) = \frac{v(x)}{1 \pm \omega_p(x)/\omega}$$

— фазовая скорость волны. Если считать, что и в случае среды с поглощением соотношение (1) выполняется, то для волнового импеданса

$Z(x)$, определяемого подстановкой (2) в (1), также получается комплексное выражение.

В такой постановке анализ распространения волн в электронных потоках можно осуществлять импедансно-матричным методом [8], развитым на основе [7] для произвольных слоисто-неоднородных сред с поглощением. Не ограничивая общности сделанных утверждений, рассмотрим один практически важный пример диссипации волн пространственного заряда, возбуждаемых СВЧ-полем между сетками C_1 и C_2 отражательного клистрона (см. рисунок), при распространении волновых возмущений в промежутке между сеткой C_2 и коллектором $Kл$ (отражателем). Допустим, что система взаимодействия находится



Зависимость коэффициента прохождения Π , отражения R и поглощения A волн пространственного заряда от параметра q , входящего тока I_0 и его плотности $J_0 = I_0/S$. Сплошные кривые соответствуют параболическому распределению потенциала $V(x)$, штриховые — экспоненциальному, штрихпунктирные — линейному

под высоким потенциалом $V_0 \sim 10^2 - 10^3$ В, а на коллекторе промежутка имеется небольшой отрицательный потенциал порядка теплового $V_T = k_B T/e$, где $k_B T$ — больцмановская энергия, соответствующая температуре T электронного потока. В зависимости от плотности тока электронного пучка J_0 распределение потенциала $V(x)$ в промежутке « $C_2 - Kл$ » может быть линейным (кривая I на рисунке), с провисанием без минимума (II) или с минимумом потенциала (III). Именно такие распределения потенциала характерны для различных режимов электронного детектирования [4, 5].

Результаты проведенных на ЭВМ по методике [8] расчетов коэффициентов прохождения Π , отражения R и поглощения A волн пространственного заряда для трех указанных типов распределения потенциала приведены на основном поле рисунка. Графики коэффициен-

тов трансформации волновых возмущений даются в зависимости как от плотности тока J_0 , входящего в промежуток « $C_2 - Kl$ » ($J_0 = I_0/S$, где $S = 10 \text{ мм}^2$), так и от нормированного параметра пространственного заряда

$$q = J_0 d^2 / LV_0^{3/2},$$

где $L = 2,33 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^{3/2}$ — постоянная Ленгмюра, $V_0 = 300 \text{ В}$, $d = 5 \text{ мм}$, $J_0 \in [1 - 10^5 \text{ А/м}^2]$. Можно показать, что безразмерный параметр q определяет режимы пространственного заряда в рассматриваемом промежутке, причем при $q > 0,5$ реализуется режим ОТПЗ, а при $q < 0,5$ — режим полного прохождения тока (на рисунке зона ОТПЗ отмечена штриховкой). В расчете на ЭВМ и при построении кривых, показанных на рисунке, предполагалось, что при малых значениях параметра пространственного заряда $q \leq 0,01$ реализуется распределение потенциала по типу I; при $0,01 \leq q \leq 0,5$ справедливо распределение II, а при $q \geq 0,5$ имеет место распределение III.

Из графиков, представленных на рисунке (расчет проведен для частоты $f = 10 \text{ ГГц}$), видно, что при $q > 0,1$ происходит интенсивное поглощение волн пространственного заряда, причем в режиме ОТПЗ ($q > 0,5$) $A \approx 1$. В режиме полного прохождения тока ($q < 0,5$) поглощение волн пространственного заряда с уменьшением q падает и при $q < 0,01$ становится пренебрежимо малым.

Полученные результаты позволяют, в частности, утверждать, что действие электронных детекторов СВЧ при малом влиянии пространственного заряда [4, 5] адекватно описывается кинематическим механизмом сортировки электронов по скоростям [9], тогда как в режиме ОТПЗ и близких к нему ($q > 0,1$) [4, 10] при малых сигналах следует учитывать трансформацию кинематической моды СВЧ-возмущения в моду Ландау, т. е. в локализованное по спектру скоростей возмущение электронов, находящихся в черенковском резонансе с плазменной волной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевчик В. Н., Шведов Г. Н., Соболева А. В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на СВЧ. Саратов, 1962, 335 с.
2. Александров А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы. М., 1978, 407 с.
3. Ландау Л. Д. О колебаниях электронной плазмы. — ЖЭТФ, 1946, 16, с. 574—583.
4. Девятков М. Н., Костиенко А. И., Пирогов Ю. А., Романюк С. К. Исследование отражательных клистронов в режимах детектирования и смещения. — Электронная техника, сер. 1. Электроника СВЧ, 1970, № 9, с. 86—90.
5. Лебедев Р. В. Детектирование на отражательных клистролах сантиметрового диапазона. — Вести. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1978, 19, № 6, с. 64—67.
6. Кузнецов В. Л. Распространение высокочастотных возмущений вдоль плоского электронного потока. — Вести. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1975, 16, № 5, с. 516—525.
7. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М., 1957, 502 с.
8. Козарь А. В., Колесников В. С., Пирогов Ю. А. О применении метода импедансных характеристик для анализа распространения волн в многослойных структурах с поглощением. — Вести. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1978, 19, № 2, с. 76—83.
9. Пирогов Ю. А. О механизме детектирования СВЧ-сигналов с помощью отражательных клистронов. — Вести. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1971, 12, № 6, 661—667.
10. Девятков М. Н., Овчинникова Г. И. Определение пороговой температурной чувствительности межэлектродного промежутка с виртуальным катодом. — Радиотехника и электроника, 1977, 22, № 6, с. 1239—1245.

Поступила в редакцию
05.11.79