

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

03; 04; 08

Журнал технической физики, т. 60, в. 11, 1990.

© 1990 г.

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА,
ВОЗБУЖДЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ

Л. П. Грачев, И. И. Есаков, М. П. Князев, Г. И. Мишин

В областях плазмохимии, где требуется особая чистота получаемых соединений, желательно создавать разряд, удаленный от стенок камеры [1]. При таком расположении зоны энергоподвода возможно конвективное, турбулентное движение газа, что может изменить некоторые его макроскопические свойства, такие, например, как оптические, акустические и т. п. В работе приводятся результаты исследований распространения акустических возмущений через воздух, возбужденный разрядом, удаленным от стенок камеры.

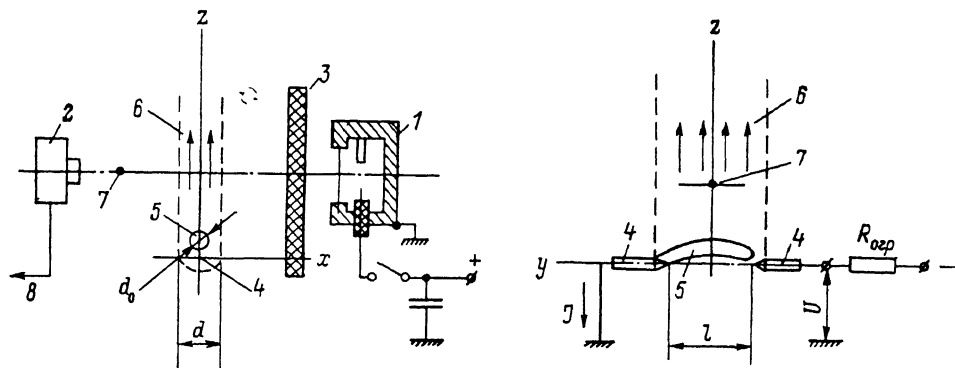


Рис. 1. Схема эксперимента по зондированию акустическим сигналом воздуха, возбужденного электрическим разрядом, стабилизированным конвекцией.

1 — источник акустического сигнала, 2 — приемник акустического сигнала, 3 — поролон, 4 — электроды, 5 — канал анодного столба разряда, 6 — конвективный поток, 7 — ось источник—приемник, 8 — осциллограф.

Эксперимент ставился по схеме, показанной на рис. 1. В камере, откачанной до давления $p=255$ Тор, помещались акустические источник и приемник. В пространстве между ними мог зажигаться разряд. Сравнивались сигналы при его отсутствии и наличии.

Источник с ударным возбуждением мембраны диаметром 10 мм излучал импульс затухающих колебаний. Его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) имела непрерывный спектр с пиком на частоте, равной обратному периоду колебаний [2]. На пути сигнала мог помещаться лист поролона. Затухание звука в нем растет с ростом частоты. В результате максимум АЧХ сигнала смещался в сторону низких частот, что позволяло экспериментировать с двумя сигналами, отличных спектров.

Приемник выполнялся на основе пьезокерамики диаметром 5 мм. Его чувствительность 2 мВ/Тор в полосе от 10^2 до $1.25 \cdot 10^6$ Гц. Уровень выходных шумов 1 мВ.

Источник и приемник устанавливались на расстоянии 130 мм друг от друга. Между ними располагались электроды, как показано на рис. 1, где для удобства нанесены декартовы координаты. Межелектродное расстояние $l=15$ мм. Один электрод заземлялся, а на другой через $R_{огр}=510$ кОм подавалось постоянное напряжение 5 кВ. После пробоя напряжение на них падало до $u=1.5$ кВ и протекал ток $I=6.5$ мА. Анодный столб разряда имел диаметр $d_0=2$ мм. Он выгибался вверх. Максимальный прогиб между его осью и осью у 2.5 мм. Вдоль оси столба можно было помещать нихромовый провод диаметром 0.18 мм и

длиной 2 мм. Измеренная пирометром его температура $T=1800$ К. При горизонтальном смещении провода с оси столб начинал его огибать и температура падала до 1200 К, а расстояние между ними устанавливалось равным 1 мм. Исследования теневым методом показали, что над разрядом существует вертикальный слой пониженной плотности размером по z около 20 мм с нижней границей на 5 мм ниже оси электродов.

Основные экспериментальные результаты в виде осциллограмм приведены на рис. 2. Так как на приемник с задержкой поступала акустическая наводка, то анализировался

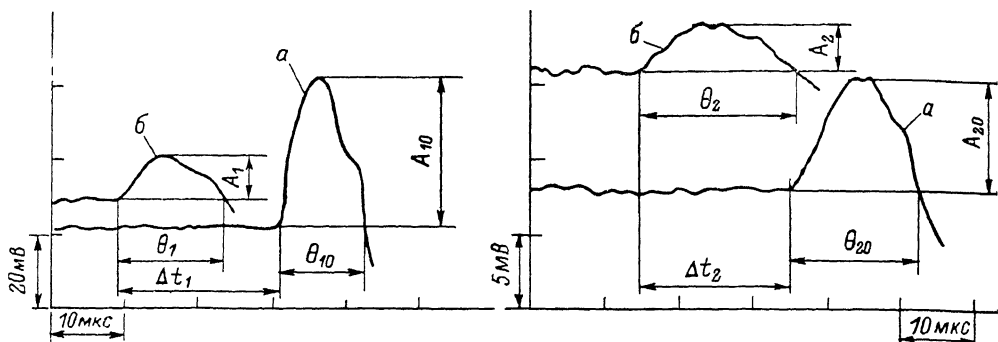


Рис. 2. Осциллограммы акустического сигнала.

a — сигнал без разряда, b — сигнал при включенном разряде.

только первый полупериод сигнала. Измерялись его амплитуда A , длительность θ и временной сдвиг Δt по отношению к контрольному, без разряда. Индексом 1 помечены эти величины для случая отсутствия поролона, 2 — наличия, а 0 — для контрольных осциллограмм. Лучи по вертикали разведены сознательно, а по горизонтали время запуска неизменно. Стабильность измеряемых величин была в пределах $\pm 5\%$. Они не изменялись при конструктивно возможном изменении расстояния между осью электродов и осью источник—приемник от $z=0$ до 20 мм.

При подготовке эксперимента была снята зависимость $A=f(p)$. Наблюдался закон $A \sim 1/p$. Контрольные сигналы не изменялись при варьировании расстояния источник—приемник от 75 до 150 мм, смещении приемника с оси источника на ± 2.5 мм и его повороте на несколько градусов.

Рассмотрим контрольные осциллограммы. $\theta_{10}=11.5$ мкс или $\Lambda=\theta_{10} \cdot C_0=3.9$ мм ($C_0=$

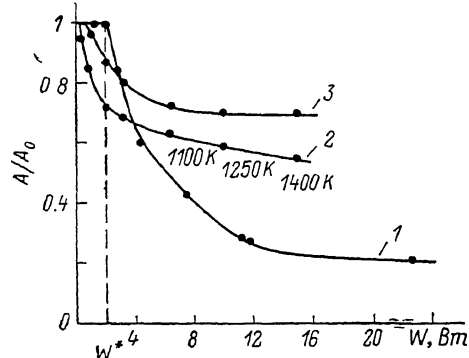


Рис. 3. Относительное изменение амплитуды акустического сигнала, прошедшего через возбужденный воздух, при различной мощности возбуждения.

1 — воздух возбуждается разрядом; 2, 3 — воздух возбуждается нагретой проволокой: 2 — $z=0$, 3 — 20 мм.

$=340$ м/с), что дает значение частоты максимума АЧХ $f_{10}=1/2 \theta_{10}=43$ кГц или $\omega_{10}=2\pi f_{10}=2.7 \cdot 10^5$ 1/с. $A_{10}=40$ мВ, что соответствует давлению в волне около 20 Тор. $\theta_{20}=17.5$ мкс или $\Lambda_{20}=5.9$ мм, $f_{20}=29$ кГц или $\omega_{20}=1.8 \cdot 10^5$ 1/с. $A_{20}=7.4$ мВ, т. е. $A_{20}/A_{10}=0.185$. Это отношение сохранялось при варьировании p .

При наличии разряда сигнал к приемнику приходил быстрее, его амплитуда уменьшалась и длительность росла. При этом, $\Delta t_1=22$ мкс, $A_1=11$ мВ или $A_1/A_{10}=0.28$, $\theta_1=14.5$ мкс или $\theta_1/\theta_{10}=1.26$, $\Delta t_2=20$ мкс, $A_2=3$ мВ или $A_2/A_{20}=0.4$, $\theta_2=21$ мкс или $\theta_2/\theta_{20}=1.2$, т. е. воздух, возбужденный разрядом, является средой с аномальной дисперсией: с ростом частоты скорость и затухание звуковых волн растут.

Проанализируем полученные результаты. Приведенные Δt определяются увеличением скорости звука в зондируемой нагретой области. В предположении треугольного профиля температуры вдоль x с максимумом, равным T , посредине области ширина ее основания, рассчитанная по экспериментальным Δt и T , $d=16$ мм. Это значение согласуется с величиной, оцененной теневым методом.

Объяснение уменьшения амплитуд с учетом простого нагрева сталкивается с трудностями. Изобарический нагрев не приводит к увеличению коэффициента затухания, а в условиях эксперимента его влиянием можно пренебречь [3]. Длина участков изменения температуры больше Δ . Отражение от таких границ практически отсутствует [4]. Оценки показывают, что в разряде электронная концентрация порядка 10^{11} $1/\text{см}^3$ [5] и до 60 % энергии идут на возбуждение колебаний N_2 [5]. Рассчитанная из энергетического баланса при известных J , U , d , l и T средняя скорость конвективного потока, стабилизирующего разряд, $v=36$ м/с. Справочные частота прилипания [5] и константа $V-T$ -релаксации [6] указывают, что при этом значении v ионизация и возбуждение колебаний существуют при z , не превышающих d_0 . Эксперимент же показал независимость результатов при изменении z от 0 до 20 мм. Следовательно, эти явления можно не учитывать.

Следующее усложнение представлений об области зондирования — предположение о турбулентном характере конвекции. В эксперименте число Рейнольдса $\text{Re}=(v \cdot d/2)/\nu=4$ ($\nu=6.6$ $\text{см}^2/\text{с}$ — вязкость), а в [3] указывается, что плоскопараллельное течение неустойчиво при $\text{Re} > 1$. Оценки [3] показывают, что в нашем случае зондируемая область заполнена флуктуационными образованиями масштабом от 8 до 2.5 мм. Для такой среды можно ввести понятие структурной релаксации [7] и представить коэффициент затухания [8]

$$\alpha = \frac{m}{c \cdot \tau} = \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2},$$

где τ — временной параметр релаксационного процесса; $m/2$ — коэффициент, определяющий масштаб дисперсии; $c=c_0 \sqrt{T/300}=8 \cdot 10^3$ м/с — скорость звука.

Соответствующий расчет по A_1/A_{10} и A_2/A_{20} дает $\tau=5.4 \cdot 10^{-6}$ с или $c \cdot \tau=4.5$ мм, что находится в приведенном выше интервале. Для подтверждения этой версии были выполнены контрольные эксперименты.

На рис. 3 дана зависимость A_1/A_{10} от $W=JU$. Видно, что влияние разряда начинается при $W > W^*$. В предположении $T(W)=\text{const}$ оценка дает при $W=W^*$ $\text{Re} \approx 1$, что характерно для границы устойчивости.

Турбулентные пульсации являются источником звука [3]. В эксперименте разряд начинал «звучать» при помещении его по оси камеры диаметром 80 см и $p > 300$ Тор. Превышение порога слышимости, вероятно, происходило и за счет добротности резонатора, и за счет раскочки турбулентности обратной связью. Увеличением W , т. е. сдвигом турбулентного спектра выше резонансной частоты камеры, можно было заставить разряд замолчать. Например, при $p=330$ Тор уменьшение $R_{\text{отр}}$ вдвое приводило к замолканию разряда.

В следующем эксперименте конвективный поток создавался нагретым постоянным током: нихромовым проводом диаметром 0.3 мм и длиной 50 мм. На рис. 3 приведены также зависимости A_1/A_{10} от W при $z=0$ и 20 мм и $p=60$ Тор. При этом пиrometer позволял измерять температуру провода. Некоторые ее значения даны на рисунке. Очевидно, что и в этом случае количественная интерпретация результатов затруднена без привлечения модели турбулизации потока. Температура провода росла с ростом W и падала с ростом p , что существенно различало эксперименты модельный и с разрядом и не позволяло осуществлять их подобие в широком диапазоне параметров.

Таким образом, звуковое зондирование воздуха, возбужденного разрядом, стабилизированным конвекцией, показало существенное уменьшение амплитуды сигнала. Причем по отношению к акустическим колебаниям такая среда характеризуется аномальным законом дисперсии. На экспериментальные результаты непосредственно не влияет ионизация воздуха в разряде и возбуждение колебательных степеней свободы его молекул. Их анализ показал, что они не могут быть объяснены в рамках модели прохождения звука через тепловую неоднородность, сформированную конвективной, ламинарной затопленной струей, стабилизирующей разряд. Анализ результатов и серия контрольных экспериментов показали, что с большой степенью достоверности они могут быть поняты в рамках модели распространения звука по турбулентной среде, хотя данная гипотеза и требует дальнейшей экспериментальной и теоретической проработки.

Авторы выражают благодарность К. В. Ходатаеву за поддержку данной работы и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Быхов Ю. В., Голубев С. В., Гольденберг А. Л., Зорин В. Г. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 4. С. 723.
- [2] Рыжик И. М., Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., 1951. 292 с.

- [3] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1966. С. 155, 184, 406, 424.
 [4] Рыжов О. С. // ПМТФ. 1961. № 2. С. 15.
 [5] Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. С. 82, 273, 325.
 [6] Елеукий А. В., Палкина Л. А., Смирнов В. М. Явления переноса в слабоионизированной плазме. М.: Атомиздат, 1975. С. 117.
 [7] Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., ИЛ, 1957. С. 301.
 [8] Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. М., Наука, 1975. С. 88.

Физико-технический институт
 им. А. Ф. Иоффе АН СССР
 Ленинград

Поступило в Редакцию
 8 июня 1989 г.

09; 10

Журнал технической физики, т. 80, в. 11, 1990

ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАПАЗОНА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В ЧЕРЕНКОВСКОЙ ЛБВ С РЕЛЯТИВИСТСКИМ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ¹

Э. Б. Абубакиров, И. Е. Ботвинник, В. Л. Братман, Д. В. Виноградов,
 Г. Г. Денисов, В. И. Казача, А. К. Красных, М. М. Офицеров,
 Э. А. Перельштейн, А. И. Сидоров

1. До сих пор эксперименты по усилению сигналов диапазона миллиметровых волн релятивистскими электронными пучками проводились главным образом с разновидностями мазеров на свободных электронах (МСЭ) — убитронами [2, 3] и мазерами на циклотронном авторезонансе [4] (исключение составляли работы [5, 6], в которых исследовались ЛБВ на пространственной гармонике волны и твистрон). В то же время ясно, что для получения большой

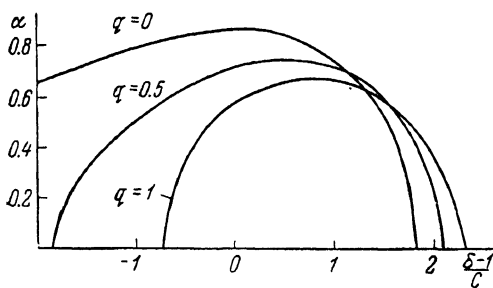


Рис. 1. Зависимость инкремента нарастающей волны от расстройки синхронизма.

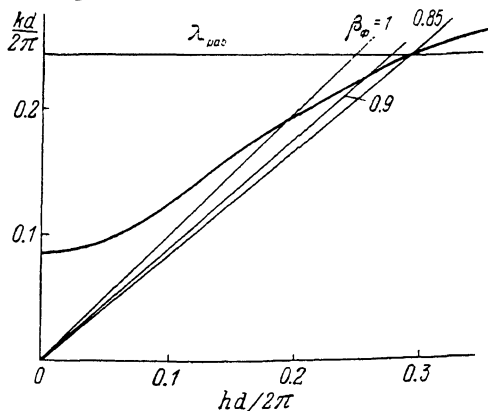


Рис. 2. Дисперсионная диаграмма ЛБВ.

импульсной мощности излучения при сравнительно небольшой средней мощности одними из наиболее простых и эффективных в указанном диапазоне являются приборы, основанные на индуцированном черенковском излучении прямолинейных электронных потоков [7, 8].

При разработке СВЧ усилителей необходимо учитывать, что в приборах с сильноточными электронными пучками в ряде случаев существенна роль высокочастотного пространственного заряда. Неблагоприятное влияние связанных с ним эффектов на КПД меньше в приборах с непрерывным взаимодействием электронов с полем синхронной волны (типа ЛБВ) по сравнению с секционированными приборами (типа клистрона), содержащими участки дрейфа, где синхронная волна отсутствует. Следует отметить, что в миллиметровом диапазоне при короткой

¹ Часть результатов работы докладывалась на VII Всесоюзном симпозиуме по сильноточной электронике [1].