

УДК 533.9

ГЕНЕРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ

К.П. АРОЯН

Институт прикладных проблем физики НАН Армении

(Поступила в редакцию 11 марта 2005 г.)

Представлена новая схема генерации акустических колебаний в тлеющем разряде низкого давления при синусоидально модулированном токе разряда на основе электрон-атомных столкновений. Приведены экспериментально полученные зависимости генерированного акустического давления от параметров разряда для следующих газов и газовых смесей: He, N₂, CO₂, He:N₂=1:1, He:CO₂=1:1, N₂:CO₂=1:1. Получено, что генерированное удельное акустическое давление может принимать значения 3–22 Pa/A_{ток} в зависимости от состава газа и параметров эксперимента.

Возможность возбуждения акустических колебаний в газе, в том числе в плазме, за счет термодинамических процессов была предсказана Рэлеем [1]. При возбуждении разряда только постоянным или только переменным токами возбуждение акустических колебаний описывается через механизмы упругих электрон-атомных столкновений и связано с объемным тепловыделением, зависящим от плотности заряженных частиц, или с отрицательной вязкостью [2,3]. В [4] указано, что полученные согласно такому описанию расчетные результаты не совпадают с экспериментальными и предлагается учитывать также неупругие столкновения. Полученные нами в [5] экспериментальные результаты по генерации звука в плазме CO₂-лазера, возбуждаемой током, содержащим постоянную и переменную компоненты, дали значения, отличающиеся от расчетных согласно [2-4]. Предлагаемая схема генерации акустических колебаний также опирается на упругие столкновения частиц, составляющих плазму, но описывается без использования объемного тепловыделения.

В нашей схеме через разрядную трубку проходил синусоидально-модулированный ток, содержащий постоянную и переменную компоненты. Кварцевая цилиндрическая разрядная трубка, использовавшаяся в эксперименте, имела внутренний диаметр 25 мм и длину 500 мм. На концах трубки были вставлены звукопоглотители с коэффициентом отражения волны давления $< 0,2$, которые обеспечивали режим в трубке, близкий к бегущей волне. Поскольку диаметр трубки (25 мм) намного меньше длины трубки и длины

звуковой волны, то можно считать, что в разрядной трубке формируется плоская бегущая волна.

Модуляция тока разряда производилась на частотах собственных акустических резонансов и антирезонансов трубки $f_R = mV_s/2L$; $f_{AR} = (2m-1)V_s/4L$, где f_R и f_{AR} – собственные резонансные и антирезонансные акустические частоты трубки, V_s – скорость звука в данном газе, которая измерялась отдельно, L – длина трубки, $m = 1, 2, 3 \dots$ – номер гармоники.

Эксперименты проходили следующим образом. В разрядной трубке при данном давлении и типе газа создавался разряд при помощи постоянной составляющей тока разряда. Далее устанавливался режим модулированного тока (тока, содержащего постоянную и переменную компоненты) с определенной частотой и амплитудой, вследствие чего в трубке генерировались акустические колебания такой же частоты. Эти колебания фиксировались микрофоном и спектроанализатором.

Меняя частоту и амплитуду переменной компоненты тока разряда (I) и настройку спектроанализатора, для данных давления газа в трубке (P_0) и постоянной составляющей тока разряда (I_0) можно было снять весь спектр давлений (P_s) акустической волны, генерированной в разряде данного газа.

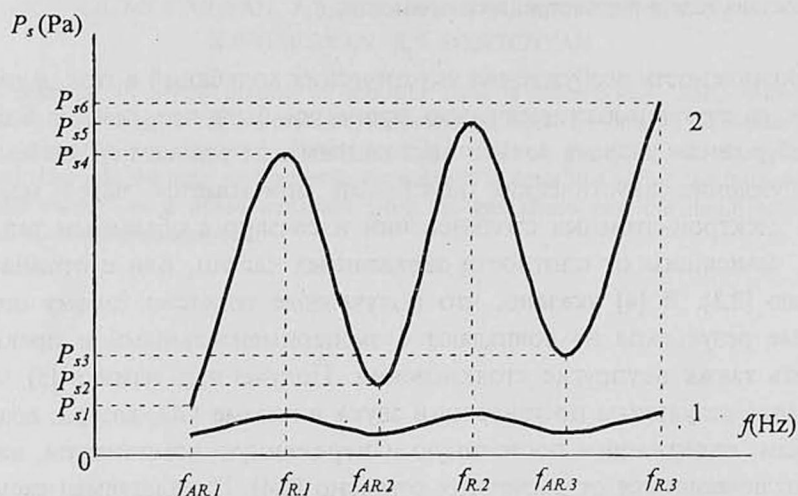


Рис.1. Зависимость величины генерированного акустического давления от частоты акустического сигнала при фиксированных постоянной и переменной составляющих тока разряда. Кривая 1 соответствует давлению газа в трубке $P_{0,1}$, а кривая 2 – давлению $P_{0,2}$. $P_{0,2} > P_{0,1}$.

На рис.1 приведена зависимость величины акустического давления, генерируемого в разрядной трубке, от частоты модуляции (f) при двух разных давлениях газа в трубке. Здесь $f_{R,1} - f_{R,3}$ – частоты первых трех акустических резонансов, а $f_{AR,1} - f_{AR,3}$ – частоты антирезонансов. Отметим, что приведенная зависимость универсальна и наблюдалась для всех исследованных газов.

Из рис.1 видно, что максимальные значения генерированного акусти-

ческого давления соответствуют резонансным, а минимальные значения – антирезонансным собственным акустическим частотам резонатора. В зависимости от типа и состава газа приведенные на рис.1 характеристики смещаются по осям, сохраняя вид. При фиксированных переменной и постоянной компонентах тока разряда, с повышением давления газа в трубке ($P_{0,2} > P_{0,1}$) генерированное акустическое давление (P_s) возрастает, причем прямо пропорционально P_0 . С повышением частоты модуляции, т.е. на более высоких резонансных и антирезонансных акустических частотах трубки величина генерированного акустического давления повышается: $P_{s3} > P_{s2} > P_{s1}, P_{s6} > P_{s5} > P_{s4}$. Отметим, что приведенные результаты получены в разряде чистых газов He, N₂, CO₂ и бинарных смесей He:N₂=1:1, CO₂:N₂=1:1 и He:CO₂=1:1 при давлениях P_0 от 0.1 Торг до 100 Торг, постоянной составляющей тока разряда I_0 от 5 мА до 30 мА и переменной составляющей тока разряда $I_{\sim}$ от 1 мА до 15 мА.

В табл.1 для разных давлений газа в разрядной трубке приведены значения удельных акустических давлений (P'_s), генерируемых в разряде He, N₂ и CO₂ на соответствующих частотах первых акустических резонансов. Акустическое давление измеряется в Па; переменная компонента разрядного тока – А; давление газа в разрядной трубке – Торг. Таким образом, с повышением давления газа в трубке удельное акустическое давление P'_s незначительно падает, но генерированное акустическое давление P_s растет.

Табл.1. Удельные акустические давления, генерируемые в плазме.

P_0 [Торг]	газ		
	P'_s [Па / А·Торг]		
	He	N ₂	CO ₂
6	6.5	5.5	22
12	5.5	4.2	14
25	4	3.3	12
50	3.7	3	6
100	2.4	2.5	3.6

На рис.2 для тех же газов и их бинарных смесей представлены зависимости величины генерированного акустического давления от амплитуды переменной компоненты тока разряда. Видно, что давление генерированного в разряде акустического сигнала при данной постоянной составляющей тока разряда линейно зависит от переменной составляющей тока. С повышением частоты модуляции, точнее, на более высоких резонансных и антирезонансных частотах кривая зависимости меняет угол наклона. При отсутствии переменной компоненты тока разряда ($I_{\sim}=0$) все кривые стремятся к нулю, что и следовало ожидать.

Анализ экспериментальных данных для чистых газов и их смесей показал, что акустическое давление в смеси молекулярных газов равно сумме генерированных давлений в каждой из компонент по отдельности при тех же условиях: $P_{s,R(m)}(\text{мол.газ.1}) + P_{s,R(m)}(\text{мол.газ.2}) = P_{s,R(m)}(\text{мол.газ.1 : мол.газ.2 = 1:1})$, где

m – номер резонанса, $P_{sR(m)}$ – акустическое давление на частоте m -го резонанса.

В случае смеси молекулярного и атомарного газов такая закономерность не наблюдается. Представленные на рис.1 и 2 результаты справедливы для всех исследованных газов и газовых смесей в отмеченных интервалах частот модуляции, величин переменной и постоянной составляющих тока разряда и давлений газа в трубке.

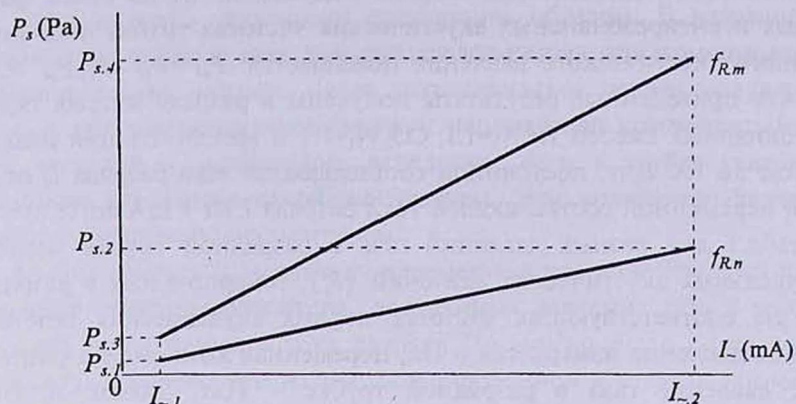


Рис.2. Зависимость величины генерированного акустического давления от переменной составляющей тока разряда при данном постоянном токе при разных частотах модуляции. $f_{R,m} > f_{R,n}$.

Рассмотрим процессы в положительном столбе разряда в каком-либо сечении трубки. Плотность тока в сечении трубки дается выражением $J_e = en_e V_e$, где J_e – плотность электронной компоненты тока, n_e – концентрация электронов и V_e – скорость электронов. Поскольку скорость ионов намного меньше скорости электронов, то весь ток обусловлен электронами. До частот модуляции в несколько десятков Гц основной механизм модуляции – генерация новых носителей, т.е. изменение концентрации электронов n_e . На частотах модуляции выше 1 кГц n_e уже практически не меняется в течение периода модуляции [6]. В этих условиях модуляция тока может быть обусловлена только изменением скорости электронов и можно говорить об изменении значений функции распределения электронов по энергиям. Но изменение этой функции приводит к изменению импульса электронов, который они при столкновениях передают ионам и нейтральным частицам. В результате весь газ в трубке получает дополнительный импульс, который меняется с частотой модуляции. Этот дополнительный импульс можно интерпретировать как избыточное давление – акустическое давление. Оно приблизительно в 10^3 - 10^5 раз меньше давления в разрядной трубке и зависит от условий эксперимента и вида газа.

Давление газа в трубке определяется как $P_0 = n_0 k T_0$, где n_0 – концентрация частиц в трубке, k – постоянная Больцмана, T_0 – температура газа. Генерируемое акустическое давление $P_s = (10^{-5} - 10^{-3}) P_0$. В акустических колебаниях

участвуют все частицы газа, энергия акустических колебаний одной частицы приблизительно $(10^{-5}-10^{-3})kT_e$. Свою энергию, равную kT_e (T_e – электронная температура), при многократных упругих столкновениях электроны передают атомам или молекулам. При модуляции тока разряда средняя энергия электронов изменяется на $(10^{-4} - 10^{-2})kT_e$. При упругом столкновении именно это изменение энергии приводит к небольшой модуляции давления в разрядной трубке – к возникновению акустических волн.

Таким образом, механизм генерации акустических колебаний в плазме взаимосвязан с упругими столкновениями составных частей плазмы (ионы, нейтральные частицы, электроны).

Автор выражает глубокую благодарность акад. А.Р.Мкртчяну и к.ф.-м.н. А.С.Абрамяну за помощь в работе. Работа выполнена при частичной поддержке гранта МНТЦ А-96 и республиканского гранта 1367.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж.В.Стретт (Лорд Рэлей). Теория звука. М., Гостехиздат, 1955.
2. А.И.Осипов, А.В.Уваров. УФН, 162, 1 (1992).
3. Г.А.Галечян. УФН, 165, 1357 (1995).
4. М.К.Мусахьян. Диссертация к.ф.-м.н. Ереван, 2004.
5. А.Р.Мкртчян, А.С.Абрамян, К.П.Ароян, Р.Б.Костанян, К.С.Мкртчян. Труды Конф. ФНТП-2004, 28июня-03июля 2004г. Петрозаводск, Карелия, т.1, с.172.
6. А.С.Федоренко. Диссертация к.т.н. М., 1980.

ՉԱՅՆԱՅԻՆ ԱՆԻՔՆԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՑՈՒՄԸ ՑԱՇՐԱՋԵՐՄԱՍՏԻՎԱՆ ԳԱՋԱՊԱՐՊՈՒՄԱՅԻՆ ՊԼԱՋՄԱՅՈՒՄ

Կ.Պ. ՀԱՐՈՅԱՆ

Ներկայացված է ցածր ճնշման մարմնող պարպման մեջ, պարպման հոսանքի սինուսոիդալ մոդուլացիայի ժամանակ ձայնային ալիքների գեներացման մոդ սխեման հիմնված էլեկտրոն – ատոմային բախումների վրա: Բերված են փորձնականորեն ստացված կախվածություններ՝ գեներացված ակուստիկ ճնշման և պարպման պարամետրերի միջև հետևյալ զազերի և զազային խառնուրդների համար. He, N₂, CO₂, He:N₂= 1:1, He:CO₂= 1:1, N₂:CO₂= 1:1: Ստացված է, որ գեներացված տեսակարար ակուստիկ ճնշումը կարող է ընդունել 3-22 Pa/A-Torr արժեքներ՝ կախված զազի բաղադրությունից և փորձի պարամետրերից:

ACOUSTIC VIBRATION GENERATION IN A LOW-TEMPERATURE GAS-DISCHARGE PLASMA

K.P. HAROYAN

A new scheme of the acoustic vibration generation in a low-pressure glow discharge under a sinus-modulated discharge current by means of electron-atom collisions is presented. Experimentally obtained dependences of the generated acoustic pressure on discharge parameters of the gases He, N₂, CO₂ and binary mixtures He:N₂= 1:1, He:CO₂= 1:1, N₂:CO₂= 1:1 are presented. The generated specific acoustic pressure can gain values 3-22 Pa/A-Torr depending on the gas composition and experimental parameters.