

04;08;12

Особенности генерации звуковых волн в газовом разряде

© А.Р. Арамян, Г.А. Галечян

Институт прикладных проблем физики АН Армении,
375014 Ереван, Армения

(Поступило в Редакцию 19 ноября 1996 г.)

Рассмотрены процессы возникновения звуковых волн в трубке газового разряда постоянного тока наложением переменной составляющей, определены оптимальные условия генерации.

Плавное управление параметрами плазмы при постоянном электрическом токе и давлении газа в разряде является одной из важных задач физики плазмы и применения газового разряда. Одним из действенных способов варьирования параметрами плазмы является генерирование в ней акустических волн [1–3].

Звуковыми волнами, распространяющимися вдоль положительного столба, можно производить сжатие и расширение плазменного столба, вызывать образование ионизационных волн [4,5], создавать однородное распределение возбужденного газа при высоких давлениях, в широких пределах менять температуру электронов и газа в плазме, электрическое поле и т.д. [1–3].

Возбуждение звуковых волн в газовом разряде возможно двумя способами: 1) введением звука в разрядную камеру извне, закрепленным на одном из торцов трубки электродинамическим излучателем; 2) генерацией звуковых волн внутри камеры и добавлением к разряду постоянного тока переменной составляющей [6].

Результаты экспериментальных исследований влияния звуковых волн на параметры плазмы полученных этими двумя способами показывают, что они находятся в полном соответствии друг с другом [1]. Более эффективным способом генерации звуковых волн в разрядной камере является второй способ (переменным током). В ряде случаев этот способ является единственным, в частности при управлении параметрами плазмы в газоразрядных лазерах, в которых на концах трубки установлены зеркала оптического резонатора.

В данной работе рассмотрены процессы возникновения звуковых волн в трубке газового разряда постоянного тока наложением переменной составляющей, определены оптимальные условия генерации. Предложен способ измерения температуры газа в низкотемпературной плазме путем определения резонансной частоты звука в разрядной камере.

Показано, что наибольшая величина амплитуды звуковой волны, генерируемой (на резонансной частоте) в разрядной трубке переменной составляющей тока, зависит от отношения длины разряда к длине трубки (при постоянном давлении). Максимальная амплитуда устанавливается, когда длина плазменного столба равна половине длины трубки и разряд расположен на одной половине камеры. В этом случае совпадение резонансов

двух резонаторов (один вложен в другой) ведет к увеличению амплитуды звуковой волны.

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1. Измерения выполнялись в кварцевой разрядной трубке 1 с внутренним диаметром 6 см и длиной 100 см. К боковой стенке трубки были припаяны шесть вольфрамовых электродов диаметром 1 см; три с одной стороны, три с противоположной, как это показано на рис. 1. Расстояние между электродами 16, 26, 53, 69 и 85 см. Для создания плазмы на электроды подавалось высокое постоянное электрическое напряжение от блока питания 3 через высоковольтную обмотку трансформатора 4. Звуковая волна в разрядной трубке создавалась наложением на постоянный ток синусоидальных электрических колебаний от блока модуляции разрядного тока, состоящего из генератора 5, усилителя 6 и трансформатора 4. К одному из плоских торцов трубки прикреплен микрофон 7, сигнал с которого поступал на осциллограф 8. Разрядная трубка откачивалась насосом 9 до вакуума 10^{-2} мм рт.ст. и затем заполнялась исследуемым газом до рабочего давления, величина которого измерялась U-образным ртутным манометром 10.

Газовый разряд создавался на различных расстояниях между электродами при фиксированном давлении аргона 80 мм рт.ст. и постоянном токе 50 мА. При включении

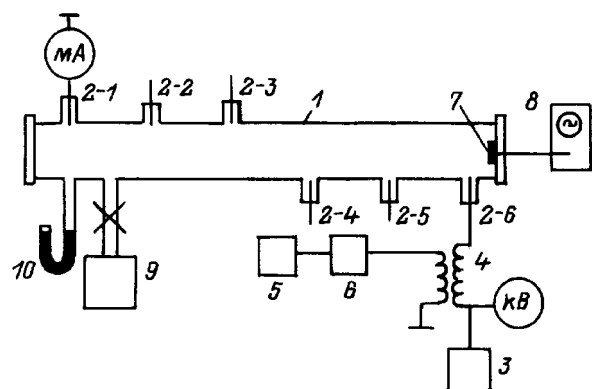


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — кварцевая разрядная трубка, 2 — электроды, 3 — высоковольтный источник постоянного тока, 4 — трансформатор, 5 — звуковой генератор, 6 — усилитель, 7 — микрофон, 8 — осциллограф, 9 — вакуумный насос, 10 — манометр.

(наложении на постоянный ток) переменной составляющей тока в разрядной трубке начиналась генерация звуковой волны, которая детектировалась микрофоном. Измерения производились на частотах вблизи первого резонанса, при котором длина трубки соответствовала половине длины волны.

На рис. 2 представлена зависимость амплитуды звуковой волны в трубке от длины разрядного промежутка при различных частотах вблизи резонанса, из которых видно, что наибольшая амплитуда звука устанавливается при резонансной частоте 184 Гц и длине плазменного столба 53 см, т. е. примерно равной половине длины трубки. Это соответствует четверти длины волны λ . При длине разрядной области больше или меньше $\sim 0.25\lambda$ амплитуда звуковой волны становится меньше. Это явление, по-видимому, можно объяснить следующим образом. Если разряд длиной 0.25λ расположен в конце трубки, то образуется цилиндрический резонатор с одним открытым концом [7]. С открытого конца резонатора происходит излучение звука в ту область трубки, где нет разряда, т. е. в другой резонатор. Когда их резонансы совпадают, происходит наибольшее увеличение амплитуды звуковой волны.

Таким образом, в разрядной трубке, в которой длина плазменного столба равна половине длины трубки и этот разряд расположен в конце трубки, образуются оптимальные условия генерации звуковой волны переменной составляющей тока.

Следует отметить, что создание разряда в середине трубки длиной 53 см (между вторым и пятым электродами) не приводило к такому резкому усилению звука, как в случае между первым и четвертым электродами

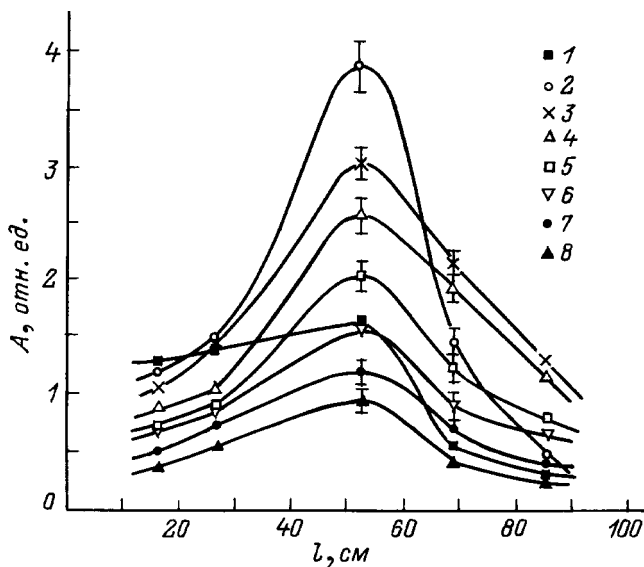


Рис. 2. Зависимость амплитуды звуковой волны от длины разрядного промежутка при давлении аргона в трубке 80 мм рт. ст., токе 50 мА и различных частотах вблизи резонанса. 1 — 180, 2 — 184, 3 — 188, 4 — 192, 5 — 196, 6 — 200, 7 — 204, 8 — 208 Гц.

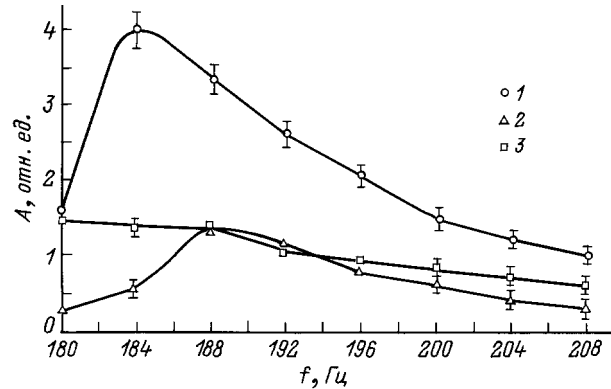


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика звуковой волны в газовом разряде аргона при расстояниях между электродами 85 (1), 53 (2) и 26 см (3) в трубке длиной 100 см с внутренним диаметром 6 см при давлении 80 мм рт. ст., токе 50 мА.

и устанавливалась величина амплитуды звука заметно меньшего значения, т. е. в этом случае действовал только резонанс соответствующий длине трубки.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды звуковой волны от частоты вблизи резонанса при значениях разрядного промежутка 26, 53 и 85 см, из которых следует, что при фиксированных значениях тока и давления газа в трубке разным разрядным промежуткам соответствуют различные резонансные частоты звуковой волны. Так, при промежутке 85 см резонансная частота равна 188 Гц, при 53 см — 184 Гц, а при 26 см — 180 Гц. Такая зависимость резонансной частоты звуковой волны от длины разрядного промежутка при постоянных давлении газа и тока связана со следующим обстоятельством. С ростом разрядного промежутка происходит возрастание разрядного напряжения на электродах, сопровождающееся повышением температуры газа в трубке. Это ведет к увеличению скорости звуковой волны. С ростом скорости звука происходит увеличение резонансной частоты.

Определим среднюю температуру газа в разряде аргона для трех разрядных промежутков, приведенных на рис. 3, при фиксированных значениях давления аргона и тока (80 мм рт. ст. и 50 мА) по резонансным частотам и известному выражению

$$c_s = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} \quad [8],$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, R — газовая постоянная, μ — молекулярный вес.

При разрядном промежутке $l_1 = 85$ см и резонансной частоте $f_1 = 188$ Гц скорость звука $c_s = 376$ м/с и температура газа $T_1 = 375$ К, при $l_2 = 53$ см и $f_2 = 184$ Гц $c_s = 368$ м/с и $T_1 = 359$ К, а при $l_3 = 26$ см и $f_3 = 180$ Гц $c_s = 360$ м/с и $T_1 = 343$ К.

Температура газа — один из основных параметров частично ионизированной плазмы. Она зависит от частоты упругих столкновений электронов с атомами газа,

поскольку при этом часть энергии электронов, а именно $2m/M$ (m — масса электрона, M — атома), передается нейтральным частицам.

Увеличение разрядного тока сопровождается возрастанием концентрации электронов и частоты их столкновений с атомами, что и приводит к повышению температуры газа в плазме. Звуковая волна, распространяющаяся вдоль положительного столба, уменьшает температуру газа в плазме (при неизменном значении разрядного тока и давления) [1–3] и позволяет достичь такого ее значения, которое необходимо для выполнения конкретной прикладной задачи или проведения соответствующего эксперимента.

Измерение и контроль температуры газа в плазме в процессе эксперимента является одной из самых важных задач при исследованиях газового разряда или его использования в практических целях. Особенно ценным это является при разработке и контроле газоразрядных параметров лазеров, в которых величина температуры газа в плазме определяет оптимальные условия генерации. Изменение этого параметра ведет к существенному спаду интенсивности лазерного излучения (такие процессы характерны для лазеров на углекислом газе, парах металлов и др.).

Наиболее распространенный метод измерения температуры газа в низкотемпературной плазме термопарный, который обладает рядом недостатков. Назовем некоторые из них: инерционность, контактность, т.е. для измерения величины температуры газа в плазме необходимо в соответствующее место внести инородное тело — термопару, локальность — измерение температуры газа производится только в той небольшой области, где установлена термопара.

В [9] рассматриваются методы измерения температуры газа в плазме определением величины скорости звука. В частности, скорость звука в [9] устанавливается из измеренного времени прохождения звукового импульса между двумя одинаковыми ленгмюровскими зондами расположенными в плазменном столбе на определенном расстоянии друг от друга. В другом эксперименте [10] скорость звуковой волны определяется оптическим методом. Изучение скорости звука в [11] производили организацией локализованного пробоя в разряде различных газов.

Метод измерения температуры газа в плазме посредством определения резонансной частоты звуковой волны в разрядной трубке (описанный выше) лишен недостатков характерных для термопарного и других методов, прост в исполнении, легко может быть автоматизирован и позволяет получать информацию о средней температуре газа в разряде, что в ряде случаев является очень полезным, в частности для газовых лазеров. Величину резонансной частоты можно определить из амплитудно-частотной характеристики с высокой точностью. Помимо этого, определение резонансной частоты можно производить по форме колебаний звуковой волны (сигналу с микрофона), т.е. в случае резонанса колебания являются

синусоидальными, так как дисперсия при этом равна нулю. При частотах, не совпадающих с резонансной, форма колебаний заметно отличается от синусоидальной. Следует отметить, что при возбуждении звука в разряде переменным током, форма колебаний которого существенно отличается от синусоидальной, звуковые волны устанавливаются синусоидальные (в резонансе).

Измерение температуры газа в слабоионизированной плазме резонансной частотой звука желательно выполнять, используя малую интенсивность (до 75 дБ), чтобы не происходило сильного взаимодействия акустических волн с плазмой. Это связано с тем обстоятельством, что при увеличении интенсивности звуковой волны выше 80–85 дБ под влиянием звука происходит уменьшение температуры газа в плазменном столбе [1–3], сопровождающееся снижением скорости звука. Это приводит к уменьшению резонансной частоты, которую надо все время отслеживать изменением частоты на задающем модуляторе.

Таким образом, действует принцип обратной связи при взаимодействии звуковой волны с плазмой, т.е. увеличение интенсивности звука вызывает уменьшение температуры газа в плазме (вследствие образования вихревого движения обеспечивающего отвод тепла к стенкам), что приводит к изменению скорости звуковой волны и резонансной частоты, иначе говоря, параметры звука и плазмы меняются согласованно. Этот процесс наглядно демонстрируется при взаимодействии импульса

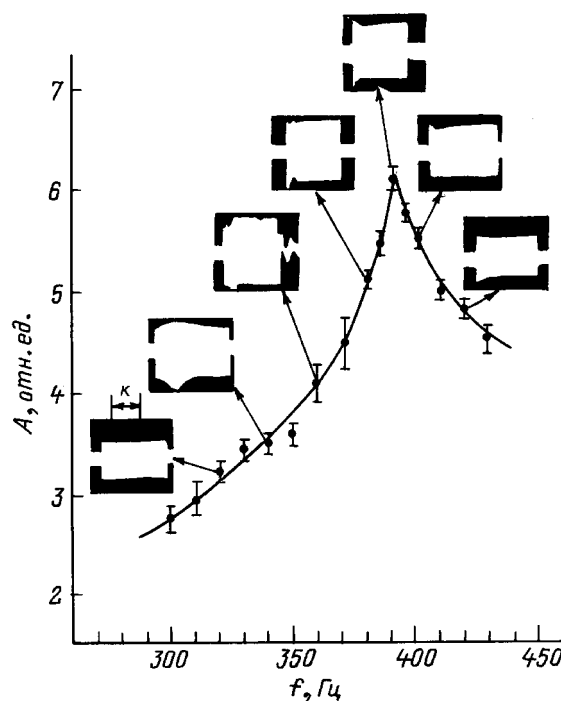


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика акустического резонатора, состоящего из разрядной трубки диаметром 6 см и длиной 100 см при давлении аргона 120 мм рт. ст. и разрядном токе 50 мА с осциллограммами импульса звуковой волны.

звуковой волны с плазмой, краткое рассмотрение которого приведем ниже.

На рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика акустического резонатора — кварцевая трубка длиной 100 см, внутренним диаметром 6 см с разрядом в аргоне при давлении 120 мм рт.ст. и током 50 мА. Характеристика была получена при постоянной интенсивности звуковой волны, поступающей от излучателя, закрепленного на торце трубки, в диапазоне частот, приведенных на рисунке. Величина этой интенсивности была низкой, т.е. такой величины, чтобы взаимодействия волны с плазмой не происходило. Максимум интенсивности звука соответствует резонансу при 390 Гц, при котором длина волны равна длине разрядной трубки. На рис. 4 приведены осциллограммы импульса звуковой волны, распространяющейся вдоль положительного столба разряда и поступающей в микрофон. Интенсивность звуковой волны, которая поступает от излучателя в разряд, на всех осциллограммах постоянна.

На осциллограмме при частоте 320 Гц видно, что амплитуда импульса на ее длине остается неизменной, т.е. никаких плазменных воздействий на амплитуду волны нет. Длительность импульса равна ~ 2.5 с, интенсивность звуковой волны составляла 84 дБ. На осциллограмме при частоте 340 Гц видно, что амплитуда звука в трубке увеличилась, хотя интенсивность волны поступающей от излучателя является такой же, как и при 320 Гц. Кроме того, и, пожалуй, это является основным, амплитуда волны со временем от начала импульса начинает возрастать, примерно через 0.7 с достигает максимального значения, а затем убывает. Интенсивность волны при этих условиях 86 дБ. Увеличение амплитуды звуковой волны по мере ее распространения вдоль разряда происходит вследствие того, что уменьшается и условия в трубке приближаются к резонансу. Уменьшение длины волны вызвано тем обстоятельством, что звуковая волна в разряде приводит к возникновению вихревого движения, вследствие чего повышается теплоотвод от разряда к стенке трубки, происходят понижение температуры газа и уменьшение скорости звука. На третьей осциллограмме, полученной при 360 Гц, возрастание амплитуды до наибольшей величины происходит через 0.3 с, так как частота 360 Гц ближе к резонансной частоте 390 Гц, время достижения ее вследствие уменьшения длины волны меньше. Следует отметить, что на осциллограмме при 360 Гц амплитуда звуковой волны, примерно в 1.3 раз превышает амплитуду при 340 Гц и это приводит к тому, что газ поглощает такую величину энергии, которая после выключения звука релаксирует с частотой 2 Гц. Эти колебания обозначались в конце осциллограммы. Величина интенсивности звука при этих условиях соответствовала 88 дБ. На четвертой осциллограмме, полученной при 390 Гц, амплитуда звуковой волны достигает максимального значения через 0.1 с после начала импульса и затем убывает. Амплитуда волны при 380 Гц меньше, чем на третьей осциллограмме при 360 Гц и соответствует 87 дБ. Это связано

с тем обстоятельством, что звуковая волна при взаимодействии с плазмой настолько перестраивается, что оказывается далеко от резонанса справа от максимума. На осциллограмме, полученной при резонансной частоте, практически с самого начала амплитуда импульса волны уменьшается. Это происходит вследствие того, что при незначительном охлаждении газа длина волны становится меньше длины трубки, нарушается условие резонанса и амплитуда звука уменьшается. Процессы на двух следующих осциллограммах при 400 и 420 Гц объясняются так же, как при 390 Гц.

Приведенные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что взаимовлияние звуковой волны и плазмы происходит тем сильнее, чем ближе частота звука к резонансной.

Выводы

1. Установлено, что оптимальные условия генерации звуковой волны в разряде постоянного тока образуются, когда на него накладывается переменный ток (с резонансной частотой), длина плазменного столба равна половине длины трубки и разряд расположен в конце камеры. При этом создаются два резонатора, из которых один (цилиндрический резонатор с открытым концом) действует внутри другого. При совпадении двух резонансов происходит увеличение амплитуды звуковой волны.

2. Предложен способ измерения температуры газа в низкотемпературной плазме определением резонансной частоты звуковой волны распространяющейся вдоль разрядной трубки.

В заключение мы считаем для себя приятным долгом выразить благодарность П.С. Погосяну за полезное обсуждение результатов данной работы.

Список литературы

- [1] Арамян А.Р., Галечян Г.А., Мкртчян А.Р. // Акуст. журн. 1991. Т. 37. С. 213–221.
- [2] Antinyan M.A. et al. // Laser. Phys. 1992. Vol. 2. P. 685–695.
- [3] Галечян Г.А. // УФН. 1995. Т. 165. С. 1357–1379.
- [4] Šubertova S. // Czech. J. Phys. 1965. Vol. B15. P. 701–703.
- [5] Mkrтчyan A.R. et al. // Acustica. 1989. Vol. 69. P. 124–127.
- [6] Галечян Г.А., Арамян А.Р., Мкртчян А.Р. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 207–209.
- [7] Авдусь З.И. и др. Практикум по общей физике. М.: Просвещение, 1971. С. 85.
- [8] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. С. 353.
- [9] Gentle K.W., Ingard U. // Appl. Phys. Lett. 1964. Vol. 5. P. 105–106.
- [10] Suits C.G. // Physics. 1935. Vol. 6. P. 190–192.
- [11] Goldstein L. et al. // Proc. VI Intern. Conf. Ioniz. Phenomena in Gases. Paris, 1963. Vol. 3. P. 115–116.