

04;08;12

## **Экспериментальное исследование усиления звука в плазме колебательно-неравновесного молекулярного газа**

© Г.А. Галечян, А.Р. Мкртчян

Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван  
E-mail: malpic@iapr.sci.am*Поступило в Редакцию 1 февраля 2001 г.*

В результате экспериментального исследования распространения звука вдоль положительного столба разряда получено, что в стационарном диффузионном разряде азота усиление звука происходит в соответствии с линейной теорией, в то время как при контрагировании разряда происходит скачкообразный рост коэффициента усиления, что согласуется с нелинейной теорией усиления звука в молекулярно-неравновесном газе.

Линейная теория усиления звуковой волны в колебательно-неравновесном молекулярном газе рассматривалась в работах [1–3]. Вопросы нелинейного усиления звука при больших уровнях усиления, связанные с резким изменением температуры среды и обусловленные взрывным характером распространения волны, анализировались в [4,5].

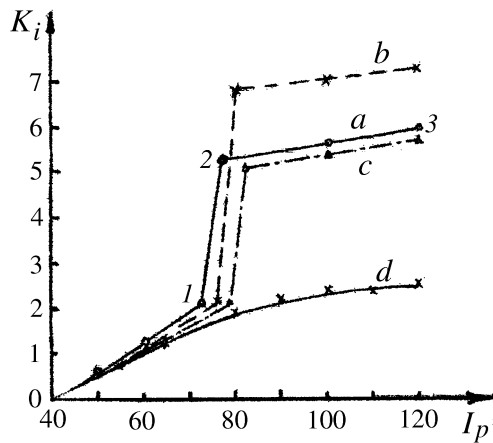
В данной работе приводятся результаты измерений коэффициента усиления звуковой волны в стационарном диффузионном разряде, при контракции положительного столба, в непрерывном контрагированном и в расконтрагированном звуком разряде при давлении 78 Торг азота. Осуществление исследований при указанном давлении вызвано тем обстоятельством, что контракция разряда в азоте наблюдалась при давлениях  $P \geq 78$  Торг.

Использовалась трубка с внутренним диаметром 9.8 см длиной 52 см. Расстояние между сетчатыми электродами — 27 см. Звуковая волна в разрядной трубке создавалась при помощи электродинамического излучателя, прикрепленного к одному из торцов трубки. Ко второму торцу крепился микрофон для контроля параметров звуковой волны. Частота звука варьировалась низкочастотным генератором, ам-

плитуда — усилителем. Сигнал с микрофона поступал на осциллограф. Калибровка сигнала производилась анализатором спектров. Измерения производились в диапазоне токов от 40 до 120 мА на первой резонансной частоте звука  $f_1 = 170$  Hz, которая соответствовала одной четверти длины волны, так как один из фланцев имел полость с диаметром, превышающим внутренний диаметр трубки [6,7]. Используемый в эксперименте азот содержал до 0.07% примесей паров воды и не более 0.4% кислорода.

Вольт-амперные характеристики разряда в поле звуковой волны при давлении азота 78 Торр и в диапазоне токов от 40 до 120 мА приведены в [8], из чего следует, что в диффузионном разряде при увеличении тока от  $I_{p0} = 40$  мА электрическое напряжение уменьшается и при значении тока  $I_{p1}$  наступает контракция. В разряде азота без звуковой волны,  $P = 78$  Торр, переход в контрагированное состояние происходит при токе  $I_{p1} = 70$  мА. Создание звука в разряде приводит к сдвигу величины  $I_{p1}$  в сторону больших токов. При контракции наступает скачкообразное уменьшение диаметра положительного столба, снижение напряжения на электродах на  $\sim 1$  кВ и увеличение тока до значения  $I_{p2}$ . Измерения проводились при различных величинах звука  $J_0$  (при токе  $I_{p0} = 40$  мА). Величина интенсивности звука  $J_0$  устанавливалась от 66 до 88 дБ. Значение интенсивности при изменении тока от 40 до 120 мА не поддерживалось постоянным.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициента усиления звука от разрядного тока при различных интенсивностях  $J_0$ . В диапазоне токов от  $I_{p0} = 40$  мА до  $I_{p1} = 73$  мА (при котором наступает контракция) и при интенсивности звука  $J_0 = 68$  дБ (кривая 1) в трубке образуется диффузный разряд. Рост тока от 40 мА сопровождается плавным увеличением коэффициента усиления и при  $I_{p1} = 73$  мА  $K_{i1} = 2.2 \text{ м}^{-1}$ , который определяется как  $K_{i1} = (\ln A_1/A_0)/L$ , где  $A_0$  — амплитуда звука при токе  $I_{p0} = 40$  мА,  $A_1$  — при  $I_{p1} = 73$  мА.  $L$  — длина плазменного столба. При контракции разряда происходит скачкообразный рост коэффициента усиления звука до  $K_{i2} = 5.2 \text{ м}^{-1}$  (в 2.4 раза). Величина разрядного тока в конце контракции  $I_{p2} = 77$  мА. Процесс контрагирования сопровождается скачкообразным уменьшением видимой границы положительного столба от 5 до 0.5 см. Дальнейшее увеличение тока в контрагированном разряде от  $I_{p2}$  до  $I_{p3} = 120$  мА приводит к плавному росту амплитуды звука, при котором коэффициент усиления возрастает до  $K_{i3} = 5.8 \text{ м}^{-1}$ . Исследования показывают, что в области интенсивностей звука  $J_0$



Графики зависимости усиления коэффициента звуковой волны от величины тока в разряде азота при давлении 78 Торр и частоте  $f_1 = 170$  Hz: *a* — для интенсивности звука  $J_0 = 66$  dB, *b* — 72 dB, *c* — 76 dB и *d* — 88 dB (расконтрагированный разряд).

от 66 до 72 dB увеличение  $J_0$  сопровождается повышением величины скачкообразного роста коэффициента усиления звука при контракции разряда. При  $J_0 = 72$  dB наблюдается наибольший скачкообразный рост коэффициента усиления звука. Это видно из графика, приведенного на рис. 1, *b*. В процессе контрагирования (при росте тока от  $I_{p1} = 76$  mA до  $I_{p2} = 80$  mA) коэффициент усиления звука повышается до  $K_{i2} = 6.6$  m<sup>-1</sup> (в 3 раза). Коэффициент усиления в контрагированном разряде при токе  $I_{p3} = 120$  mA равен 7.2 m<sup>-1</sup>. Коэффициент усиления в диффузионном разряде при токе  $I_{p1}$  на всех трех графиках рис. 1 имеет одну и ту же величину. Коэффициент усиления в контрагированном разряде при повышении тока от  $I_{p2}$  до  $I_{p3} = 120$  mA для всех случаев, приведенных на рис. 1, увеличивается примерно на одну и ту же величину. Повышение интенсивности звука в контрагированном разряде до  $J_0 = 88$  dB (рис. 1, *d*) сопровождается расконтрагированием положительного столба под влиянием вихревого акустического течения, возникающего в трубке [7,9], при котором диаметр видимой границы разряда увеличивается в 10 раз.

Коэффициент усиления звука при увеличении тока (в расконтрагированном разряде) от  $I_{p0} = 40$  мА возрастает и при  $I_{p3} = 120$  мА равен  $K_{i3} = 2.5 \text{ м}^{-1}$  (в отсутствие скачка амплитуды звука при контракции).

Механизм усиления звука в молекулярном газе связан с V–T релаксацией колебательно-возбужденных состояний азота. Константа релаксации  $\tau_{VT}$  зависит от температуры газа, поэтому с увеличением тока, сопровождаемого ростом температуры плазмы, повышается частота V–T релаксации и возрастает коэффициент усиления звука. Это находится в соответствии с линейной теорией усиления звука в стационарном разряде молекулярного газа [1–3].

При контракции разряда, сопровождаемой увеличением температуры газа, происходит изменение соотношения между объемной и стеночной дезактивацией колебательно-возбужденных молекул в сторону объемных. Этот переход может принимать характер неустойчивости типа теплового взрыва, обусловленной резкой температурной зависимостью константы колебательной релаксации. Развитие этой неустойчивости имеет место при условии, если характерное время V–T релаксации молекул при температуре, соответствующей приосевой, окажется соизмеримым с временем теплоотвода к стенке, колебательная релаксация произойдет лавинообразно, и разряд перейдет в стационарное контрагированное состояние; произойдет дезактивация практически всех колебательно-возбужденных молекул, образующихся в разряде, и значительная часть энергии, вводимой в разряд, преобразуется в тепло. Возникает температурная неоднородность плазмы, которая при условии объемной нейтрализации заряженных частиц, приведет к резкому сжатию разряда [10].

Распространение звука вдоль разряда приводит к модуляции температуры и плотности газа, которая вызывает модуляцию интенсивности тепловыделения из-за колебательной V–T релаксации, что приведет в свою очередь к увеличению первоначальной глубины модуляции температуры и плотности газа и к росту интенсивности звука. Если при скачкообразной контракции время V–T релаксации  $\tau_{VT}$  будет меньше периода звуковой волны  $\tau_s$ , то интенсивность тепловыделения (вызванного V–T релаксацией) будет модулироваться звуковой волной, что и приведет к существенному росту первоначальной глубины модуляции температуры и плотности газа и соответственно к скачку амплитуды звука.

Измерение температуры газа на оси до контракции разряда термопарой на расстоянии 8 см от анода показало, что она не превышает 860 К. После контракции установилась температура 935 К.

В чистом азоте константа V–T релаксации при температуре 900 К  $k_{VT} = 10^{-16} \text{ см}^{-3}/\text{с}$  [11], а время VT релаксации  $\tau_{VT} = (k_{VT}N)^{-1} \cong 10^{-2} \text{ с}$ . Период звуковых колебаний  $\tau \cong 6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , т.е.  $\tau_{VT} > \tau_s$ . В связи с тем что азот содержал примеси 0.07% паров воды, ситуация на самом деле выглядит иначе. При температуре газа 900 К константа колебательной релаксации молекул азота молекулами воды  $k_{VT} = 10^{-13} \text{ см}^{-3}/\text{с}$  [12]. Оценки показывают, что среднее время V–T релаксации в смеси азота с 0.07% парами воды при давлении 78 Торг  $\tau_{VT} \cong 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , т.е.  $\tau_{VT} < \tau_s$ .

Принимая во внимание, что смесь азота с парами воды содержит еще 0.4% кислорода, время V–T релаксации  $\tau_{VT}$  будет еще меньше, так как константа колебательной релаксации молекулы азота кислородом на два порядка больше, чем азота азотом [13]. Все это свидетельствует о том, что при контракции идет интенсивная колебательная V–T релаксация, приводящая к повышению температуры газа в плазме, которая, вследствие резкого характера зависимости константы колебательной релаксации от температуры, приводит к дальнейшему повышению температуры газа и т.д. Таким образом происходит процесс нелинейного усиления звука в плазме в соответствии с теорией этого явления [4,5]. Однако неограниченного роста температуры газа не должно происходить, значительная часть колебательно-возбужденных молекул релаксирует и устанавливается стационарный контрагированный разряд с другим неравновесным состоянием плазмы. Повышение интенсивности звука  $J_0 > 75 \text{ dB}$  сопровождается уменьшением скачка коэффициента усиления. Это связано с зарождением акустического вихревого течения, которое приводит к перемешиванию плазмы по радиусу столба, уменьшению температуры газа в плазме, замедлению процессов V–T релаксации и снижению процесса усиления звука.

Добавление кислорода в разряд азота (при постоянных токе и давлении газа в трубке) приводит к значительному увеличению коэффициента усиления звука в плазме. Так, в разряде смеси азота с кислородом (10%) при давлении 78 Торг коэффициент усиления возрастает примерно в 1.5 раза.

## Список литературы

- [1] *Baier H.-J., Bass H.E.* // Phys. Fluids. 1973. V. 16. N 7. P. 988–995.
- [2] *Коган Е.Я., Мальнев В.Н.* // ЖТФ. 1977. Т. 47. В. 3. С. 653–655.
- [3] *Осинов А.И., Уваров А.И.* // Инж.-физ. журн. 1988. Т. 55. № 1. С. 149–164.
- [4] *Коган Е.Я., Молевич Н.Я.* // ЖТФ. Т. 56. В. 5. С. 941–943.
- [5] *Елецкий А.В., Степанов Е.В.* // Хим. физика. 1989. Т. 8. № 9. С. 1247–1250.
- [6] *Авдусь З.И.* и др. Практикум по общей физике. М.: Просвещение, 1971. С. 85.
- [7] *Галецян Г.А.* // УФН. 1995. Т. 165. № 12. С. 1357–1379.
- [8] *Галецян Г.А., Мкртчян А.Р., Тавакалян Л.Б.* // Физика плазмы. 1993. Т. 11. № 11. С. 1400–1405.
- [9] *Galechyan G.A.* // Laser Phys. 1994. V. 4. N 1. P. 23–37.
- [10] *Елецкий А.В.* // Химия плазмы. М.: Энергоатомиздат, В. 9. С. 151–178.
- [11] *Елецкий А.В., Палкина Л.А., Смирнов Б.М.* Явления переноса в слабоионизированной плазме. М.: Наука, 1992.
- [12] *Whitson M., McNeal R.* // J. Chem. Phys. 1977. V. 66. P. 2696–2700.
- [13] *Кондратьев В.Н.* Кинетика химических газовых реакций. М.: Изд-во АН СССР, 1958.