

ВЛИЯНИЕ ПРОКАЧКИ ГАЗА НА МОДУЛЯЦИЮ ТОКА  
ЗВУКОМ В РАЗРЯДЕ АЗОТА

М. А. Антнян, Г. А. Галечян, Л. Б. Тавакалян

Распространяющаяся вдоль положительного столба разряда звуковая волна изменяет параметры как низкотемпературной плазмы [1,2], так и звуковой волны [3,4].

Изучение плазмы в поле звуковой волны в основном проводилось в разряде атомарных газов. Цель данной работы — экспериментальное исследование влияния звука на параметры разряда в молекулярном газе — азоте. Исследована модуляция разрядного тока звуковой волной. Для выяснения роли процессов колебательно-поступательной  $V-T$ -релаксации на модуляцию тока звуком в разряде азота были проведены измерения глубины модуляции тока в разряде с продольным низкоскоростным потоком газа. Показано, что создание прокачки газа приводит к уменьшению глубины модуляции разрядного тока. Проведены также измерения температуры газа на оси положительного столба в поле звуковой волны при наличии прокачки газа и без нее.

Измерения проводились на экспериментальном стенде, состоящем из кварцевой разрядной трубки диаметром 9.8 см (установленной вертикально) и длиной  $L = 52$  см. Расстояние между кольцевыми сетчатыми электродами составляло 27 см. Электрическое питание разряда производилось высоковольтным источником постоянного тока. К одному из торцов разрядной трубки прикреплялся электродинамический излучатель звуковых волн, в противоположном торце (за анодом) был прикреплен микрофон для контроля параметров звуковой волны. Частота звука варьировалась низкочастотным генератором синусоидальных колебаний, амплитуда — усилителем. Сигнал с микрофона и эдс с сопротивления, соединенного в цепь разряда для измерения модуляции тока, поступали на двухлучевой осциллограф. Калибровка сигнала с микрофона производилась при помощи анализатора спектров в реальном масштабе времени „Robotron-01012“.

Флаец, к которому был прикреплен микрофон, имел полость с диаметром, превышающим внутренний диаметр трубки. Акустический резонатор такой конструкции аналогичен цилиндрическому резонатору с одним открытым концом. Собственные частоты такого резонатора могут быть вычислены по следующей формуле:

$$f_k = \frac{ck}{4(L + 0.8R)},$$

где  $c$  — скорость звука,  $k = 1, 3, 5, \dots$ ,  $L$  — длина трубки,  $R$  — радиус трубки.

В случае резонанса на длине трубки или, точнее на длине  $L + 0.8R$  укладывается нечетное число четвертей волн. Именно эти частоты и наблюдались в нашем эксперименте в условиях резонанса.

Измерения проводились в диапазоне давлений  $P = 10-50$  Тор, разрядных токов от 40 до 90 мА. Интенсивность звука варьировалась от 74 до 98 дБ. Скорость прокачки газа составляла 0.63 м/с.

Во всем указанном диапазоне токов и давлений создание звуковой волны приводило к модуляции разрядного тока с частотой, равной частоте

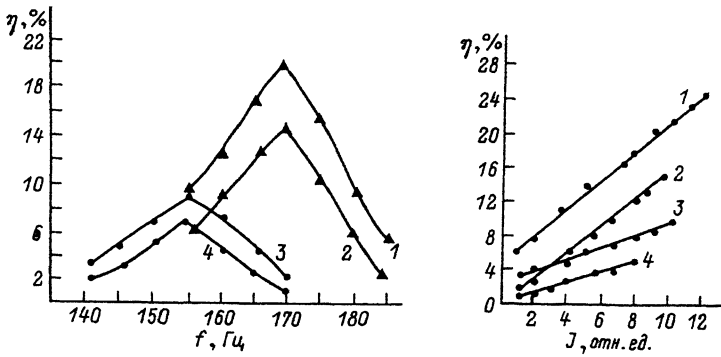


Рис. 1. График зависимости глубины модуляции разрядного тока от частоты в разряде азота при  $P = 50$  Тор,  $I_p = 40$  мА.

$v$ , м/с: 1, 2 — 0; 3, 4 — 0.63;  $J$ , дБ: 1, 3 — 96; 2, 4 — 92.

Рис. 2. Зависимость глубины модуляции разрядного тока от интенсивности звука при  $I_p = 40$  мА.

$P$ , Тор: 1, 3 — 50; 2, 4 — 20;  $v$ , м/с: 1, 2 — 0; 3, 4 — 0.63;  $f$ , Гц: 1, 2 — 170; 3, 4 — 155.

те звука. Максимальная глубина модуляции тока достигалась при резонансных частотах звука. На рис. 1 приведены графики зависимости глубины модуляции разрядного тока  $\eta$  от частоты звука вблизи первого резонанса. Кривые 1 и 2 соответствуют разряду без прокачки газа, кривые 3 и 4 — разряду в низкоскоростном продольном потоке газа. Прокачка газа производилась в направлении от анода к катоду, скорость прокачки  $v = 0.63$  м/с. Интенсивность звука в максимумах составляла  $J = 96$  дБ для кривых 1 и 3 и  $J = 92$  дБ для кривых 2 и 4. Как видно из приведенных графиков, максимальная глубина модуляции разрядного тока наблюдалась при резонансных частотах. В разряде без потока газа первая резонансная частота составляла 170 Гц. В трубке без разряда первая резонансная частота  $f_1 = 140$  Гц. Создание прокачки в разряде приводило к сдвигу первой резонансной частоты вниз на 15 Гц ( $f_1 = 155$  Гц). Такое поведение резонансной частоты можно объяснить зависимостью скорости звука от температуры газа. Включение разряда приводило к увеличению температуры газа более чем на 300 °С, при создании прокачки в разряде температура уменьшалась по сравнению с температурой газа в разряде без потока более чем на 100 °С (в приосевой области разряда). Отметим, что модуляция тока звуком наблюдалась и при более высоких резонансных частотах, однако глубина модуляции была меньше, чем при первой резонансной частоте звука. Условия эксперимента не позволяли получать большие интенсивности звука при высоких резонансных частотах. На рис. 2 приведены зависимости глубины модуляции разрядного тока от интенсивности звука при разрядном токе 40 мА. Интенсивность звука, соответствующая 1 отн. ед., равна 74 дБ, а 12 отн. ед. — 98 дБ. Кривые 1 и 2 соответствуют разряду без потока: 1 —  $P = 50$ , 2 — 20 Тор, кривые 3 и 4 соответствуют разряду с прокачкой газа: 3 —  $P = 50$ , 4 — 20 Тор. Из приведенных графиков видно, что увеличение интенсивности звука и давления в разряде приводит к росту глубины модуляции раз-

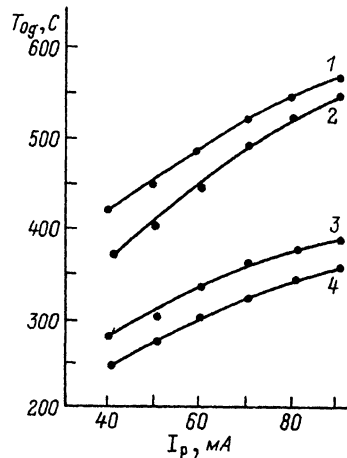
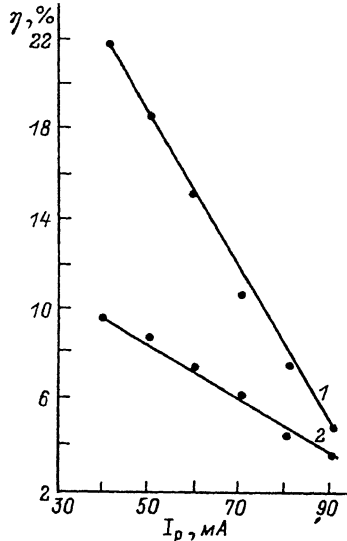


Рис. 3. Зависимость глубины модуляции разрядного тока от величины разрядного тока при  $P = 50$  Тор и интенсивности звука  $J = 96$  дБ.

1 —  $\nu = 0$  ( $f = 170$  Гц); 2 —  $\nu = 0.63$  м/с ( $f = 155$  Гц).

Рис. 4. Зависимость температуры газа на оси положительного столба от разрядного тока при  $p = 50$  Тор.

1, 3 — без звука; 2, 4 — со звуком;  $J = 95$  дБ;  $\nu$ , м/с: 1, 2 — 0; 3, 4 — 0.63.

разрядного тока. Однако создание прокачки при том же давлении и токе сопровождается уменьшением глубины модуляции разрядного тока  $\eta$ . При фиксированных значениях интенсивности звука в диапазоне давления азота от 10 до 50 Тор и разрядном токе  $I_p = 40$  мА создание прокачки газа приводило к уменьшению глубины модуляции разрядного тока в 1.4—2.4 раз.

С ростом тока в азоте без прокачки газа глубина модуляции разрядного тока  $\eta$  уменьшалась (рис. 3, кривая 1). В разряде с потоком газа также наблюдается уменьшение  $\eta$  с ростом разрядного тока (рис. 3, кривая 2). Однако в разряде с прокачкой изменение  $\eta$  с разрядным током менее крутое, чем в разряде без потока газа (рис. 3).

Были проведены измерения температуры газа на оси положительного столба в азоте при помощи термопарного датчика, расположенного на расстоянии 10 см от анода. В разряде без потока газа создание звука приводило к уменьшению температуры газа на оси положительного столба (рис. 4). Создание прокачки газа в разряде без звука также приводило к уменьшению температуры газа на оси разряда вследствие выноса тепла, выделяемого в разряде, потоком газа (рис. 4, кривая 3). Создание звука в разряде с потоком приводило к дальнейшему уменьшению температуры газа на оси разряда (рис. 4, кривая 4). Отметим, что в разряде со звуком (без прокачки) эффект охлаждения газа звуком проявлялся сильнее при низких разрядных токах. С ростом разрядного тока этот эффект проявлялся слабее, что является особенностью разряда в молекулярном

газе. В случае аргона подобного эффекта с ростом разрядного тока не наблюдалось [5]. Как видно из рис. 4, в разряде со звуком при создании прокачки газа эта особенность, присущая разряду в азоте, проявляется слабо и видна тенденция к ее устранению.

В азоте энергия, запасенная в колебательных степенях свободы, может превышать энергию поступательных степеней свободы, т.е. стационарно может поддерживаться условие  $T_v > T$ . В молекулярном газе интенсивное возбуждение колебательных степеней свободы может происходить за счет неупругого рассеяния электронов на молекулах. Девозбуждение колебательных уровней молекул происходит в результате столкновений с заряженными и нейтральными частицами, что приводит к перекачке энергии из колебательных степеней свободы к поступательным. Процесс  $V$ - $T$ -релаксации в широкой области параметров описывается моделью Ландау—Теллера. В рамках этой модели [6] характерное время  $V$ - $T$ -релаксации хорошо описывается соотношением

$$\tau_{VT} \sim \exp [\text{const}/T^{1/3}].$$

Величина  $\tau_{VT}$  зависит от температуры и давления, так как при изменении этих параметров изменяется частота соударений частиц.

В звуковой волне, распространяющейся в плазме, плотность газа в моменты сжатия и разрежения будет отклоняться от ее равновесного значения [7,8]. При этом будет происходить также возмущение параметра  $E/N$ . В силу экспоненциальной зависимости частоты ионизации от  $E/N$  [9] в моменты разрежения и сжатия будут наблюдаться соответственно увеличение и уменьшение концентрации заряженных частиц по сравнению с ее равновесным значением. Таким образом, модуляция концентрации заряженных частиц и разрядного тока будут следовать за модуляцией плотности и температуры газа в звуковой волне. Такая картина будет наблюдаться как в атомарных, так и молекулярных газах. Однако в случае неравновесного молекулярного газа в разряде происходит дополнительный нагрев, вызванный  $V$ - $T$ -релаксацией. Модуляция интенсивности дополнительного тепловыделения приведет к увеличению глубины модуляции плотности и температуры газа, а следовательно, и разрядного тока. С ростом давления в разряде в области сжатия растет плотность колебательно-возбужденных молекул, частота релаксации и интенсивность тепловыделения в разряде. При этом будет расти глубина модуляции температуры, плотности газа, а также разрядного тока.

С ростом разрядного тока происходит уменьшение температуры электронов. Энергии электронов достаточно в основном для возбуждения первого колебательного уровня молекулы азота. Для исследуемого в данной работе диапазона давлений время релаксации этого уровня  $\tau_{vN} > 0.1$  с. Время релаксации с верхних уровней порядка  $10^{-2}$  с (в условиях нашего эксперимента). Однако с ростом разрядного тока частота релаксации с этих уровней будет уменьшаться из-за их малой заселенности. При этом уменьшится интенсивность тепловыделения за счет  $V$ - $T$ -релаксации, что будет сопровождаться уменьшением глубины модуляции параметров газа и разрядного тока.

Экспериментальные исследования показали, что создание прокачки газа приводит к уменьшению глубины модуляции разрядного тока звуком. По-видимому, это уменьшение можно объяснить выносом потоком газа колебательно-возбужденных молекул азота из разрядной зоны. В результате

этого выноса будут уменьшаться частота  $V$ - $T$ -релаксации и интенсивность тепловыделения, вызванного этим процессом. Это приведет к уменьшению глубины модуляции параметров газа и разрядного тока, что и наблюдается в наших экспериментах (рис. 1, 2 и 4). Характерное время выноса частиц потоком достаточно велико. Время выноса частиц из центральной части трубки для условий нашего эксперимента  $\tau_v \approx 0.2$  с. Но так как прокачка газа уменьшает температуру среды, то время  $V$ - $T$ -релаксации  $\tau_{VT}$  будет возрастать и приближаться к  $\tau_v$  — времени выноса. Рост скорости прокачки газа будет приводить к уменьшению времени выноса колебательно-возбужденных частиц из разрядной зоны, дальнейшему уменьшению частоты  $V$ - $T$ -релаксации, что будет сопровождаться еще большим уменьшением глубины модуляции разрядного тока.

Результаты данной работы указывают на важную роль процессов  $V$ - $T$ -релаксации во взаимодействии звуковой волны с плазмой молекулярного газа и могут быть полезны для выяснения механизмов влияния звука на параметры плазмы.

В заключение приведем основные выводы работы.

1. Звуковая волна, распространяющаяся вдоль положительного столба разряда в азоте, вызывает сильную модуляцию разрядного тока.
2. Продольная прокачка газа приводит к уменьшению глубины модуляции тока звуком.
3. Уменьшение глубины модуляции тока вызвано выносом колебательно-возбужденных молекул азота потоком из разрядной зоны и уменьшением температуры газа.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Wojaczek K. // Beitr. Plasma Phys. 1960/61. В. 1. А 3. S. 127—129.
- [2] Арамян А.Р., Галечян Г.А., Мкртчян А.Р. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. С. 383—385.
- [3] Цендин Л.Д. // ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 3. С. 1972—1977.
- [4] Ingard U. // Phys. Rev. 1966. Vol. 145. P. 41—46.
- [5] Арамян А.Р., Галечян Г.А., Мкртчян А.Р. // Акуст. журн. 1991. № 2. С. 213—222.
- [6] Никитин Е.Е., Осипов А.И., Уманский С.О. // Химия плазмы. № 15. М.: Энергоиздат, 1989. С. 3—44.
- [7] Коган Е.Я., Мальнев В.Н. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 3. С. 653—656.
- [8] Елецкий А.В., Степанов Е.В. Препринт ИАЭ. № 4638/12. М., 1988. 12 с.
- [9] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.

Институт прикладных проблем физики  
Ереван

Поступило в Редакцию  
19 марта 1991 г.