

УДК 539.2

ИЗМЕНЕНИЕ ЗАРЯДА В АКУСТОПЛАЗМЕ В ТЕЧЕНИЕ ПЕРИОДА МОДУЛЯЦИИ РАЗРЯДНОГО ТОКА

А.С. АБРААМЯН, К.Г. СААКЯН, Р.Ю. ЧИЛИНГАРЯН*

Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: rychi072@gmail.com

(Поступила в редакцию 5 марта 2014 г.)

Исследованы динамические параметры акустоплазменного разряда, связанные с изменением концентрации носителей заряда во времени. Измерены текущие значения разности токов, измеренных со стороны анода и катода в зависимости от частоты модуляции тока разряда. Измерены вольт-кулонные характеристики акустоплазменного разряда. Наблюдаемый скачок величины заряда при плавном изменении напряжения на разрядной трубке можно рассматривать как фазовый переход в акустоплазме.

1. Введение

При модуляции тока разряда в разрядной трубке генерируются акустические колебания [1] и ее можно рассматривать как акустический резонатор. При этом реализуется режим стоячей волны и резко возрастает амплитуда акустических колебаний. В результате плазмо-акустического взаимодействия при прохождении модулированного тока, содержащего постоянную и переменную компоненты, плазма переходит из невозмущенного состояния в новое возмущенное состояние – акустоплазму, параметры которой существенно отличаются от параметров невозмущенной плазмы [1]. Это становится особенно важным, когда решения задач, описывающих процессы в плазме, могут давать большие скачки при небольших возмущениях управляющих параметров. В этом случае требуются достаточно большая база экспериментальных данных и высокая точность измерений [2].

Обычно в газоразрядной плазме, по аналогии с активным сопротивлением, измеряют разрядный ток только в одной точке последовательной цепи, например, со стороны анода или катода трубки. При измерениях динамических параметров в акустоплазме средние значения тока, измеренные со стороны анода (I_{an}) и катода (I_{cat}), равны, при нарушении этого условия в трубке будет накапливаться заряд. Однако мгновенные значения токов могут отличаться друг от друга, и это связано с изменением заряда в разрядной трубке в течение периода модуляции [3]. Изменение заряда в разрядной трубке означает изменение концентрации электронов, т.е. нарушение квазинейтральности плазмы в течение периода модуляции. Настоящая работа посвящена исследованию этого явления.

2. Методика эксперимента

На рис.1 приведена схема эксперимента. В качестве разрядной трубки (6) использовалась разрядная трубка CO_2 лазера ЛГ-23 с рабочей смесью $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ при давлении 8 Торр. Вольтметр (3) измеряет высоковольтное напряжение U_1 , которое формируется источником (1) на конденсаторе фильтра (2). Балластное сопротивление (4) является защитным и ограничивает максимальный ток в схеме. Амперметр (5) показывает значение тока со стороны анода (I_{an}) разрядной трубки.

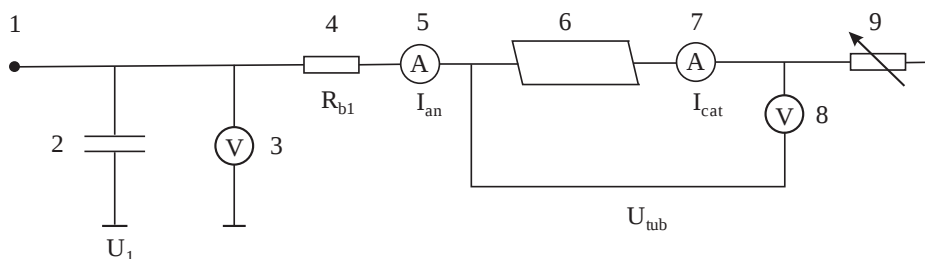


Рис.1. Блок-схема эксперимента.

Амперметр (7) показывает значение тока со стороны катода разрядной трубки (I_{cat}). Вольтметр (8) показывает напряжение на промежутке анод–катод разрядной трубки (U_{tub}). Переменное сопротивление (9), модулирующее ток, который вытекает из катода разрядной трубки, собрано на высоковольтной электронной лампе. Конденсатор фильтра (2), большой емкости обеспечивает замыкание переменной составляющей тока во всем диапазоне частот модуляции сопротивления (9). Параллельно амперметрам (5), (7) и вольтметру (8) подключены устройства, позволяющие получать осциллограммы сигналов, т.е. определять мгновенные значения токов и напряжения. Измерительный комплекс и методы обработки результатов измерений описаны в работе [4].

3. Результаты и обсуждение

На рис.2 приведены результаты измерения мгновенных значений разности токов $\{I_{\text{an}} - I_{\text{cat}}\}$ в течение периода модуляции. Частота модуляции $f = 0.5$ кГц, постоянная компонента разрядного тока, измеренная со стороны анода $\langle I_{\text{an}} \rangle = 11$ мА, амплитуда переменной компоненты разрядного тока, измеренная со стороны катода $I_{\text{cat}} \sim 9$ мА.

По оси абсцисс отложено время (в микросекундах), а по оси ординат – разность токов (в мА). Измеренное среднее за период модуляции значение разности токов меньше 1 мкА, что в пределах ошибки измерения.

Из рис.2 следует, что кривая разности токов анода и катода имеет сложную форму и далека от синусоиды, хотя напряжение на трубке в эксперименте оставалось близким к синусоидальному (при разложении в ряд Фурье мощность

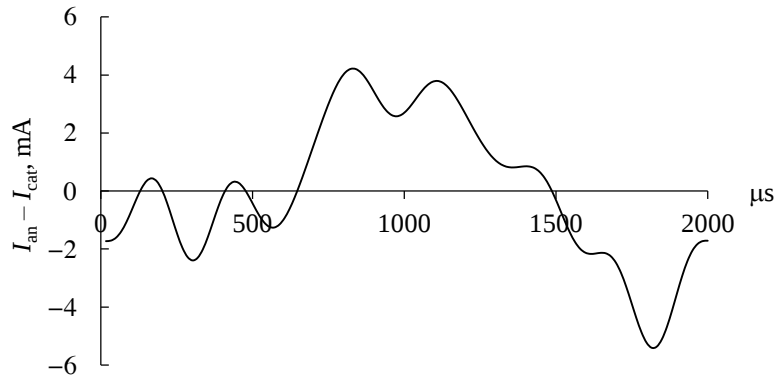


Рис.2. Изменение мгновенного (текущего) значения разности токов ($I_{an} - I_{cat}$) в течение периода модуляции; $f = 0.5$ кГц, $\langle I_{an} \rangle = 11$ мА, $I_{cat} \sim 9$ мА.

первой гармоники более, чем в 10 раз превосходила мощность суммы остальных 6 гармоник). Изменением тока утечки на стенки внутри разрядной трубки можно пренебречь из-за очень малой емкости конденсатора, образованного стенкой. В работе [5] при исследовании ртутных разрядов переменного тока зондовыми методами получено, что на частотах меньше 1 кГц приращение тока обусловлено изменением концентрации электронов, а на частотах больше 1 кГц концентрация электронов в течение периода модуляции не меняется, т.е. изменение тока обусловлено изменением скорости электронов [6]. Таким образом, при работе в области низких частот модуляции до нескольких кГц можно пренебречь влиянием ускорения электронов на изменение разностного тока $I_{an} - I_{cat}$. Тогда мгновенное изменение заряда q в разрядной трубке обусловлено мгновенным значением разностного тока:

$$\Delta q_i = (I_{ani} - I_{cati})\Delta t. \quad (1)$$

Экспериментально измеренное среднее значение за период модуляции $\langle \Delta q \rangle = 0.05$ нКл, т.е. в пределах ошибки измерения оно равно нулю.

Изменение текущего (мгновенного) значения заряда $q(\tau)$ за время τ от начала периода модуляции имеет вид

$$q(\tau) = \sum_i^{\tau} (I_{ani} - I_{cati})\Delta t + C, \quad (2)$$

где i означает измерение в данный момент времени (на интервале $\{0 - \tau\}$). Величина константы интегрирования C выбирается из условия, что $\langle q(\tau) \rangle = 0$. Это дополнительное условие снимает неоднозначность решения.

На рис.3 показано экспериментально полученное изменение заряда во времени (в течение 3-х периодов модуляции) для разных частот модуляции. По оси абсцисс отложено время в микросекундах, а по оси ординат – текущее значение заряда в нанокулонах, штриховой линией показано изменение $\sim U_{tub} = U(t) - \langle U \rangle$ переменной компоненты напряжения на разряде в вольтах.

Из рис.3а видно, что при частоте модуляции разрядного тока 0.5 кГц форма кривой изменения заряда отличается от синусоиды. Кривая изменения заряда отстает от кривой напряжения по фазе на $\pi/2$. На участке возрастания напряжения в разрядной трубке при уменьшении заряда появляются его осцилляции. Вблизи максимума напряжения происходит почти линейное увеличение заряда в трубке. Соответственно, при уменьшении напряжения уменьшается величина заряда. Отметим, что положительная область определяется относительно средней величины заряда за период модуляции (2). При частоте модуляции 1 кГц (рис.3б) форма кривой изменения заряда мало отличается от синусоиды и находится в противофазе с изменением напряжения.

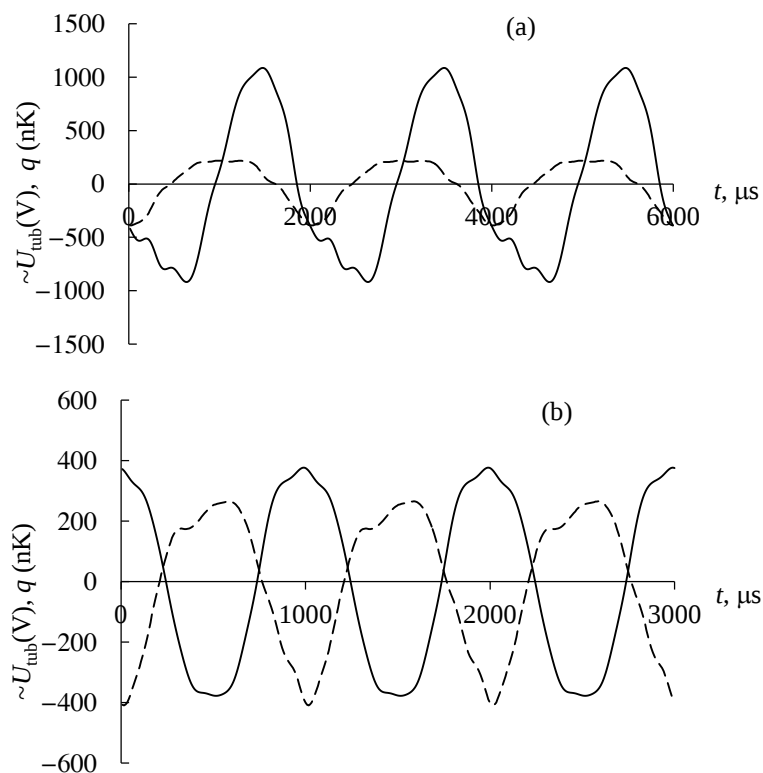


Рис.3. Изменение заряда внутри разрядной трубки во времени; $\langle I_{\text{an}} \rangle = 11$ мА, $I_{\text{cat}} \sim 9$ мА. а) $f = 0.5$ кГц, б) $f = 1$ кГц. Штриховая линия – $\sim U_{\text{tub}}$, сплошная – q .

Из рис.3 нельзя определить как меняется состояние акустоплазмы в течение периода модуляции. На рис.4а и б для двух частот модуляции разрядного тока представлена зависимость изменения заряда в разрядной трубке с акустоплазмой от мгновенного значения переменной компоненты напряжения на концах разрядной трубки (вольт-кулонная характеристика). По оси абсцисс отложено нормированное значение переменного напряжения на концах разрядной трубки $u = \{U(t) - \langle U \rangle\} / \langle U \rangle$, $U(t)$ – текущее значение напряжения, а по оси ординат – текущее значение величины заряда $q(t)$.

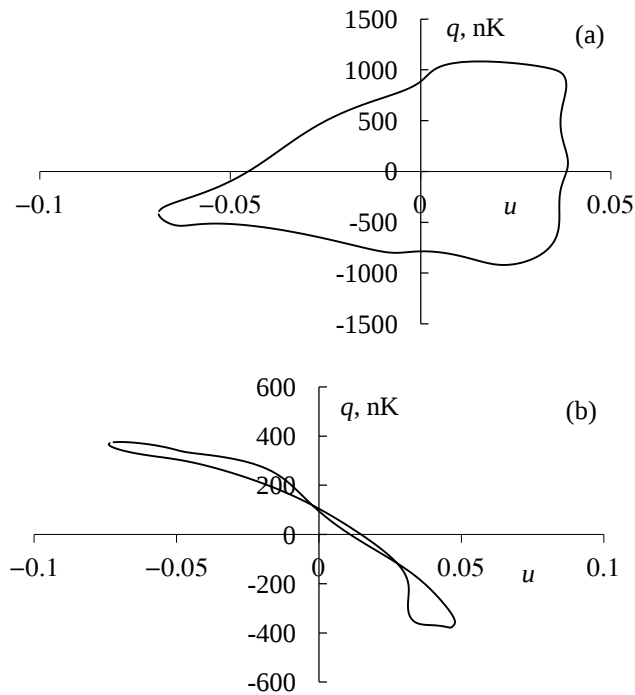


Рис.4. Вольт-кулонные характеристики; а) $f = 0.5$ кГц, б) $f = 1$ кГц.

Из рис.4 видно, что при частоте 0.5 кГц наблюдается широкая петля гистерезиса, а на частоте 1 кГц площадь петли гистерезиса существенно меньше. В плазме без акустического возмущения с увеличением концентрации электронов, т.е. с увеличением отрицательного заряда, напряжение на разряде падает [6,7]. Из рис.4а видно, что с увеличением напряжения на разрядной трубке отрицательный заряд увеличивается на 600 нКл (от минус 420 до минус 1000), поведение акустоплазмы аномально – растут и заряд, и напряжение. Затем, в районе максимума напряжения на трубке, отрицательный заряд скачком уменьшается на 2000 нКл. Этот скачок связан с фазовым переходом между различными состояниями акустоплазмы [7]. Когда мгновенное напряжение на трубке уменьшается, но превышает среднее значение, заряд практически не меняется, т.е. сохраняется последнее акустоплазменное состояние. Далее напряжение на трубке становится меньше среднего значения и отрицательный заряд снова увеличивается, что соответствует обычному поведению плазмы без акустического возмущения (при увеличении концентрации электронов напряженность поля на разряде падает), т.е., когда напряжение на трубке приближается к среднему значению, происходит фазовый скачок из акустоплазменного состояния в состояние невозмущенной плазмы. Затем, в начальный момент роста напряжения снова происходит фазовый переход из состояния невозмущенной плазмы в состояние акустоплазмы. При частотах модуляции меньше 0.5 кГц такое поведение сохраняется.

При частоте модуляции 1 кГц и выше (см. рис.4b) с увеличением напряжения на разрядной трубке отрицательный заряд увеличивается, а с уменьшением напряжения – уменьшается, т.е. плазма в течение всего периода модуляции находится в акустоплазменном состоянии и фазового перехода между невозмущенной плазмой и акустоплазмой нет.

4. Заключение

Таким образом нами получены следующие основные результаты.

1. Для точного определения динамических параметров акустоплазменного разряда необходимо одновременное измерение тока со стороны анода и со стороны катода разрядной трубки.
2. В акустоплазме в течение периода модуляции текущее значение заряда, т.е. концентрация электронов в разрядной трубке, постоянно меняется и зависит от частоты модуляции разрядного тока.
3. На вольт-кулонных характеристиках получены скачки заряда в течение периода модуляции и фазовый переход из состояния невозмущенной плазмы в состояние акустоплазмы.
4. Для частоты 0.5 кГц в течение периода модуляции происходит фазовый переход из состояния невозмущенной плазмы в состояние акустоплазмы. Для частоты 1 кГц и выше фазового перехода не происходит и постоянно сохраняется акустоплазменное состояние.

Авторы благодарят д.ф.-м.н. А.Г. Мкртчяна за постоянную помощь в работе и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.R. Mkrтчyаn, A.H. Mkrтчyаn, A.S. Abrahamyan.** Proc. of the Int. conf. Plasma Physics and Plasma Technology, PPPT-7, September 17-21, 2012, Minsk, Belarus, pp. 3-5.
2. **А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин.** Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1986.
3. **Q.G. Sahakyan.** Int. conf. on Electron, positron, neutron and X-ray scattering under external influences, 18 – 22 October 2011, Yerevan – Meghri, Armenia. Book of abstracts, pp. 50-51.
4. **А.Г. Мкртчян, А.С. Абрамян, К.В. Акопян, К.Г. Саакян.** Int. Sci. Conf. on Modern Issues of Applied Physics, 30 March 2011, Tbilisi, Georgia. Abstract digest, pp.76-77.
5. **А.С. Федоренко.** Экспериментально-расчетные исследования характеристик положительного столба разряда и совершенствование люминесцентных ламп. Кандидатская диссертация, М., 1980.
6. **Ю.П. Райзер.** Физика газового разряда. М., Наука, 1992.
7. **A.S. Abrahamyan, R.Yu. Chilingaryan, Q.G. Sahakyan.** VII Int. conf. Plasma Physics and Plasma Technology, PPPT-7, September 17-21, 2012, Minsk, Belarus, Proc., v. 1, pp.197-199.

ԼԻՑԶԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱԿՈՒՍՏԱՊԼԱԶՄԱՅՈՒՄ
ՊԱՐՊՄԱՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՄՈԴՈՒԼԱՑՄԱՆ ՊԱՐԲԵՐՈՒԹՅԱՆ ԸՆԹԱՑՔՈՒՄ

Ա.Ս. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ, Բ.Գ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ, Ռ.ՅՈՒ ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ

Հետազոտված են ակուստապլազմային պարպման դինամիկ պարամետրերը՝ կապված լիցքակիրների կոնցենտրացիայի փոփոխությունից ժամանակի ընթացքում: Չափված են հոսանքների տարբերությունների ընթացիկ արժեքները, չափված անոդի և կատոդի կողմերից, կախված պարպման հոսանքի հաճախությունից և մոդուլացումից: Չափված են ակուստապլազմային պարպման վոլտ-կուլոնյան բնութագրերը: Լարվածության սահուն փոփոխության դեպքում լիցքի մեծության դիտարկվող թռիչքը պարպման խողովակում կարելի է դիտել որպես փուլային անցում ակուստապլազմայում:

VARIATION OF CHARGE IN ACOUSTOPLASMA DURING THE PERIOD
OF MODULATION OF THE DISCHARGE CURRENT

A.S. ABRAHAMYAN, Q.G. SAHAKYAN, R.Yu. CHILINGARYAN

Dynamic parameters of acoustoplasmic discharge associated with the change of concentration of charge carriers in time are investigated. Instant values of the difference of the currents are measured by the anode and cathode sides, depending on the frequency and the modulation of the discharge current. The volt-coulomb characteristics of acoustoplasmic discharge are also measured. A jump in the charge with gradually varying the voltage on the discharge tube can be considered as a phase transition in acoustoplasma.