

УДК: 537. 52.

О КОЛЕБАНИЯХ НА ЗАДНЕМ ФРОНТЕ ВОЛНЫ ИОНИЗАЦИИ.

Г.М.САДЫХЗАДЕ, М.Н.АГАЕВ

Бакинский Государственный Университет
agaevm50@mail.ru

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию колебаний, возникающих на заднем фронте волны ионизации, распространяющейся при пробое длинной трубки в аргоне. Измерялись амплитуда и частота этих колебаний и их зависимость от параметров подаваемого напряжения и расстояния до поджигающего электрода. Полученные зависимости интерпретировались на основе теоретических представлений о возникновении колебаний при наличии коллективных процессов, если концентрация электронов за фронтом волны достаточно велика, а давление газа мало. Наблюдается качественное согласие с результатами теории.

Ключевые слова: волна ионизации, колебание на заднем фронте, частота, амплитуда.

В настоящее время волны ионизации находят все большее применение. Ввиду высокой стабильности параметров волны ионизации, её можно использовать в качестве высокостабильного источника наносекундных импульсов излучения или серии импульсов излучения с заданными временами задержки между ними. Многообещающей областью применения волн ионизации может быть создание электрофизических устройств, например, коммутаторов, формирователей и обострителей импульсов. Поскольку длительность фронта волны ионизации в области оптимальных давлений может быть существенно меньше, чем длительность фронта подаваемого на электрод высоковольтного импульса, то после прохождения импульса через разрядную трубку его фронт станет короче, т.е. произойдет «обострение» фронта.

Волны ионизации – области повышенной ионизации частиц, отделенные узкой переходной областью (фронтом волны) от областей с более низкой степенью ионизации. В пределах фронта волны происходит резкий скачок степени ионизации частиц. Структуру волн определяют процессы ионизации, рекомбинации и переноса энергии.

Волны ионизации, обычно наблюдаемые как движущиеся фронты свечения, могут возникать при электрическом пробое газов в разрядном

промежутке. Производимая ионизация и скорость распространения таких волн зависят от ряда экспериментальных условий и могут принимать значения в широком диапазоне от 10^5 до 10^{10} см/с. [1-2].

Волны ионизации с невысокими скоростями распространения $10^5 - 10^7$ см/с чаще всего возникают в промежутках с однородным электрическим полем, где скорость фронта ионизации определяется дрейфом электронов. Такие волны также возникают при участии в процессе развития ионизационного пробоя тяжелых частиц, например, при движении лидера в длинных искрах, формирование которого связано с разогревом газа в канале. Ток, связанный с движением фронта низкоскоростных волн ионизации, сравнительно невысок и составляет по порядку величины от единиц до десятков ампер. [3-4].

Предложенные ранее теоретические модели исключали возможность существования в плазме коллективных процессов. Однако, данное предположение перестает быть справедливым за фронтом ионизации. Если концентрация электронов за фронтом ионизации достаточно велика, а давление газа мало, то возможно возникновение плазменных колебаний за фронтом ионизирующей волны. [5].

Данная работа посвящена исследованию низкоскоростных волн электрического пробоя в разрядной трубке, заполненной ионизированным газом (аргоном) и условий возникновения колебаний электрического поля и тока на заднем фронте ионизационной волны.

При этом основное внимание было уделено зависимостям амплитуды второго максимума и частоты колебаний на заднем фронте от напряжения, частоты сигнала подаваемого от звукового генератора, а также от расстояния до поджигающего электрода (ПЭ).

Эксперимент проводился в газоразрядной трубке заполненной аргоном, с внутренним диаметром 3,2 см и длиной 80 см. По всей длине разрядной трубки располагались обкладки, представляющие собой одинаковые кольца шириной 3 см из алюминиевой фольги, отстоящие друг от друга на расстоянии 1 см. Обкладки образуют вдоль трубки емкость $C_1 - C_n$, которая меняется по мере удаления от ПЭ. Это достигалось путем увеличения расстояния между двумя проводниками, одним из которых служила плазма, а вторым – обкладка; диэлектриком служило стекло. По мере удаления от первой обкладки увеличивали толщину диэлектрика, и тем самым уменьшали емкость. В результате емкость последней была в 20 раз меньше емкости первой. Меняя величину и частоту подаваемого от звукового генератора на ПЭ напряжения, на экране осциллографа можно было наблюдать картину колебаний в плазме, причем после первого максимума, соответствующего пробоем газа, на осциллограмме можно заметить второй и последующие максимумы колебаний на заднем фронте. Амплитуда второго максимума A_2 и частота этих колебаний ν замерялась непосредственно по показаниям осциллографа.

При плавном увеличении напряжения на ПЭ происходит пробой газового промежутка между электродом и близлежащим участком стенки. Возникает ток, заряжающий стенки до потенциала, близкого потенциалу электрода, и образуется облачко плазмы, а также регистрируются импульсы тока в цепи первой обкладки.

В дальнейшем, с ростом величины подаваемого напряжения, электрическое поле оказывается сосредоточенным, в основном, между поверхностью этого облачка и последующими участками стенок. При достаточной величине этого поля граница плазмы смещается вдоль трубки за счет новой ионизации в области сильного поля.

В результате свечение и импульсы тока появляются на все большем расстоянии. При этом импульсы на более далеких обкладках регулярно сдвигаются во времени, что можно было наблюдать и измерять по полученным осциллограммам. Этот факт свидетельствует о конечной скорости распространения процесса. При больших значениях напряжения U процесс распространяется на всю трубку.

Исследования проводились при напряжениях 700 – 1100 В. При этом было замечено, что при малых напряжениях ионизация не доходит до конца трубки. Частота напряжения f , подаваемого от звукового генератора, менялась в пределах от 80 до 200 Гц. Зависимость амплитуды A_2 от величины подаваемого напряжения U , при различных частотах f представлена на рис 1. При увеличении напряжения U и частоты f амплитуда второго максимума A_2 увеличивается.

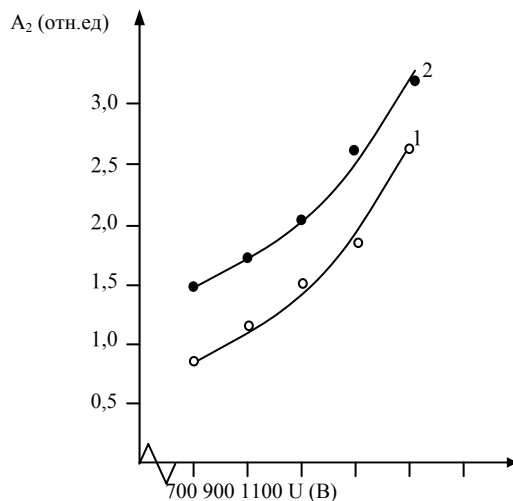


Рис.1 Зависимость амплитуды второго максимума A_2 от подаваемого напряжения U при давлении $P=1$ Тор: 1 – при $f=80$ Гц; 2 - при $f=120$ Гц.

На рис.2 показаны зависимости частоты колебаний ω от подавае-

мого напряжения U , снятые при постоянных частотах f равных 180 Гц, и 120 Гц соответственно.

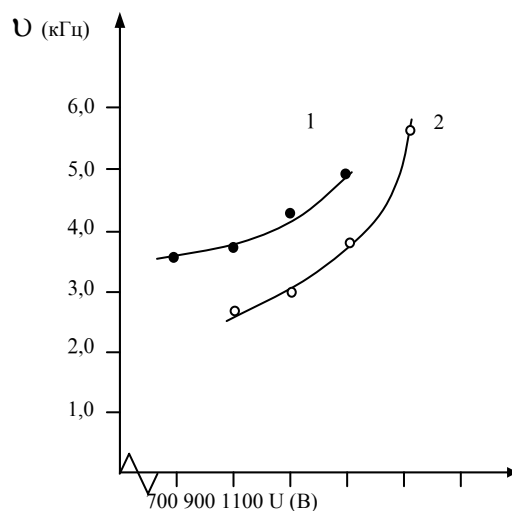


Рис.2 Зависимость частоты колебаний U на заднем фронте ионизационной волны от подаваемого напряжения U при давлении $P = 1$ Тор: 1 – при $f = 180$ Гц; 2 - при $f = 120$ Гц.

Как видно из рисунка, увеличение частоты f при постоянном напряжении, приводит к увеличению частоты колебаний U на заднем фронте ионизационной волны. Это связано с тем, что увеличение частоты f способствует образованию большего числа колебаний с возрастающей амплитудой.

На рис.3 показана зависимость амплитуды второго максимума A_2 от расстояния до ПЭ Л. Измерения проводились при частоте $f = 200$ Гц и подаваемом напряжении $U = 800$ В (кривая 1); и при $f = 150$ Гц и напряжении $U = 800$ В (кривая 2). Зависимость частоты колебаний ν от длины волны L представлена на рис.4. Показания снимались при постоянном значении напряжения $U = 900$ В и частоты $f = 180$ Гц. График показывает, что при удалении от ПЭ в сторону уменьшения емкости C_0 происходит уменьшение частоты ν .

Согласно теории [5] при определенных условиях за фронтом волны ионизации в экранированной трубке должны возникать колебания электрического поля, тока и объемного заряда. При этом были обнаружены режимы, в которых затухающим колебаниям тока предшествует конечное число осцилляций с нарастающей амплитудой. Увеличение концентрации электронов n_0 приводит к формированию большего числа нарастающих осцилляций. При дальнейшем увеличении n_0 число таких осцилляций снова уменьшается, что свидетельствует о наличии некоторого оп-

тимума колебательного режима по концентрации. Частота таких колебаний по порядку близка к электронной плазменной частоте за фронтом ионизации. При фиксированном U амплитуда второго максимума тока I_2 (в обозначениях [5]) имеет максимум как по концентрации, так и по давлению. Увеличение характерного напряжения U приводит к росту амплитуды максимума I_2 .

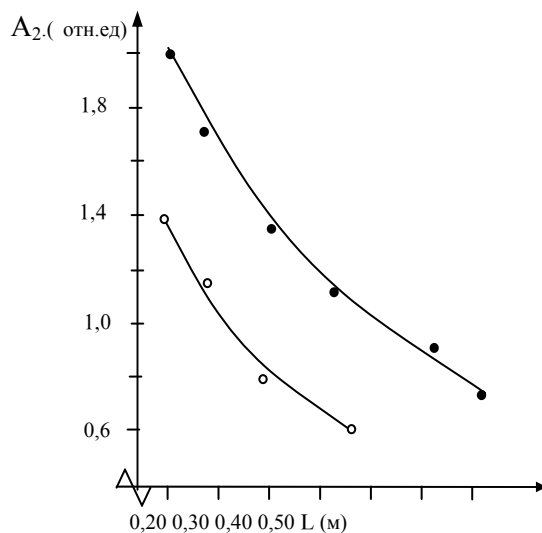


Рис.3. Зависимость амплитуды второго максимума A_2 от длины L до поджигающего электрода при давлении $P=1$ Тор: 1- при $f = 200$ Гц. $U = 800$ В. 2- при $f = 1500$ Гц; $U = 700$ В.

Из работы [6] следует, что с ростом f и уменьшением паузы между двумя последовательными импульсами возрастает плотность нереконбинирующей плазмы. В результате стартовая плотность заряженных частиц увеличивается, что приводит к большей плотности после прохождения фронта ионизации и, следовательно, меньшему сопротивлению R . Соответственно, требуется меньший градиент потенциала для протекания продольного тока.

В условиях нашего эксперимента увеличение напряжения U соответствует увеличению n_0 , что согласуется с выводами теории, т.е. при повышении подаваемого напряжения U увеличивается энергия электронов и следовательно, увеличивается концентрация n_0 .

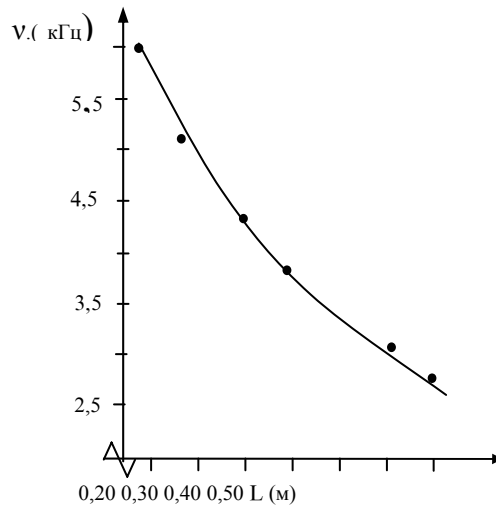


Рис.4. Зависимость частоты колебаний ν на заднем фронте ионизационной волны от длины L до поджигающего электрода при давлении $P=1$ Тор: $f=180$ Гц. $U=900$

Если же увеличивать частоту напряжения f , то плазма между пробоями не успевает деионизоваться. Происходит накопление остаточного заряда, причем чем больше частота напряжения f , тем больше величина n_0 . В результате этого измерения проводились при наличии предварительной ионизации. Как и следовало из теории [5], амплитуда второго максимума A_2 и частота колебаний ν на заднем фронте увеличиваются с ростом U и f , т.е. n_0 . Если провести сравнительный анализ данных, полученных экспериментальным путем с проведенными в [5] теоретическими расчетами, то можно предположить, что мы вероятней всего попали в ту область, которая соответствует увеличению величины второго максимума тока I_2 с ростом концентрации n_0 . При этом измерения проводились до некоторого оптимального значения концентрации n_0 , после которого число осцилляций вновь уменьшается.

Зависимость амплитуды второго максимума A_2 и частоты колебаний ν на заднем фронте от расстояния L можно объяснить следующим образом. По мере удаления от ПЭ уменьшается емкость C_0 . С уменьшением C_0 уменьшается также величина заряда и, соответственно, концентрация n_0 , падают интенсивность ионизации и плотность образующейся плазмы, а следовательно растет сопротивление единицы длины столба.

В самом деле, при удалении от ПЭ амплитуда колебаний второго максимума A_2 и частота колебаний ν уменьшаются. Таким образом, наши экспериментальные данные находятся в качественном согласии с результатами теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Фолюгин И.В. Высокоскоростные волны ионизации при электрическом пробое // УФН, 1994 г., т.164, №3, с.263 – 285.
2. Герасимов Д.Н, Синкевич О.А, Высокоскоростные волны ионизации в экранированных разрядных трубках // «Физика плазмы» 1999, т.25, №4, с.379-383.
3. Sadıxzadə Q.M., Ağayev M.N. Fiz. aktual problemləri /// III Res. Elmi konfransının materialları. Bakı, 2004, s.100.
4. Садыхзаде Г.М., Агаев М.Н. Исследование природы неустойчивостей, возникающих на заднем фронте пробойной волны в длинной трубке / Fizikanın aktual problemləri IV Respublika Elmi konfransının materialları. Bakı, 2006, s. 70 – 71
5. Садых-заде Г.М., Агаев М.Н. Исследование колебаний на заднем фронте ионизационной волны в длинной разрядной трубке / Материалы Международной научной конференции посвященной 90-летию Бакинского Государственного Университета. Баку, 2009, с. 232-233.
6. Агаев М.Н., Садых-заде Г.М., Эфендиев К.И. Развитие разряда в длинной трубке с переменной распределенной емкостью // ТВТ, 1992, т.30, в 4, с.818 – 822.

İONLAŞMA DALĞASININ ARXA CƏBHƏSİNDƏKİ RƏQSLƏR HAQQINDA

G.M. SADIXZADƏ, M.N. AĞAYEV

XÜLASƏ

Bu iş arqonla doldurulmuş uzun boruda deşilmə zamanı yayılan ionlaşma dalğasının arxa cəbhəsində rəqslərin yaranmasının təcrübi olaraq öyrənilməsinə həsr edilmişdir. Bu rəqslərin amplitudunun və tezliyinin verilən gərginliyin parametrlərindən, eləcə də onların alışırdıcı elektroddan olan məsafədən asılılıqları ölçülmüşdür. Alınmış nəticələr dalğanın arxa cəbhəsində elektronların konsentrasiyasının böyük, təzyiqinsə kiçik olduqda, kollektiv proseslər yaranması nəticəsində alınan rəqslərin mövcudluğuna əsaslanan nəzəri təsəvvürlər interpretasiya edilmişdir. Alınmış nəticələrin nəzəriyyə və keyfiyyətə uzlaşması müşahidə olunmuşdur.

Acar sözlər: İonlaşma dalğası, arxa cəbhədə rəqslər, tezlik, amplituda.

ON THE OSCILLATIONS BEHIND THE IONIZATION WAVE

G.M.SADIKHZADE, M.N.AGAYEV

SUMMARY

Oscillations behind the ionization waves propagated during a breakdown in argon tube are experimentally studied. Amplitudes and phase shifts of oscillations, their dependence on applied potential and distance from the burning electrode are measured. The obtained results are interpreted on the basis of the theory on the onset of oscillations during collective processes when gas pressure is low and electron number density behind the ionization wave is quite high. The experimental results qualitatively agree with the theoretical model.

Key words: ionization waves, amplitudes, phase shifts, density behind the ionization wave.

Поступила в редакцию: 12.04.2011 г.

Принято к печати: 17.06.2011 г.