ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 1994, том 32, № 4, с. 483 - 485

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ

УДК 537.52

ОБОСТРЕНИЕ ФРОНТА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВОЛНЫ ИОНИЗАЦИИ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ 250 кВ

© 1994 г. Л. М. Василяк, Ю. М. Токунов

Московский физико-технический институт

Поступила в редакцию 09.02.94 г.

Экспериментально обнаружено, что в диапазоне давлений, где скорость волны ионизации максимальна (2×10^{10} см/с), происходит обострение ее фронта до 0.5 нс.

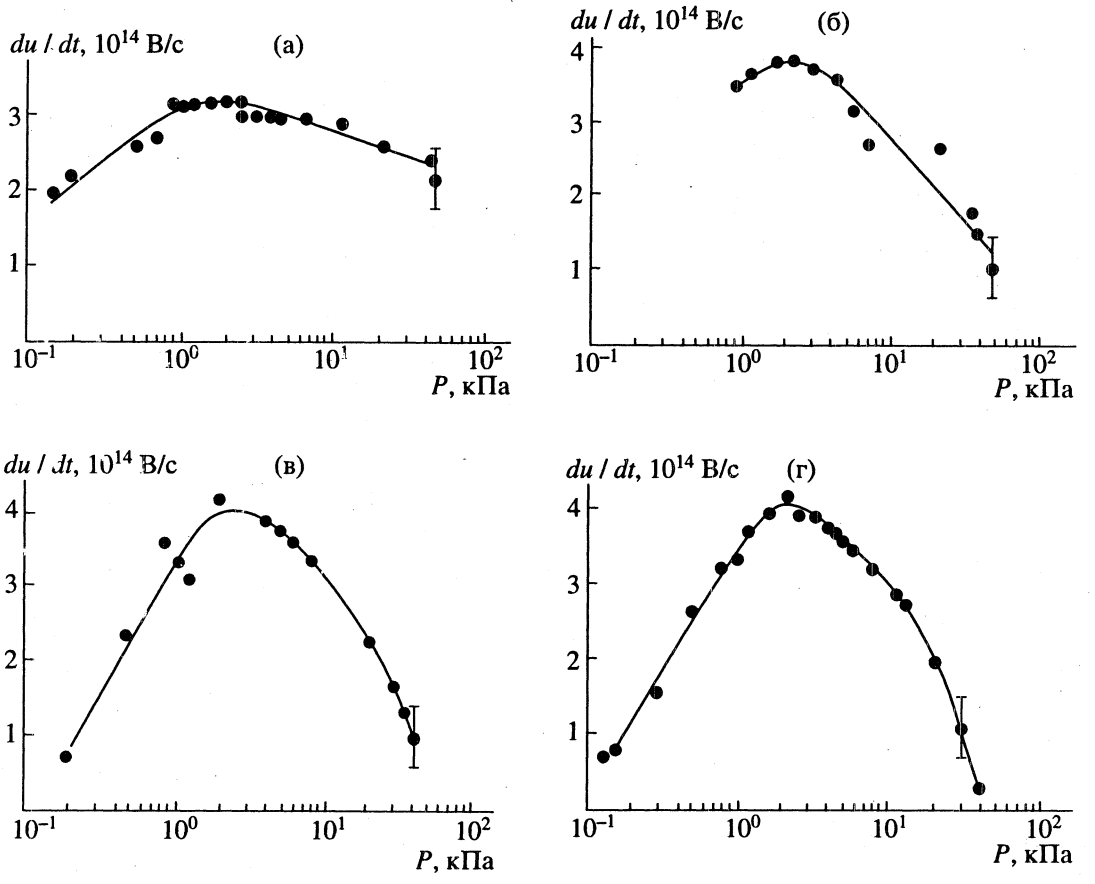
Пробой длинных газоразрядных трубок высоковольтными импульсами с наносекундной длительностью фронта обычно происходит в виде высокоскоростной волны ионизации (ВВИ) [1]. Фронт волны ионизации движется от высоковольтного электрода со скоростью 10^9 - 10^{10} см/с, производя ионизацию газа. Поскольку за фронтом остается столб хорошо проводящей плазмы, то потенциал высоковольтного электрода выносится в промежуток с незначительным затуханием, и практически все падение потенциала происходит во фронте ВВИ, где реализуются чрезвычайно высокие напряженности электрического поля и происходит основная ионизация газа. Почти все характеристики ВВИ (скорость, затухание амплитуды, ток) в основном определяются ионизационными процессами во фронте, экспоненциально зависящими от локальной напряженности электрического поля, величина которого, в свою очередь, обратно пропорциональна толщине фронта L. Величину L можно приближенно оценить как произведение длительности фронта на его скорость. В связи с этим особую важность приобретает вопрос о динамике фронта ВВИ, в частности, о возможности самопроизвольного уменьшения его длительности ("обострение" фронта). Явление обострения фронта электромагнитного импульса хорошо изучено для случая его распространения через нелинейную среду – феррит, в результате чего образуются ударные электромагнитные волны [2].

При исследованиях движения ВВИ амплитудой 6.4 кВ по слабоионизованной плазме было установлено, что длительность фронта ВВИ на некотором расстоянии от высоковольтного электрода может быть меньше длительности фронта исходного импульса напряжения [3]. В [4] была изучена динамика фронта ВВИ, движущегося по слабоионизованной плазме, по мере ее удаления от высоковольтного электрода. Было обнаружено обострение фронта ВВИ от 5 до 2 - 2.5 нс при амплитуде 25 кВ. В [5] аналогичное явление также зарегистрировано при амплитуде 28 кВ и указано, что, кроме обострения фронта, существуют и другие характеристики, позволяющие проводить аналогию между ВВИ и ударными электромагнитными волнами. В [3 - 5] обострение наблюдалось только для импульсов положительной полярности при достаточно высокой начальной концентрации электронов в газоразрядной трубке. При отрицательной полярности в этих экспериментах ВВИ либо не возникала, либо не происходило обострения ее фронта.

Однако при повышении напряжения до 150 - 200 кВ ситуация меняется. Максимальная скорость движения ВВИ при отрицательной полярности становится больше, чем при положительной, и достигает значений 2×10^{10} см/с при 250 кВ [6].

В данной работе исследована возможность обострения фронта ВВИ при отрицательной полярности и амплитуде импульса напряжения 250 кВ.

Схема эксперимента подробно описана в [7]. Разрядный промежуток представляет собой стеклянную трубку длиной 48.5 см, внутренним диаметром 0.4 см, внешним диаметром 1 см, включенную в разрыв центрального проводника коаксиальной линии. Металлический экран линии имел внутренний диаметр 5.4 см. К трубке по линии подавался одиночный импульс напряжения с амплитудой 250 кВ, длительностью 9 нс, длительностью фронта 2.5 нс. Параметры импульса напряжения на электроде (катоде) и вдоль разрядной трубки измерялись емкостными делителями напряжения. Расстояние от делителей до катода составляло 6, 26, 39 и 46 см. Сигналы с делителей подавались на осциллограф С7-15, горизонтальная развертка которого калибровалась синусоидой с частотой 1 ГГц. Погрешность временных измерений составляла ∓0.1 нс. Эксперименты проводились в азоте в диапазоне давлений 0.1 - 50 кПа и в воздухе в диапазоне 0.1 - 70 кПа без предварительной ионизации. В азоте сигналы с делителей имели фронты нарастания 0.5 - 2 нс. Минимальная длительность их переднего фронта – 0.5 нс наблюдалась при давлении 2 - 6 кПа, т.е. в диапазоне, где скорость ВВИ в азоте была максимальна – 2×10^{10} см/с, а коэффициент затухания амплитуды



Скорость нарастания напряжения во фронте ВВИ в зависимости от давления азота на разных расстояниях от катода: а – 6 см, б – 26, в – 39, г – 46.

напряжения по длине трубки минимален – 3×10^{-3} см$^{-1}$ [8]. При давлениях выше 40 кПа и ниже 1 кПа длительность фронта сигналов с делителей увеличивалась и начинала превышать длительность фронта исходного импульса.

На рисунке показана зависимость от давления азота крутизны нарастания сигналов напряжения с делителей, которая определялась как отношение $0.8U/t$, где U – амплитуда, t – время нарастания от 0.1 до 0.9 сигнала с делителя.

Крутизна сигналов с каждого делителя максимальна при давлении азота около 2 кПа и увеличивается монотонно по длине разрядной трубки от 3.2 до 4.2×10^{14} В/с, что сопоставимо с крутизной фронта в лучших генераторах наносекундных импульсов [8]. Следует отметить, что амплитуда ВВИ по мере ее движения вдоль трубки уменьшается из-за затухания, но обострение фронта происходит столь сильно, что крутизна фронта возрастает.

Аналогичные результаты были получены и в воздухе. Минимальная длительность фронта сигналов с делителей (0.5 нс) наблюдалась в диапазоне 2 - 20 кПа. Крутизна фронта была максимальна при давлении около 3 кПа, монотонно увеличиваясь по длине трубки от 2.7 до 3.5×10^{14} В/с, что близко к значениям, полученным в азоте.

Следовательно, при движении ионизующей волны пробоя длительность ее фронта монотонно уменьшается по мере удаления от катода, т.е. происходит обострение, а крутизна фронта растет. Для обострения наиболее благоприятен диапазон давлений, где скорость пробойной волны максимальна, а коэффициент затухания амплитуды напряжения минимален.

Оценим размер фронта ВВИ и концентрацию электронов за ним. Характерная толщина фронта, оцененная как произведение его скорости на длительность, составляет 5 - 10 см. Приведенная напряженность электрического поля равна $E/N = (1.1 - 5) \times 10^{-14}$ В см^2 для азота и воздуха в диапазоне давлений 2 - 9 кПа. Эти величины выше критического значения $E/N = 1.1 \times 10^{-14}$ В см^2 [9], при котором в плазме азота и воздуха появляются высокоэнергетичные "убегающие" электроны. Следовательно, фронт является источником высокоэнергетичных электронов, летящих в направлении движения фронта. Если "убегающий" электрон приобретает энергию 250 кэВ, то скорость его движения в вакууме будет равна 2.2×10^{10} см/с, что в пределах погрешностей совпадает с предельной скоростью ВВИ 2×10^{10} см/с при напряжении 250 кВ в разных газах [6].

Оцененный размер фронта ВВИ по величине близок к диаметру металлического экрана (5.4 см), окружающего разрядную трубку. По-видимому, минимальный размер фронта не может быть меньше из-за возбуждения в коаксиальной системе волн высших порядков, аналогичных возникающим при движении электромагнитной волны с очень коротким фронтом по коаксиальному кабелю. Поэтому можно предположить, что минимальный характерный размер фронта ВВИ близок к критической длине E-волны в коаксиальном волноводе

$$\lambda_{кр} = (D - d)\,\varepsilon_{эф}, \qquad (1)$$

где D, d – внутренние диаметры коаксиального экрана и разрядной трубки соответственно; $\varepsilon_{эф}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость сложного диэлектрика воздух–стекло. Для экспериментальных значений D = 5.4 см, d = 0.4 см, $\varepsilon_{эф}$ = 1.39 получим λ = 5.9 см. При этих оценках предполагалось, что проводимость за фронтом высока. Концентрацию электронов за фронтом ВВИ оценим по величине протекающего тока I

$$I = en_e v_{др} S. \qquad (2)$$

Здесь e – заряд электрона; n_e – концентрация электронов за фронтом; S – сечение разрядной трубки. Продольное электрическое поле за фронтом можно найти из предположения, что оно определяется затуханием амплитуды напряжения волны

$$U(x) = U_0 \exp(-ax), \qquad (3)$$

где $U(x)$ – амплитуда напряжения ВВИ на расстоянии x от электрода; U_0 – начальная амплитуда; a – коэффициент затухания, который был измерен в [8]. Значения $v_{др}$ в зависимости от E/N определялись из [10]. Оценка дает $n_e = 4 \times 10^{15}$ см$^{-3}$ для азота при давлении 4 кПа и токе 760 А.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что обострение фронта ВВИ может происходить при отрицательной полярности импульсов напряжения и без предварительной ионизации газа в разрядном промежутке. Обострение фронта происходит в области давлений, где скорость волны максимальна, а затухание амплитуды ВВИ минимально. Минимальный размер фронта близок к величине критической длины E-волны, что в условиях эксперимента близко к величине диаметра металлического экрана. При этом во фронте реализуются высокие значения приведенного электрического поля, в котором происходит интенсивная ионизация и образуются высокоэнергетичные электроны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Марковец В.В.* // ТВТ. 1983. Т. 21. № 2. С. 371; Т. 21. № 3. С. 577.
2. *Катаев И.Г.* Ударные электромагнитные волны. М.: Советское радио, 1963.
3. *Asinovsky E.I., Kirillin A.V., Markovets V.V., Vasiljak L.M.* // VIIth Intern. Simposium on discharges and elektrical insulation in vacuum. Novosibirsk. USSR. 1976. P. 336.
4. *Асиновский Э.И., Марковец В.В., Самойлов И.С.* Формирование ударной волны градиента потенциала при пробое разрядного промежутка. Препринт № 6-067. М.: ИВТАН, 1981.
5. *Басов А.А., Катаев И.Г., Колчин Д.П.* // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 11. С. 2206.
6. *Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Марковец В.В., Токунов Ю.М.* // ДАН СССР. 1982. Т. 263. № 6. С. 1364.
7. *Токунов Ю.М., Асиновский Э.И., Василяк Л.М.* // ТВТ. 1981. Т. 19. № 3. С. 491.
8. *Месяц Г.А., Шпак В.Г.* // Приб. техн. экспер. 1978. № 6. С. 5.
9. *Павловский А.И., Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В.* // ДАН СССР. 1985. Т. 281. № 6. С. 1359.
10. *Schlumbohm H.* // Zeitschrift Physik. 1965. B. 182. № 3. P. 317.