

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1890/82

19/4-82

9-82-13

С.А.Корнев, Н.Б.Рубин

ФОРМИРОВАНИЕ
В ВАКУУМНЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ КАНАЛАХ
ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Направлено в ЖТФ

1982

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое распространение получили методы генерации пристеночной плазмы в вакуумных протяженных каналах, что связано с широким диапазоном их применения. Например, в ускорительной технике они используются для удержания поперечных размеров пучков заряженных частиц^{/1/}.

Для формирования такой плазмы обычно используют высокочастотный пробой газа^{/2/} или безэлектродный кольцевой разряд^{/3/} при давлении остаточного газа $P \geq 10^{-2}$ Тор. При этом концентрация электронной компоненты плазмы составляет $10^{14} - 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Однако при уменьшении давления остаточного газа до $P = 10^{-6} \div 10^{-5}$ Тор и увеличении протяженности каналов $L \geq 1$ м/ эти способы создания плазмы становятся трудноосуществимыми.

Авторы данной работы предлагают и экспериментально показывают, что формирование пристеночной плазмы в протяженных каналах /длиной $L \geq 1$ м/ при давлении остаточного газа $P \sim 10^{-5}$ Тор можно осуществить на основе незавершенного разряда по поверхности диэлектрика.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 схематично показана экспериментальная установка для исследования процесса формирования пристеночной плазмы. Она состоит из генератора импульсного напряжения /ГИН/ (I) и плазменного канала (II).

ГИН собран по схеме разряда емкости C на сопротивление R ^{/4/}. Емкость C заряжается через зарядное сопротивление R_3 до напряжения $U = 5 \div 20$ кВ от выпрямителя B_1 . Коммутирующим элементом P является воздушный разрядник тригatronного типа, который срабатывает при поступлении от генератора поджигающих импульсов /ГПИ/ импульса напряжения с амплитудой 3 кВ. При этом ГИН выполняет функции емкостного накопителя энергии; максимальная энергия, запасаемая в нем, равна 4 кДж. Длительность формируемых импульсов составляет 6 мс.

Плазменный канал представляет собой коаксиальную систему из трех труб, вставленных одна в другую. Первая труба /1/ выполнена из нержавеющей стали, которая кроме своей функции формирования разряда выполняет роль вакуумной камеры; вторая труба /2/ - из диэлектрика. Она может быть изготовлена из винипласта, оргстекла, полиэтилена, стеатита. Труба 3 выпол-

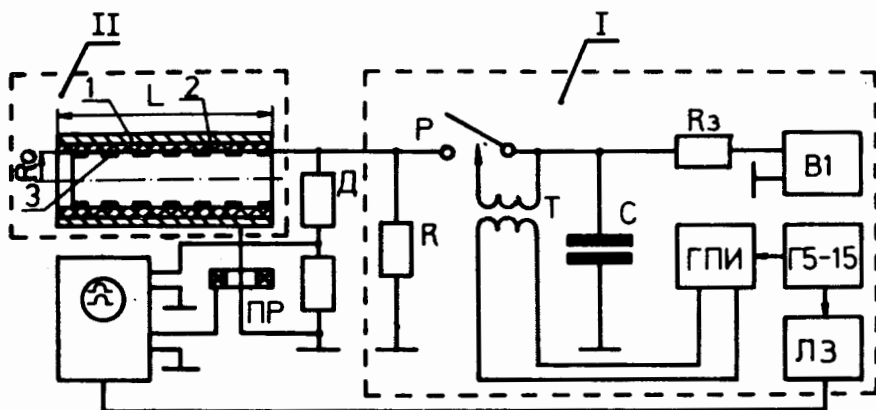


Рис.1. Схема экспериментальной установки: I - генератор импульсного напряжения /ГИИ/; II - плазменный канал; 1,2 - металлическая и диэлектрическая трубы; 3 - труба из металлической сетки.

нена из металлической мелкоструктурной сетки из нержавеющей стали. Между 2 и 3 трубами существует воздушный зазор $\sim 0,1$ мм, обусловленный естественным прижимом. Длина канала равна 1,8 м, а внутренний диаметр составляет 0,05 м

Плазменный канал откачивался через один из концов канала вакуумным агрегатом ВЛ-0,5 с вымораживанием паров масла до давления остаточного газа $P \sim 10^{-5}$ Тор. Давление в канале регулировалось при помощи натекателя в диапазоне от $P \sim 10^{-5}$ Тор до 10^{-2} Тор.

Для измерения амплитуды импульса напряжения на металлической сетке использовался высокоомный делитель напряжения /ВД/, для измерения разрядного тока - интегрирующий пояс Роговского /ПР/ с постоянной интегрирования $\tau_{\text{П}} \sim 100$ мс. Концентрация электронной компоненты измерялась двойным зондом Ленгюра.

Скорость распространения фронта плазмы определялась при помощи 3 коллекторов, которые устанавливались на определенном расстоянии от металлической сетки один за другим с интервалом 2 мм. Момент достижения плазмы коллекторов регистрировался по появлению импульса на каждом из трех каналов шестилучевого наносекундного регистратора БЛОР-04. Измеряя задержку времени между сигналами и стробирующим сигналом, скорость распространения фронта плазмы определяли как отношение длины участка к времени его прохождения плазмой.

Установка работает следующим образом: сначала заряжается емкость С ГИИ, затем импульс запуска поступает от генератора Г5-15, работающего в режиме разовых импульсов, на линию задержки /ЛЗ/ и генератор поджигающих импульсов, с которого импульс напряжения запускает триггерный разрядник Р. При срабатывании разрядника емкость С разряжается на сопротивление R, и импульс напряжения с него поступает на плазменный канал. По внутренней поверхности диэлектрической трубы формируется незавершенный разряд, который представляет собой пристеночную плазму. С линии задержки сигнал поступает на осциллограф и запускает его.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При обработке синхронных осциллограмм напряжения на металлической сетке плазменного канала и разрядного тока построена кривая зависимости пороговой напряженности электрического поля для формирования разряда в воздушном зазоре между трубами из диэлектрика /2/ и металла /3/ от давления остаточного газа в канале, которая приведена на рис.2. В этом эксперименте труба из металлической сетки заменена на сплошную. Снятая зависимость является более универсальной, чем данные по пороговым напряжениям зажигания незавершенного разряда по поверхности диэлектрика в зависимости от диэлектрической проницаемости при разной его толщине, которые приведены в работе /5/ для плоской системы электродов и диэлектрика между ними. На-

пряженность электрического поля в воздушном зазоре E_1 при $R_0 - h \leq R \leq R_0 + h$ вычислялась по формуле /8/:

$$E_1 = \frac{U \cdot \epsilon}{R \left(\epsilon \ln \frac{R_0}{R_0 - h} + \ln \frac{R_0 + h}{R_0} \right)} \cdot I_1, \quad /1/$$

где U - напряжение на металлической сетке плазменного канала, ϵ , R_0 , h - диэлектри-

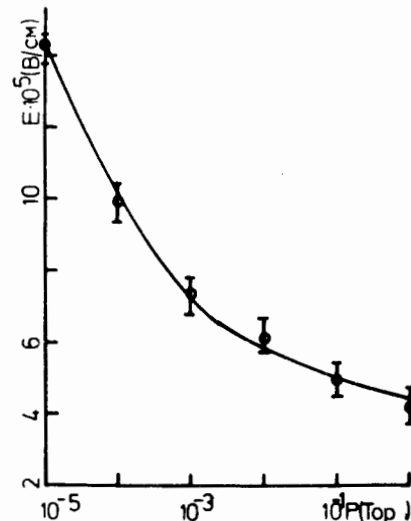


Рис.2. Зависимость пороговой напряженности электрического поля E для формирования разряда в промежутке между трубами из диэлектрика и металлической сетки от давления остаточного газа P в канале.

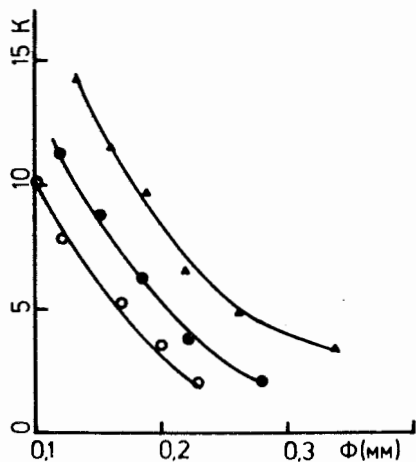


Рис.3. Зависимость коэффициента усиления электрического поля K от диаметра проволок металлической сетки: \circ - ячейка $2 \times 2 \text{ мм}^2$; \bullet - ячейка $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$; \blacktriangle - ячейка $1 \times 1 \text{ мм}^2$.

ческая проницаемость, внутренний радиус и толщина диэлектрической трубы; h - величина зазора между трубами 1 и 3; 1_r - единичный вектор, направленный по радиусу.

Момент зажигания регистрировался фотоэлектронным умножителем ФЭУ-87, сигнал с которого поступал на осциллограф. При замене металлической трубы на трубу из металлической сетки наблюдается уменьшение порогового напряжения зажигания разряда, то есть усиление электрического поля в промежутке между 2 и 3 трубами. Коэффициент усиления электрического поля K определяется следующим образом. Устанавливая металлическую сетку с одним и тем же размером ячейки, но разным диаметром проволок, и подавая импульс напряжения на канал, регистрировали момент зажигания разряда с помощью ФЭУ и контролировали по осциллограммам тока и напряжения на канале. На рис.3 приведена зависимость коэффициента K от диаметра проволок при размере ячейки $2 \times 2 \text{ мм}^2$, $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$ и $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Для использования формулы /1/ необходимо правую часть умножить на K .

Для практического применения при разработке указанных плазменных каналов из графика, приведенного на рис.3, выбирается значение E при некотором значении давления остаточного газа P и подставляется в формулу /1/. При подборе ϵ , R_0 , H , h , K можно определить пороговую величину амплитуды напряжения, которая достаточна для зажигания незавершенного разряда по поверхности диэлектрика.

Из анализа выражения /1/ следует, что, применяя диэлектрики с $\epsilon \sim 1000$, можно получить пороговое напряжение порядка сотен вольт. Однако с уменьшением значений диэлектрической проницаемости до $\epsilon \sim 2$ оно переходит в киловольтный диапазон. В некоторых случаях необходимо присутствие в пристеночной плазме компонент ионов легких элементов /протонов, ионов хлора и т.д./. Поэтому в плазменном канале в качестве материала для диэлектрической трубы используются полиэтилен, винипласт, оргстекло и т.д., у которых $\epsilon < 10$. В проводимых экспериментах

использовались винипластовые, стеатитовые, полиэтиленовые трубы. Для них напряжение зажигания с учетом коэффициента усиления поля из-за размеров металлической сетки составляло $5 \div 12 \text{ кВ}$.

При выборе напряжения зажигания разряда необходимо не допустить сквозного электрического пробоя диэлектрика, то есть выполнить условие

$$E_{\text{пр}} \geq E_2 = \frac{U}{R \left(\epsilon \ln \frac{R_0}{R_0-h} + \ln \frac{R_0+H}{R_0} \right)} \cdot 1_r \quad /2/$$

при $R_0 \leq R \leq R_0+H$,

где $E_{\text{пр}}$ - электрическая прочность диэлектрика, которая характеризуется пробивной напряженностью электрического поля в диэлектрике.

Зажженный разряд в начальной стадии не является стабильным, и для перехода его в стабильное состояние необходимо ввести в него энергию W от накопителя энергии /ГИНа/. Стабильное состояние характеризуется однородной плазмой по длине канала.

Проведенные эксперименты показывают, что W зависит от длины и геометрии канала. Наиболее удобно этот параметр охарактеризовать через плотность энергии, которая определяется как отношение энергии к площади канала. Условие для формирования однородной плазмы в канале можно сформулировать в виде

$$W \geq /0,2 \div 0,6/ \text{ Дж/см}^2. \quad /3/$$

С учетом коэффициента передачи энергии η накопитель энергии /ГИН/ должен запастись энергией

$$W_r = \frac{CU^2}{2} \cdot /0,2 \div 0,6/ \cdot S \cdot \eta, \quad /4/$$

где S - площадь плазменного канала /см²/; C - емкость ГИНа; η - коэффициент передачи энергии в канал, $\eta = 0,5 \div 0,7$. Из формулы видно, что для получения необходимой энергии W можно изменять как емкость ГИНа, так и напряжение. При подборе напряжения необходимо учитывать условие /2/. Поскольку η зависит и от сопротивления R , то возможна регулировка им W .

Таким образом, сформулированы и экспериментально определены основные требования к плазменному каналу, которые необходимы для его разработки.

В результате обработки осциллограмм с двойного зонда Ленгмюра построены распределения концентрации электронной компоненты во времени T /рис.4/ и по длине канала L , по радиусу R и азимуту Ψ /рис.5/ при давлении остаточного газа $P \sim 10^{-5}$ Тор и ее зависимость от давления остаточного газа P /рис.6/.

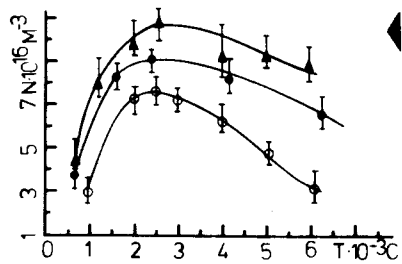


Рис.4. Распределение концентрации электронной компоненты N во времени T при давлении остаточного газа $P \sim 10^{-5}$ Тор, при различной энергии, передаваемой в плазменный канал с винипластовой трубой: \circ - 1000 Дж; \bullet - 1600 Дж; \blacktriangle - 2000 Дж.

Рис.5. Распределение концентрации электронной компоненты N по длине канала L , по радиусу R и азимуту Ψ при давлении остаточного газа $P \sim 10^{-5}$ Тор и энергии 1600 Дж /диэлектрическая труба выполнена из винипласта/.

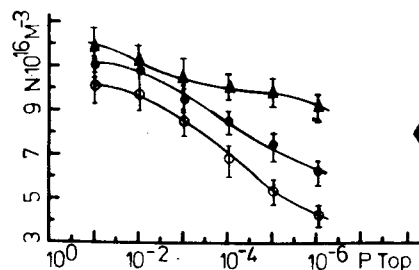
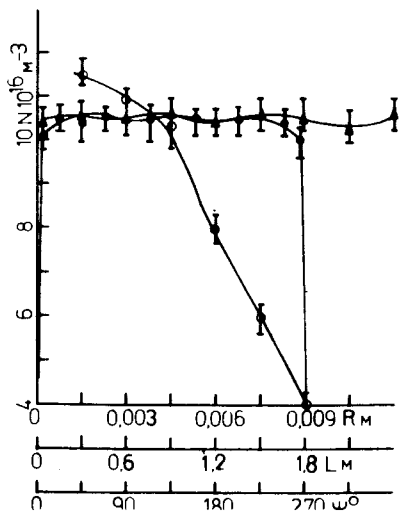


Рис.6. Зависимость концентрации электронной компоненты N от давления остаточного газа P в канале с винипластовой трубой: \circ - 1000 Дж; \bullet - 1600 Дж; \blacktriangle - 2000 Дж.

Из них следует, что формируемая плазма достаточно однородна по концентрации электронной компоненты N , по длине L и азимуту Ψ . Слабая зависимость концентрации N от давления остаточного газа P в канале означает, что плазма по своему характеру является эрозионной. Изменения скорости распространения фронта плазмы показывают, что она зависит от давления незначительно и составляет $v \sim 1/2 \div 4/10^8$ см/с для многих материалов диэлектрической трубы: 2×10^8 см/с - для стеатита; 4×10^8 см/с - для винипласта.

ВЫВОДЫ

Применяя незавершенный разряд по поверхности диэлектрика, как показывают эксперименты, возможно формирование пристеночной плазмы в протяженных каналах при давлении остаточного газа вплоть до 10^{-5} Тор.

Сформированная плазма достаточно однородна по концентрации электронной компоненты N , по длине канала и азимуту. Максимальная концентрация электронов N составляет 10^{17} м^{-3} .

В заключение авторы выражают благодарность К.В.Ходатаеву за полезные обсуждения и интерес к данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко А.Н. и др. Мощные электронные пучки и их применение. Атомиздат, М., 1977.
2. Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. Изд-во ГИТТЛ, М., 1950.
3. Петров В.А. и др. В кн.: Труды НИИЯФ при ТПИ. Атомиздат, М., 1979, с. 40.
4. Самойлов В.Ф., Маковеев В.Г. Импульсная техника. "Связь", М., 1964.
5. Бугаев С.П., Месяц Г.А. Доклады АН СССР, 1971, т. 196, №2, с. 324.
6. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. Связьиздат, М., 1951.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 января 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

| | | |
|---------------|--|------------|
| D1,2-9224 | IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975. | 3 р. 60 к. |
| D-9920 | Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976. | 3 р. 50 к. |
| D9-10500 | Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976. | 2 р. 50 к. |
| D2-10533 | Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976. | 3 р. 50 к. |
| D13-11182 | Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977. | 5 р. 00 к. |
| D17-11490 | Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977. | 6 р. 00 к. |
| D6-11574 | Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978. | 2 р. 50 к. |
| D3-11787 | Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978. | 3 р. 00 к. |
| D13-11807 | Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978. | 6 р. 00 к. |
| | Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/ | 7 р. 40 к. |
| D1.2-12036 | Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978 | 5 р. 00 к. |
| D1,2-12450 | Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978. | 3 р. 00 к. |
| | Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/ | 8 р. 00 к. |
| D11-80-13 | Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979 | 3 р. 50 к. |
| D4-80-271 | Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979. | 3 р. 00 к. |
| D4-80-385 | Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980. | 5 р. 00 к. |
| D2-81-543 | Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981 | 2 р. 50 к. |
| D10,11-81-622 | Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980 | 2 р. 50 к. |

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Корнев С.А., Рубин Н.Б. Формирование в вакуумных протяженных каналах пристеночной плазмы 9-82-13

Предложено для генерации пристеночной плазмы в протяженных цилиндрических каналах при давлении остаточного газа $P \approx 10^{-5}$ Торр использовать незавершенный разряд по поверхности диэлектриков и экспериментально показано, что формируемая при этом плазма достаточно однородна по концентрации своих компонент по длине канала и азимуту. Длина исследуемого канала равна 1,8 м, а диаметр - 0,05 м. Максимальная концентрация электронной компоненты составляет $\sim 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Korenev S.A., Rubin N.B. Forming of Bywalled Plasma in Vacuum Prolonged Channels 9-82-13

The application of incomplete rate-in surface dielectric for generating the bywalled plasma in prolonged cylindrical channels at a pressure of the residual gas of $P \sim 10^{-5}$ Torr is proposed. It is demonstrated that the plasma being formed in the process is sufficiently homogeneous by concentration of the components, by the channel length and azimuth. The length of the experimental channel under investigation was 1.8 m, its diameter amount 0.05 m. The maximum concentration of electron component is 10^{17} m^{-3} .

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.