

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1872/82

19/4-82

P1-82-40

В.Д.Володин, Н.С.Глаголева, Е.А.Дементьев,
А.А.Кузнецов, Е.А.Матюшевский,
А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин

СТРИМЕРНЫЕ СЛЕДЫ ЭЛЕКТРОНОВ
В НЕОНЕ, НАХОДЯЩЕМСЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

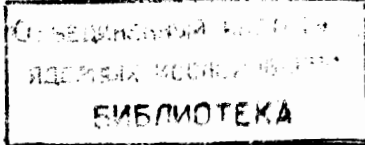
Направлено в журнал "ПТЭ"

1982

Стримерные камеры, как управляемые трековые детекторы заряженных частиц, находят все более широкое применение в ядерно-физических экспериментах на ускорителях высоких энергий. В камере реализуется возможность локализации газового разряда, возникающего под действием высоковольтных импульсов наносекундной длительности вдоль траектории прошедшей частицы. Созданы и работают на ускорителях стримерные камеры с рабочим объемом 1 м^3 и более, наполненные неоном или неон-гелиевой смесью при атмосферном давлении. Эти газы отличаются сравнительно низким потенциалом зажигания, что упрощает проблему импульсного питания.

При достаточной разрешающей способности оптики и фотоматериалов пространственное разрешение стримерной камеры зависит от размеров стримеров, которые при атмосферном давлении достаточно велики: длина - 5-10 мм, диаметр - 1-2 мм. Известно, что размеры стримеров уменьшаются при повышении напряженности импульсного электрического поля и соответствующем сокращении длительности импульса^{1/}, а также при повышении давления газа^{2/}. Однако в распоряжении экспериментаторов в настоящее время нет данных по количественным соотношениям, связывающим размеры стримеров с давлением рабочего газа, амплитудой и длительностью высоковольтного импульса. И хотя точность определения импульсов заряженных частиц в стримерной камере по кривизне трека в магнитном поле улучшается при прочих равных условиях примерно квадратично с длиной трека и лишь линейно с уменьшением его ширины, повышение пространственного разрешения камеры остается актуальной задачей.

Известно также, что размеры и яркость стримеров в камере в процессе их развития нарастают постепенно от размеров электронных лавин до регистрируемых фотографически стримеров. Поэтому в любом случае повышение чувствительности регистрирующего устройства при его достаточной разрешающей способности обеспечивает улучшение разрешения в камере. И с этой точки зрения потребность в сверхчувствительных приемниках с высоким разрешением и стабильными характеристиками /разработкой электронно-оптических преобразователей, твердотельных приемников светового излучения, микроканальных пластин/ остается весьма актуальной. Однако цель данной работы - изучить возможности улучшения разрешения, заложенные в стримерной камере механизмом газового разряда.



КАМЕРА И АППАРАТУРА

Стримерная камера представляет собой герметизированный объем, заключенный в стальном корпусе /1/ /рис.1/ вместе с электродами /2/, закрепленными /подвижно/ на изоляторах /3/ из оргстекла. Конструкция камеры симметрична относительно средней плоскости, и обе части, несущие электроды, выполнены идентично. Изменение зазора между электродами обеспечивается с помощью шестерчатых передач, резьбовых сочленений /4,5,6, оргстекло/ и рукоятки /7/, закрепленной на оси /8/ вместе с шестерней /9/, связанной с отсчетным устройством /10/ измерения линейного перемещения электрода от центральной оси. Один оборот рукоятки соответствует перемещению электрода на 0,5 мм. Рабочая часть электрода /11/ - почерненная латунная сетка с ячейкой $0,25 \times 0,25 \text{ мм}^2$ и диаметром проволоки 0,07 мм. При перемещении электрода его электрическая емкость относительно окружающих элементов практически не меняется и равна 30 пФ.

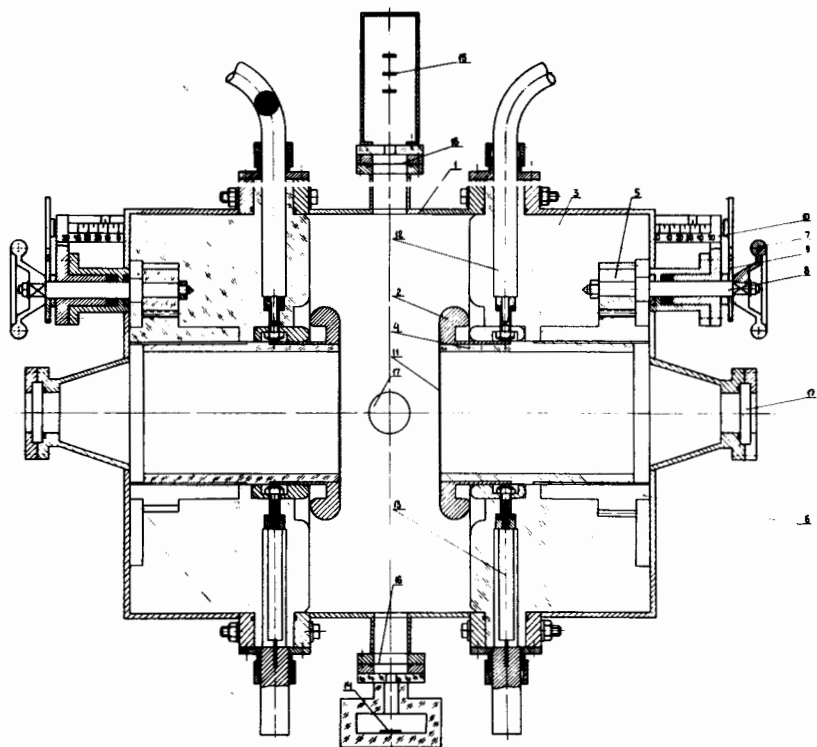


Рис.1. Схема стримерной камеры /в разрезе/.

На каждом изоляторе камеры имеется четыре гнезда, расположенных взаимно перпендикулярно, для подключения высоковольтных кабельных вводов /12/, согласующих сопротивлений /13/, делителей напряжений и заземлителей. В качестве согласующих сопротивлений использованы резисторы типа ТВ0-10 величиной 50 или 75 Ом, в зависимости от типа подключаемого кабеля /РК-50-11-13, РК-8/. Герметизация объема камеры осуществлена с помощью уплотнений из вакуумной резины и болтовых соединений.

Стримерная камера запускалась от бета-источника /14/ Ru-106 /граничная энергия 3,53 МэВ/ с помощью счетчиков /15/, работающих в режиме тройных совпадений. Для этого по обеим сторонам корпуса камеры сделаны окна /16/ из лавсановой пленки толщиной 0,15 мм. Для локализации треков вдоль оси камеры у окон были установлены шайбы из оргстекла с отверстиями в центре. Диаметр отверстия шайбы, расположенной у бета-источника, - 5 мм, у счетчиков - 8 мм.

Фотографирование стримерных следов частиц производилось с четырех направлений одновременно как сквозь электрод /по полю/, так и сбоку /поперек поля/ через окна /17/ из оптического стекла фотокамерами типа РК-5 на аэрофотопленку ТИП-22 / $S_{0,85} = 1200 \text{ ед. ГОСТ}$, $\gamma=1,9$ /. На двух фотокамерах /вдоль и поперек поля/ были установлены объективы с фокусным расстоянием 28 мм /относительное отверстие 1:2/, которые обеспечивали фотографическое разрешение на пленке указанного типа 35-40 лин/мм, что при масштабе съемки 1:17 соответствует разрешению в камере около 0,5 мм. Две другие фотокамеры были оснащены объективами типа ОКС5-56-1 с фокусным расстоянием 56 мм /относительное отверстие 1:2,7/. Они давали лучшее разрешение на пленке /50 лин/мм/ и, соответственно, в камере - около 0,15 мм при масштабе съемки 1:7. Все объективы были сфокусированы на середину стримерной камеры /ось пучка электронов/, а запуск всех четырех фотокамер осуществлялся синхронно. Съемка производилась без перезарядки РК-5 во всем диапазоне давлений, химическая обработка пленки осуществлялась одним рулоном.

Перед проведением цикла съемок объем камеры был откачен и вакуум поддерживался в течение нескольких дней с периодической промывкой объема чистым неоном для уменьшения гажения оргстекла и других элементов конструкции. Цикл съемок занимал несколько часов - время, за которое изменений характеристик стримерного следа не отмечалось.

Давление в камере измерялось двумя манометрами с классом точности 1,5, температура в помещении во время измерений составляла 20-22°C. Точность измерения межэлектродного расстояния при перемещении электрода не хуже 1,5%.

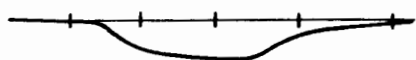


Рис.2. Оциллограмма высоковольтного импульса, метки - 10 нс.

Питание камеры осуществлялось от двуполярного генератора высоковольтных импульсов, описанного в работе /8/. Режим генератора во время съемки не изменялся, зарядное напряжение поддерживалось на одном уровне /+54 кВ/, длительность импульса оставалась постоянной /18 нс на полувысоте, рис.2/. Импульсы передавались на электроды камеры по кабелям типа РК-50-11-13 длиной по 4 м каждый. В противоположных кабельных вводах гнездах камеры были установлены согласующие сопротивления величиной 50 Ом каждое. Погрешность измерений амплитуды высоковольтного импульса на электродах камеры /+45 кВ/ оценивается в 5-7%.

Задержка запуска камеры относительно момента прохождения электрона от бета-источника составляла 0,5 мкс.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Длина и диаметр стримеров в сильной степени зависят от фазы развития разряда, поэтому в процессе фотографирования следов при разных давлениях неона в камере величина межэлектродного зазора подбиралась по началу регистрации треков на пленке. а при измерении геометрических размеров стримеров на снимках отбрасывались переразвитые или потерявшие устойчивость стримеры /5-10% общего их числа на следе/.

На рис.3 приведены полученные результаты. Линия 1 соответствует порогу чувствительности аэрофотопленки ТИП-22, линия 2 - порогу чувствительности глаза. Из этих данных видно, что при фиксированной длительности высоковольтного импульса размеры стримеров в неоне, а также величина межэлектродного зазора в камере, уменьшается с ростом давления приблизительно пропорционально \sqrt{P} . Или точнее, с учетом возможных ошибок

$$b \sim P^{-0,58 \pm 0,02}; \quad l_c \sim P^{-0,58 \pm 0,6}; \quad d_c \sim P^{-0,58 \pm 0,1} \quad /1/$$

Прямые линии на рис.3 соответствуют показателю степени - 0,58.

Среднеквадратичное отклонение центров стримеров от оси трека, обусловленное диффузией электронов, также уменьшается с давлением приблизительно пропорционально \sqrt{P} .

На рис.4 полученные экспериментальные данные представлены в координатах E/P от PT , где E - напряженность поля, соответствующая началу фоторегистрации, а T - длительность высоковольтного импульса в камере. Сплошная линия соответствует за-

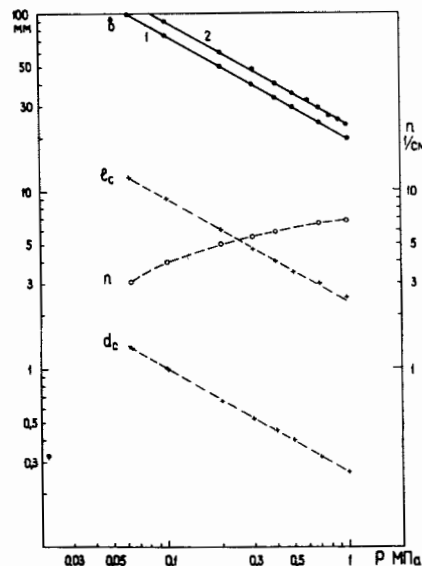


Рис.3. Зависимость межэлектродного зазора b , средних длин l_c и диаметра d_c , а также плотности стримеров n от величины абсолютного давления P неона в камере.

висимости

$$\frac{E}{P} \sim (PT)^{-0,42} \quad /2/$$

или

$$E \sim P^{0,58} T^{-0,42} \quad /3/$$

Из приведенных на рис.5 данных с учетом возможных ошибок следует, что

$$d_c \sim E^{-1 \pm 0,17} \quad /4/$$

Линия на этом рисунке соответствует показателю степени - 1. И хотя эта зависимость получена при длительности импульса 18 нс, можно ожидать, что она приблизительно сохраняется и при других реальных длительностях импульсов. Об этом косвенно свидетельствуют данные работы /2/ / $E = 333$ кВ/см, $T = 0,5$ нс, $P = 24$ атм, электронно-оптический преобразователь, разрешение в стримерной камере 50 мкм/.

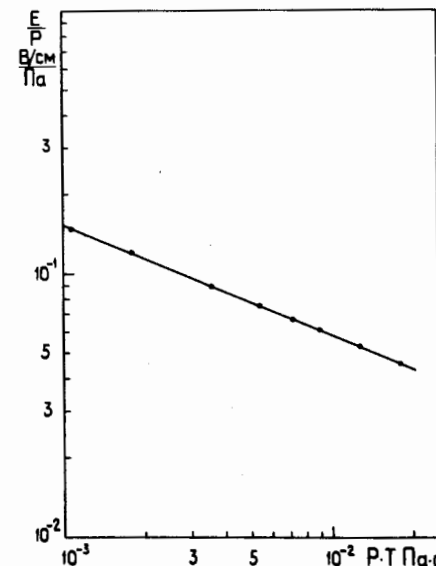


Рис.4. Зависимость E/P от PT . E - напряженность поля, T - длительность импульса в камере.

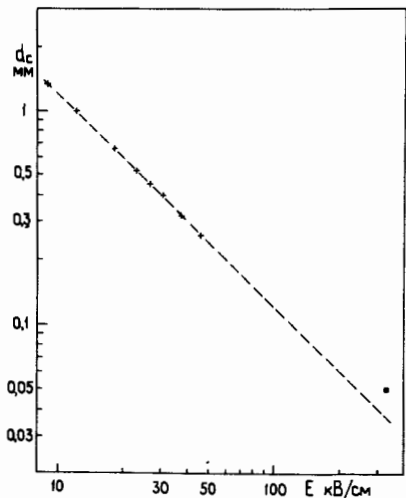


Рис.5. Зависимость среднего диаметра стримеров d_c от градиента поля E в камере. Квадратиком отмечена точка из работы /2/.

На рис.6 приведены снимки следов электронов, зарегистрированных в камере при давлениях неона 0,1 и 1 МПа.

Обсуждая полученные результаты, следует отметить, что выражение /3/, где сумма абсолютных величин показателей степени правой части равна единице, может быть выведено, если принять, что дрейфовая скорость электронов

$$\nu \propto E/P, \text{ коэффициент ионизации } \frac{\alpha}{P} \propto P \left(\frac{E}{P}\right)^m \text{ и } a \nu T - \text{ константа:}$$

$$E \propto (P)^{\frac{m}{m+1}} (T)^{-\frac{1}{m+1}} \quad /5/$$

Известные из литературы зависимости ν и α от E/P для неона в первом приближении могут быть аппроксимированы упомянутой функциональной зависимостью, что приводит к показателю степени $m/(m+1) \approx 0,65$

Различие в показателях степени /0,58 и 0,65/ можно объяснить приближенным характером аппроксимации ν и α , с одной стороны, и, с другой - возможным присутствием в камере следов аргона или других компонентов воздуха, адсорбированного на элементах конструкции. Реальный газ в камере эти следы практически всегда содержит.



а



б

Рис.6. Фотографии стримерных треков в камере с неоном при атмосферном давлении /а/ и давлении 1 МПа/б/. Длина треков - 7 см.

Из /3/ может быть выведено еще одно соотношение:

$$\frac{E^2 T^{0,84}}{P^{1,16}} - \text{ константа.}$$

Видно, что оно несколько отличается от подобного соотношения $\frac{E^2 T}{P}$ - константа/, полученного в /4/ для более поздней стадии развития разряда - стадии формирования искры в камере с неоновым наполнением. Из /3/ следует также, что при неизменном давлении

$$E \propto T^{-0,42}$$

Это хорошо согласуется с результатами расчетов /1/ и соответствует экспериментальным данным работы /5/.

В настоящее время большинство стримерных камер работает при атмосферном давлении с генератором, обеспечивающим формирование высоковольтного импульса длительностью 10-20 нс, что обуславливает рабочий градиент поля 15-10 кВ/см. Увеличение напряженности поля в камере связано с дальнейшим сокращением длительности импульса; его сокращение до 5-6 нс позволяет уменьшить размеры стримеров. Однако формирование более коротких импульсов известными методами оказывается практически очень сложной задачей для больших стримерных камер.

Поэтому дальнейшее сокращение размеров стримеров в стримерной камере с неоновым наполнением связано с увеличением плотности рабочего газа в ней, которое может быть достигнуто либо путем существенного снижения температуры газа /6/, либо путем повышения его давления. В криогенной стримерной камере представляется весьма проблематичным регулирование времени памяти из-за вымораживания практически всех примесей, применяемых для сокращения памяти при нормальных условиях.

Полученные в настоящей работе результаты позволяют прогнозировать характеристики стримерного следа. Так, например, сократив длительность высоковольтного импульса до 5-6 нс и повысив давление неона в камере до 0,5-0,6 МПа /5-6 атм/, можно уменьшить размеры стримеров в камере почти в 5 раз либо обеспечить существенное увеличение /более чем на порядок/ яркости стримеров, так как яркость стримера пропорциональна почти кубу его длины /1/.

Понятно, что пространственное разрешение стримерной камеры определяется не только размерами стримеров, но и радиусом диффузии электронов на следе прошедшей частицы за время задержки высоковольтного импульса. Причем относительный вклад диффузии возрастает не только с ростом задержки и давления, но и с повышением чувствительности регистрирующего устройства.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Ф.Акимовой, В.Д.Аксиненко, А.А.Верещагину, А.И.Голохвастову, Н.И.Каминскому, Б.К.Курятникову, Ю.Лукстиньшу, В.Я.Рубцову, В.Н.Ряховскому, С.А.Хорозову за помощь на отдельных этапах работы, Б.А.Долгошеину и Н.Н.Нургожину за полезные обсуждения. Авторы признательны также А.М.Балдину и М.Г.Мещерякову за внимание и интерес к проведенной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глаголева Н.С. и др. ОИЯИ, P13-7791, Дубна, 1974.
2. Sandweiss J. Phys.Today, 1978, oct., p.40-45.
3. Володин В.Д. и др. ПТЭ, 1978, №3, с.66.
4. Князев В.М., Любимов В.А. Препринт ИТЭФ, №451, М., 1966.
5. Варденга В.А. и др. ОИЯИ, P13-9315, Дубна, 1975.
6. Городков Ю.В. и др. Препринт ИТЭФ-35, М., 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 января 1982 года.

Володин В.Д. и др.

P1-82-40

Стримерные следы электронов в неоне, находящемся под давлением

Описываются экспериментальные результаты исследования зависимости размеров стримеров в неоне от давления, полученные с помощью снимков следов электронов от бета-источника в стримерной камере, допускающей возможность плавного изменения рабочего зазора от 0 до 100 мм в диапазоне давлений 0-1 МПа /0-10/ ата. Питание камеры осуществлялось от двуполярного генератора высоковольтных импульсов, режим работы которого во время съемки не изменялся, зарядное напряжение поддерживалось на одном уровне ± 54 кВ/, длительность импульса оставалась постоянной /18 нс/. Импульсы передавались на электроды камеры по кабелям согласованными на конце резисторами 50 Ом. Съемка производилась четырьмя синхронно запускаемыми фотоаппаратами типа РФК-5 с двумя парами объективов. Максимальное фотографическое разрешение в объеме камеры 0,15 мм. Найдено, что при изменении давления от 0,06 до 1 МПа /0,6-10 ата/ $b \sim P^{-0,58 \pm 0,02}$, $l_c \sim P^{-0,58 \pm 0,06}$, $d_c \sim P^{-0,58 \pm 0,01}$; где b - межэлектродный зазор, l_c - средняя длина, d_c - средний диаметр стримеров. На основе экспериментальных данных выведены дополнительные соотношения, обсуждаются полученные результаты.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий и Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Volodin V.D. et al.

P1-82-40

Electron Streamer Tracks in Neon Under Pressure

Experimental results on the study of the dependence of streamer dimensions in neon upon pressure are described. These are obtained by means of photographs of electron tracks from the beta-source in a streamer chamber permitting a smooth variation of operating gap from 0 up to 100 mm within the 0-1 MPa (0-10 ata) pressure range. The dependences obtained allow one to predict streamer dimensions of charged particle track in a chamber filled with neon at changing pressure and high voltage pulse parameters.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies and the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.