

## Исследование распространения ионизационных волн в неоднородных каналах с некруглым поперечным сечением

© А.Н. Белоногов, А.Е. Дубинов, А.Н. Максимов, М.С. Мироненко

Саровский физико-технический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета „МИФИ“, 607188 Саров Нижегородская область, Россия  
e-mail: dubinov-ae@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 10 октября 2013 г.)

Исследовано распространение ионизационных волн в неоднородных каналах тлеющего разряда постоянного тока. Методом визуализации и обработки изображений измерены зависимости расстояния между соседними стратами от площади поперечного сечения канала. Получено, что характер зависимостей существенно зависит от геометрии канала: зависимость для конкретного канала может быть возрастающей, убывающей или немонотонной с локальным максимумом.

### Введение

Исследование волновых процессов в тлеющем разряде уже много десятилетий представляет научный и практический интерес. Например, существует ряд неустойчивостей положительного столба тлеющего разряда, которые приводят к нарушению однородности параметров плазмы, к расслоению или стратификации разряда. Возникновение в результате ионизационно-перегревной неустойчивости страт, представляющих собой, как уже давно установлено, ионизационные волны, является одним из наиболее распространенных примеров волнового процесса в тлеющем разряде [1,2]. Страты могут легко обнаруживаться в виде бегущей или неподвижной последовательности ярких и темных участков положительного столба. Давно установлено, что расстояние между соседними стратами  $d$  (или что то же самое, длина волны  $\lambda$ ) зависит как от состава и давления  $p$  плазмы, так и от радиуса  $R$  разрядной трубки:

$$\frac{d}{R} = \frac{C}{(pR)^m}, \quad (1)$$

где  $C$  и  $m$  — постоянные, зависящие от состава плазмы, причем  $m < 1$ . Эта зависимость была измерена в [3,4] и носит название закона Гольдштейна–Венера [5,6]. Недавно в [6] этот закон был экспериментально подтвержден с помощью современной техники визуализации разряда. Из закона Гольдштейна–Венера, в частности, следует, что поскольку  $m < 1$ , то всегда  $d$  и  $\lambda$  растут с ростом  $R$ .

А как изменится закон (1) для разрядов в каналах с некруглым поперечным сечением? Разумно предположить, что в записи обобщенного закона Гольдштейна–Венера вместо  $R$  должна как-то входить площадь поперечного сечения канала разряда  $S$ . Экспериментальное установление характера зависимости  $d(S)$  — цель настоящей работы.

Для достижения этой цели было предложено использовать разрядные каналы с некруглым (прямоугольным) поперечным сечением с плавно меняющейся площадью  $S$  вдоль направления тока разряда.

Известны примеры работ с неоднородными каналами разряда, в которых изучаются страты. Например, в плоских разрядах дискового типа с круглым полым катодом, охватывающим стержневой анод, площадь поперечного сечения разряда растет пропорционально первой степени расстояния сечения от анода  $L$ , а страты формируются в виде концентрических колец [7,8]. Из изображения страт в таком дисковом разряде, приведенного в [7], следует, что  $d$  растет с ростом  $S$ . Но в [8] приведены два изображения, на одном из которых  $d$  также растет с ростом  $S$ , а на другом, наоборот,  $d$  уменьшается с ростом  $S$ . Этот факт указывает на то, что искомая зависимость  $d(S)$  в отличие от (1) может оказаться убывающей или даже немонотонной, а ее характер может сильно зависеть от геометрии и режима горения разряда.

Другой пример — сферические разряды с полым катодом, охватывающим точечный анод. В них получают вложенные друг в друга сферические страты [7,9–11]. В такой конфигурации площадь поперечного сечения разряда  $S$  растет пропорционально квадрату расстояния сечения от анода. Было определено, что в условиях работ [7,9,10]  $d$  растет с ростом  $S$  по экспоненциальному закону. Опубликованные работы, в которых зависимость  $d(S)$  для сферических страт являлась бы убывающей (или немонотонной), нам пока не известны.

Если представить себе гипотетическую ситуацию, что в некоем 4-мерном мире кто-то смог создать камеру с полым катодом в виде 4-мерной сферы, тогда бы в ней площадь поперечного сечения разряда  $S$  росла пропорционально кубу расстояния сечения от анода. А какие в ней будут страты, и как будет вести себя зависимость  $d(S)$ ? Это пока неизвестно.

Близка к обсуждаемым вопросам работа [12], в которой исследовалось преломление ионизационной волны на плоско-параллельном сужении канала разряда. Из нее, в частности, следует, что в сужении канала растут фазовая скорость волны и  $d$ , что соответствует убывающей зависимости  $d(S)$ .

Таким образом, приведенный краткий обзор работ по стратам в неоднородных каналах убеждает в необходи-

мости и актуальности определения характера зависимости  $d(S)$ , в том числе поиска ответа на вопрос, когда она может быть убывающей, и когда немонотонной.

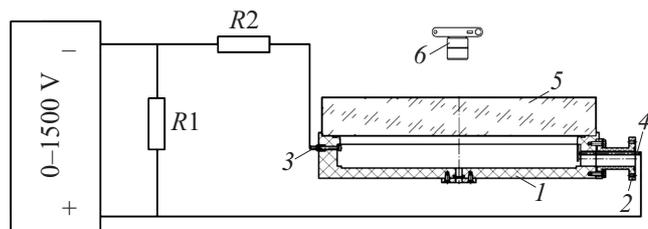
## 1. Описание камеры, методики экспериментов

Эксперименты проводились в дисковой газоразрядной диэлектрической камере  $\varnothing 450 \times 50$  mm, ранее описанной в [8,12]. Ее конструкция и схема подключения показаны на рис. 1. В настоящей работе на боковой поверхности камеры диаметрально противоположно друг другу устанавливались стальные катод  $\varnothing 20$  mm и прямоугольный анод  $40 \times 20$  mm. Сверху камера закрывалась кварцевым окном наблюдения толщиной 60 mm.

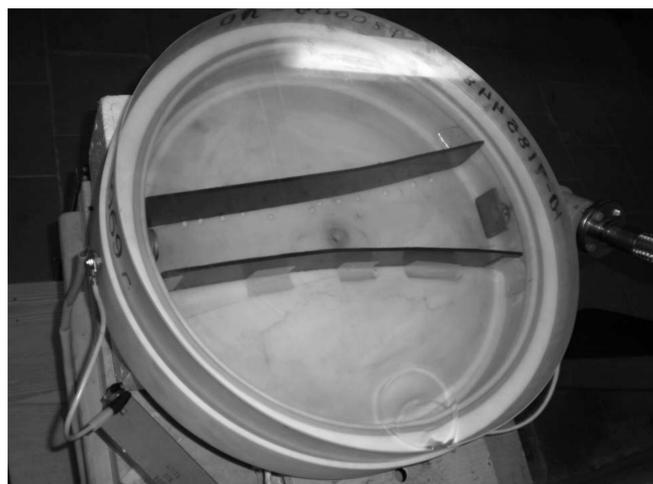
Электроды газоразрядной камеры подключались к источнику питания через разделительные резисторы  $R_1 = 36$  kOm и  $R_2 = 750$  Om.

Внутри разрядной камеры устанавливались две диэлектрические гибкие перегородки по заданным профилям из следующего списка: прямые параллельные перегородки, прямые непараллельные перегородки, расположенные под заданным углом, перегородки, имеющие профили параболы или кубической кривой. При этом площадь поперечного сечения канала разряда изменялась по мере удаления от анода (или катода) по одной из функциональных зависимостей:  $S = \text{const}$ ,  $S \propto L$ ,  $S \propto L^2$  или  $S \propto L^3$  соответственно. Этими перегородками моделировались распределения токов в разрядных каналах трубки постоянного сечения, дисковой камеры, сферической камеры и 4-мерной камеры, упомянутых в разд 1. Пример установки параболических перегородок, формирующих канал с  $S \propto L^2$ , показан на рис. 2.

Обратим внимание на следующее важное обстоятельство. Мы выбрали, что расстояние  $L$  отсчитывается от анода, а не от катода, и при этом предполагали, что узкая часть канала всегда располагается вблизи анода. Этим моделируются страты в упомянутых выше дисковой и сферической камерах с полым катодом. Если же узкую часть канала расположить вблизи катода, то зависимость  $d(L)$  при отсчете  $L$  от анода обязана получаться другой, но итоговая  $d(S)$  все же должна оказаться



**Рис. 1.** Конструкция газоразрядной камеры и электрическая схема ее подключения: 1 — днище камеры, 2 — патрубок для откачки газа, 3 — катод, 4 — анод, 5 — окно наблюдения, 6 — цифровая фотокамера.



**Рис. 2.** Фотография газоразрядной камеры с установленными диэлектрическими перегородками, формирующими профиль канала.

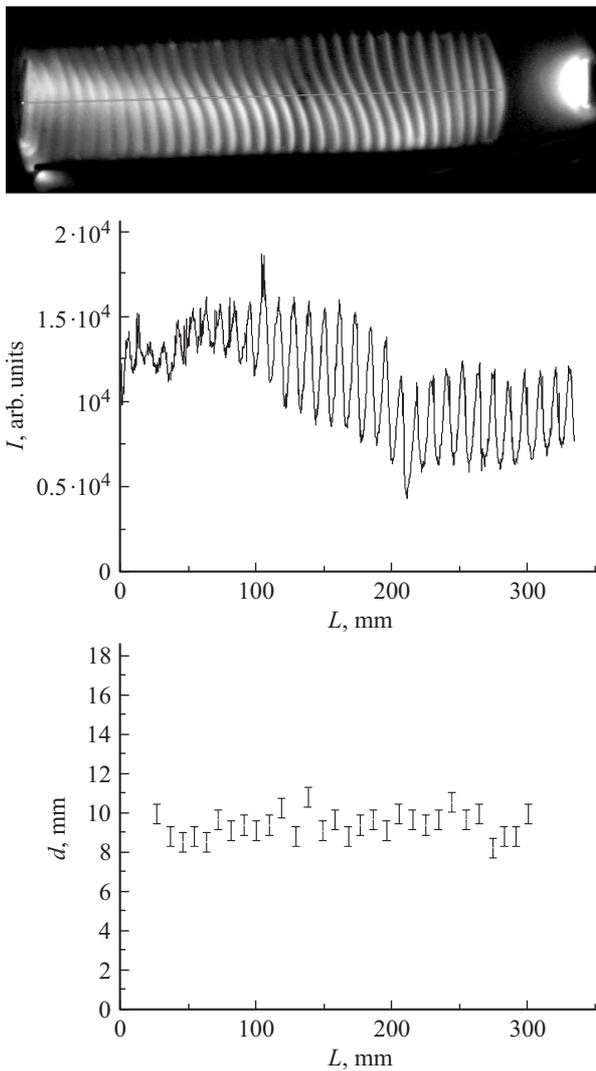
такой же, как и в первом случае. Заметим, что этой альтернативы лишен канал постоянного поперечного сечения, так как один однородный канал даст только одну точку зависимости  $d(S)$ .

Для улучшения условий визуализации страт тлеющий разряд рекомендуется осуществлять в высокомолекулярных газах, таких как углекислый газ, пары бензола, ацетона, спиртов и т. п. (см., например, [7,13]). Тогда страты становятся наиболее четкими, а их число увеличивается.

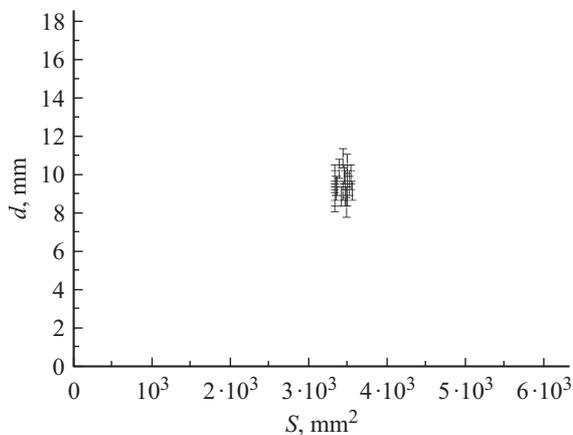
Для осуществления разряда в высокомолекулярном газе, как и в [8,12,14], в камеру перед откачкой помещалось 20 гранул силикагеля диаметром 3–5 mm (крупнопористый силикагель марки КСКГ, Россия), предварительно пропитанных этиловым спиртом. Количество спирта, который впитывает гранулы, всегда было одним и тем же ( $\sim 1$  ml), что обеспечивало повторяемость результатов. Гранулы раскладывались на дне камеры вдоль барьеров с внутренней стороны. Таким образом, тлеющий разряд постоянного тока зажигался в смеси газов „воздух–этиловый спирт“. При этом плазменный столб, как правило, практически полностью заполнял весь объем неоднородного канала и стратифицировался, а страты были хорошо различимы. Укажем, что все исследования проводились при следующих условиях: давление в вакуумной камере 0.3–10 Torr, напряжение 700–1200 V и ток 30–70 mA.

Над камерой на штативе на расстоянии 56 см закреплялась цифровая фотокамера марки „Видеоскан-285“, которая имела 12-битную матрицу и работала в режиме видеосъемки со скоростью 7.7 shots/s.

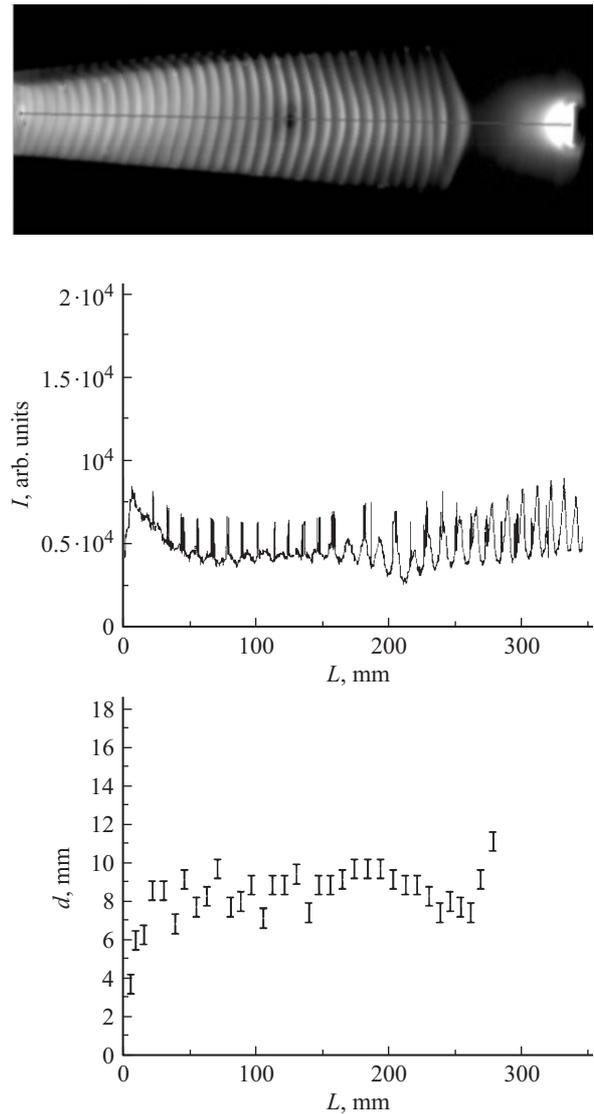
Получаемые в разрядах изображения денситометрировались по осевой линии разряда, а затем строились графики профилей интенсивности свечения разряда в зависимости от  $L$ . По этим графикам путем измерения расстояния между соседними максимумами интенсивности определялись зависимости  $d(L)$ , а по ним —  $d(S)$  для всех перечисленных каналов разряда. При этом



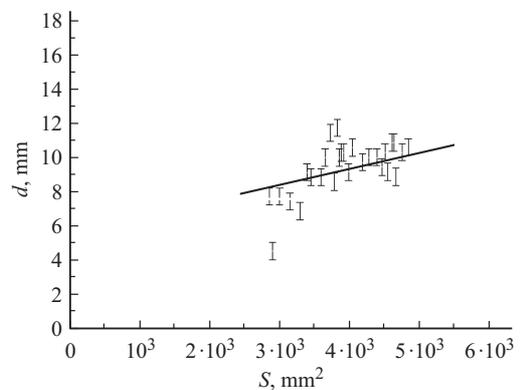
**Рис. 3.** Результаты измерений в однородном канале (сверху вниз): изображение страт с выделенной линией, вдоль которой производилось денситометрирование; профиль интенсивности свечения по длине канала вдоль линии денситометрирования, зависимость  $d(L)$  расстояния между соседними стратами от расстояния до анода.



**Рис. 4.** Зависимость  $d(S)$  расстояния между соседними стратами от площади поперечного сечения канала для однородного канала.



**Рис. 5.** Результаты измерений в линейно неоднородном канале (сверху вниз): изображение страт с выделенной линией, вдоль которой производилось денситометрирование; профиль интенсивности свечения по длине канала вдоль линии денситометрирования, зависимость  $d(L)$  расстояния между соседними стратами от расстояния до анода.

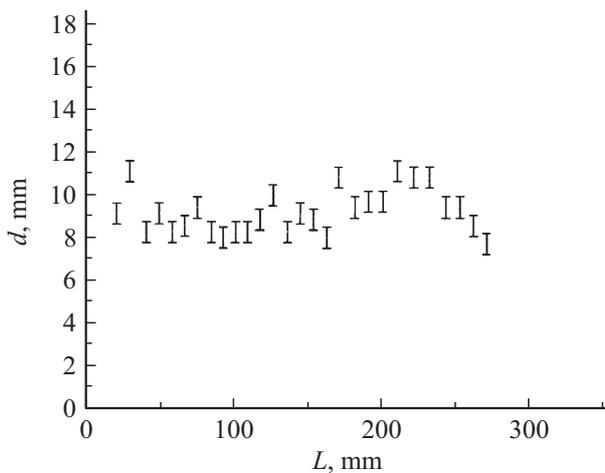
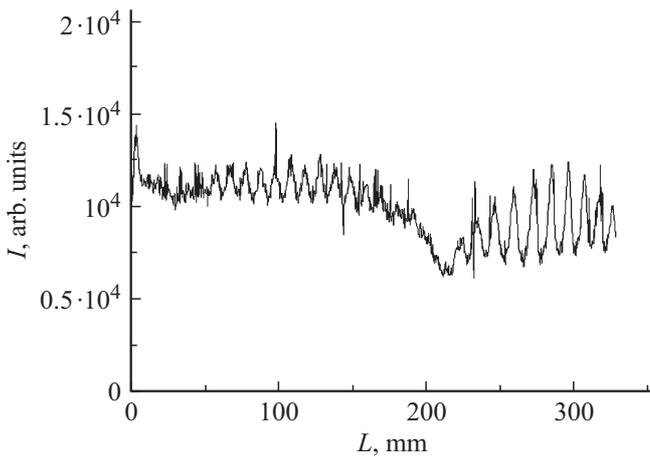
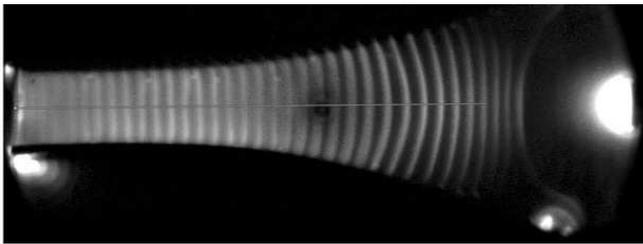


**Рис. 6.** Возрастающая зависимость  $d(S)$  расстояния между соседними стратами от площади поперечного сечения канала для линейно неоднородного канала.

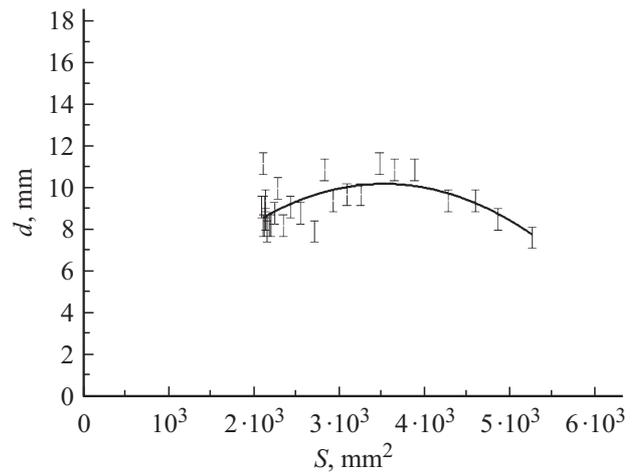
погрешности определения итоговой зависимости  $d(S)$  связаны в основном с дискретным (пиксельным) характером изображений, а также, отчасти, с искривлением страт.

## 2. Результаты экспериментов

Были получены до нескольких десятков изображений для каждой конфигурации каналов. Приведем характерные.



**Рис. 7.** Результаты измерений в квадратично-неоднородном канале (сверху вниз): изображение страт с выделенной линией, вдоль которой производилось денситометрирование; профиль интенсивности свечения по длине канала вдоль линии денситометрирования, зависимость  $d(L)$  расстояния между соседними стратами от расстояния до анода.



**Рис. 8.** Немонотонная зависимость  $d(S)$  расстояния между соседними стратами от площади поперечного сечения канала для квадратично-неоднородного канала.

Результаты измерений и обработки изображения страт в разряде постоянного поперечного сечения (в качестве примера — при ширине канала 70 mm) представлены на рис. 3. Как и ожидалось, для этого канала профиль интенсивности имеет вид почти периодической функции, а период практически не зависит от расстояния  $L$ . Для искомой зависимости  $d(S)$  данный результат не имеет большого значения, так как дает только одну ее точку. Это точка получилась размытой из-за указанных погрешностей (рис. 4). Оценка погрешностей — основная цель данных измерений в однородном канале.

Для углового канала, как уже говорилось, имело значение, какой электрод располагается вблизи узкой части канала, катод или анод. Приведем результаты измерений и обработки для случая, когда вблизи узкой части канала располагался анод (рис. 5 и 6), а угол раствора канала был равен  $8^\circ$ . Такая конфигурация аналогична дисковому разряду с полым катодом. Оказалось, что интенсивность свечения разряда имеет вблизи центра камеры глобальный минимум на фоне почти периодических колебаний (рис. 5, а). Однако этот минимум, связанный с неоднородностью в центре камеры в виде заглушенного технологического отверстия, не влияет на измерения. Получаемая при этом зависимость  $d(S)$  является слабо возрастающей (рис. 6).

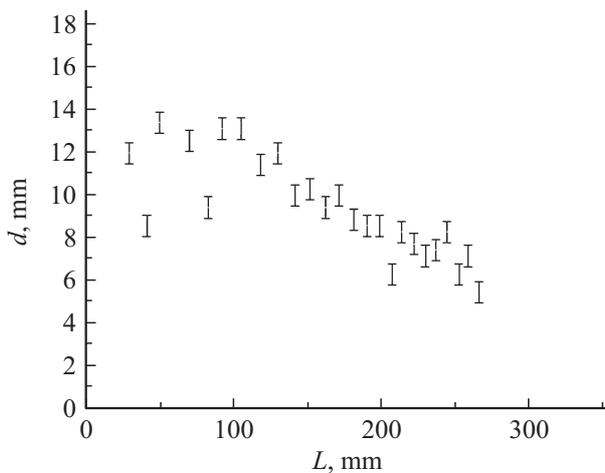
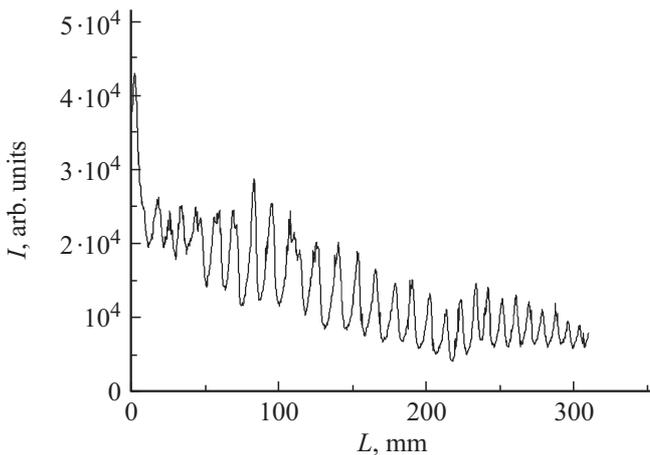
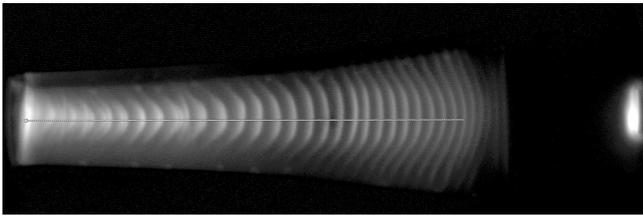
Для канала с параболическим профилем  $S = L^2/4$ , моделирующим сферическую камеру с полым катодом, результаты представлены на рис. 7 и 8. Получаемую для него зависимость  $d(S)$  можно охарактеризовать как немонотонную, на которой имеется локальный максимум, разделяющий участки возрастания и убывания (рис. 8).

Результаты измерений для канала с профилем, описываемым кубической параболой  $S = aL^3$ , где  $a = 1/4 \text{ mm}^{-1}$ , показаны на рис. 8–10. Данный канал моделирует гипотетическую 4-мерную сферическую камеру с

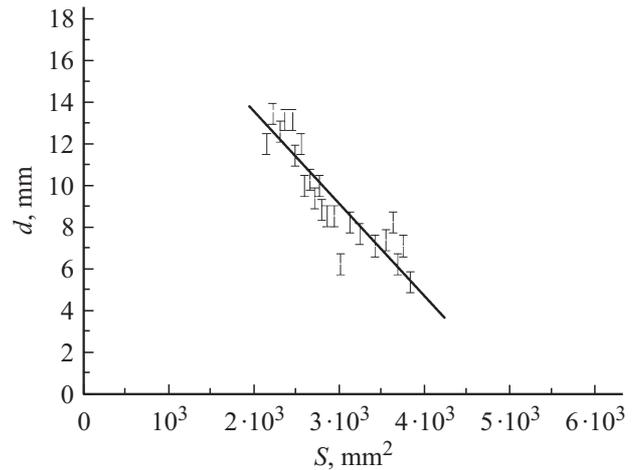
полым катодом. Для него зависимость  $d(S)$  имеет явно выраженный убывающий характер.

Характер найденных зависимостей  $d(S)$  при варьировании параметров разряда в указанных выше диапазонах остается неизменным.

Таким образом, в результате проведенных исследований было найдено, что характер зависимости расстояния между соседними стратами от площади поперечного сечения канала  $d(S)$  определяется формой профиля канала. При этом для профиля  $S \propto L^n$  характер зависимости  $d(S)$  изменяется с ростом  $n$  от возрастающей зависимости к убывающей.



**Рис. 9.** Результаты измерений в кубично-неоднородном канале (сверху вниз): изображение страт с выделенной линией, вдоль которой производилось денситометрирование; профиль интенсивности свечения по длине канала вдоль линии денситометрирования, зависимость  $d(L)$  расстояния между соседними стратами от расстояния до анода.



**Рис. 10.** Зависимость  $d(S)$  расстояния между соседними стратами от площади поперечного сечения канала для кубично-неоднородного канала.

## Заключение

В работе исследовалось распространение ионизационных волн в неоднородных каналах тлеющего разряда постоянного тока. Методом визуализации и обработки изображений измерялись зависимости  $d(S)$  расстояния между соседними стратами от площади поперечного сечения канала. Было обнаружено, что характер этой зависимости определяется геометрией канала. В частности найдено, что

- в каналах постоянного сечения расстояние между соседними стратами практически неизменно вдоль всей длины канала,
- в каналах с линейно растущей площадью поперечного сечения ( $S \propto L$ ), моделирующих дисковую камеру с полым катодом, указанная зависимость  $d(S)$  оказалась возрастающей,
- в каналах с квадратично растущей площадью поперечного сечения ( $S \propto L^2$ ), моделирующих сферическую камеру с полым катодом, зависимость  $d(S)$  немонотонная с локальным максимумом,
- и в каналах с кубично растущей площадью поперечного сечения ( $S \propto L^3$ ), моделирующих гипотетическую 4-мерную сферическую камеру с полым катодом, зависимость  $d(S)$  убывающая.

## Список литературы

- [1] *Недоспасов А.В.* // УФН. 1968. Т. 94. № 3. С. 439.
- [2] *Пекарек Л.* // УФН. 1968. Т. 94. № 3. С. 463.
- [3] *Goldstein E.* // Ann. Phys. 1882. Vol. 251. N 2. P. 227.
- [4] *Wehner F.* // Ann. Phys. 1910. Vol. 337. N 6. P. 49.
- [5] *Keys D.A., Heard J.F.* // Nature. 1930. Vol. 125. N 3165. P. 972.
- [6] *Lisovskiy V.A., Koval V.A., Artushenko E.P., Yegorenkov V.D.* // Eur. J. Phys. 2012. Vol. 33. N 6. P. 1537.
- [7] *Novopashin S.A., Radchenko V.V., Sakhapov S.Z.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Vol. 36. N 4. P. 998.

- [8] *Belonogov A.N., Dubinov A.E., Maksimov A.N., Selemir V.D.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. Vol. 41. N 1. P. 36.
- [9] *Нерушев О.А., Новопашин С.А., Радченко В.В., Сухинин Г.И.* // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. № 11. С. 679.
- [10] *Nerushev O.A., Novopashin S.A., Radchenko V.V., Sukhinin G.I.* // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 58. N 4. P. 4897.
- [11] *Scherbina A.I., Burdyukh S.V.* // Ukr. J. Phys. 2011. Vol. 56. N 12. P. 1318.
- [12] *Dubinov A.E., Maksimov A.N., Pylayev N.A., Selemir V.D.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. Vol. 41. N 3. P. 447.
- [13] *Нерушев О.А., Новопашин С.А., Радченко В.В., Сухинин Г.И.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. № 3. С. 67.
- [14] *Дубинов А.Е., Максимов А.Н., Селемир В.Д.* // Химия высоких энергий. 2013. Т. 47. № 1. С. 15.