

Э. М. РЕЙХРУДЕЛЬ и Г. В. СПИВАК

**КОНТРАГИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 9 VII 1940)

§ 1. Влияние продольного магнитного поля на положительный столб разряда до сих пор было мало изучено, повидимому, вследствие затруднений, которые возникали при интерпретации экспериментальных результатов<sup>(1)</sup>. Для теории плазмы в магнитном поле является существенным экспериментальное изучение стягивания плазмы разряда в параллельном оси трубки однородном магнитном поле<sup>(2)</sup>. Недавно Фабрикант и Рохлин<sup>(3)</sup> из оптических данных заключили о контракции плазмы в продольном магнитном поле. Однако, как указывают и сами авторы, их данные типичны для быстрых электронов, способных вызвать возбуждение газа. Кроме того эти наблюдения производились в пространстве между двумя короткими катушками при низком давлении, где условия на внешних краях катушек весьма существенны.

Полное суждение об эффектах, вызываемых магнитным полем, может быть получено комбинированием оптического исследования и надлежаще приспособленной зондовой методики. В предшествующих работах авторами была дана теория<sup>(4)</sup> зондовых токов с учетом действия магнитного поля и обсуждены эффекты, вызываемые им в плазме<sup>(5)</sup>. Зондовая характеристика регистрирует как изменение режима плазмы, так и процессы, протекающие вблизи зонда. В случае слабых магнитных полей вблизи зонда возникает циклоидальное движение электронов, которое ведет к уменьшению зондовых токов («*d*-эффект»). Этот эффект был нами строго подсчитан и, как показал Фаталиев<sup>(4)</sup>, расчет находится в хорошем согласии с экспериментом.

Целью настоящего исследования является изучение контракции плазмы в сильных магнитных полях как в условиях квазиоднородного магнитного поля (короткие катушки), так и для того случая, когда весь газовый разряд помещен в заведомо однородное аксиальное магнитное поле.

§ 2. Изучение проводилось параллельно двумя методами: методом плоского зонда и с помощью разделенного на концентрические кольца анода<sup>(6)</sup>.

Применение двух методов для исследования контракции вызвано тем, что в сильных магнитных полях характеристики плоского зонда, даже ориентированного перпендикулярно к вектору магнитного поля, показывают особенности, типичные для ориентации зонда, плоскость коего параллельна магнитному полю. Кроме того измерения при помощи разделенного анода могут быть проведены много быстрее, чем методом зондов. Измерения велись в парах ртути и в аргоне. Сила тока и давление варьировались.

Все трубки помимо зондов содержали анод, разделенный на 4—5 колец. Центральный диск имел около 10 мм в диаметре, ширина колец была около 5 мм. Отдельные части анода изолировались друг от друга слюдяной прокладкой или воздушным зазором. Плоские зонды в трубке могли перемещаться по радиусу трубки и вращаться вокруг своей оси. Последнее давало возможность устанавливать их перпендикулярно или параллельно магнитному полю. Одна сторона зонда была покрыта слюдой.

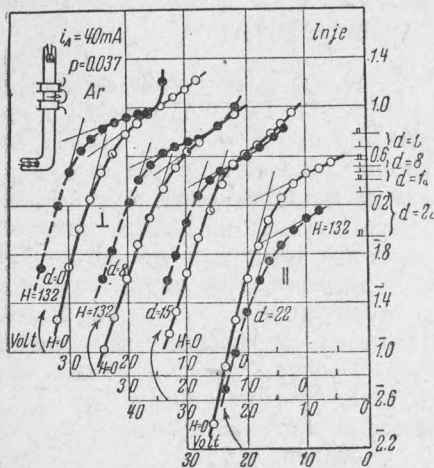
Магнитное поле создавалось либо длинным соленоидом, в который помещалась часть трубки, занятая плазмой, а в некоторых случаях—вся трубка целиком; либо двумя короткими магнитными линзами с одинаковым числом витков, которые включались последовательно. При измерениях распределения тока на секциях анода линзы устанавливались симметрично относительно анода на расстоянии 2—3 см друг от друга. При зондовых измерениях линзы располагались симметрично относительно зонда.

§ 3. Показания плоского зонда зависят от угла, образуемого направлением магнитного поля с плоскостью зонда (<sup>4</sup>). Если плоскость зонда ориентирована перпендикулярно к магнитному полю, то в случае слабых магнитных полей зонд регистрирует лишь изменения в разряде. При повороте зонда на 90° на эффекты в плазме накладывается еще эффект циклоидального движения электронов вблизи зонда. В случае сильных магнитных полей среднее расстояние, которое электрон пролетает без соударений в направлении, образующем угол, отличный от нуля, с вектором магнитного поля, есть уже функция магнитного поля. Свободное движение электронов вблизи зонда сменяется диффузионным, причем коэффициент диффузии заметно уменьшается с ростом магнитного поля (<sup>7</sup>). Если такое диффузионное движение определяет ток на зонд, то электрическое поле зонда компенсируется объемным зарядом вблизи него на расстоянии порядка нескольких свободных пробегов, измеренных по нормали к зонду. Существенно, что в сильных магнитных полях при перпендикулярной ориентации зонд регистрирует и эффект вблизи него. Этот эффект виден на зондовых характеристиках (<sup>8</sup>), полученных для разных магнитных полей в одном и том же месте плазмы. Наличие и оценка этого эффекта могут быть получены из наблюдения ионных частей зондовой характеристики, ибо в силу квазинейтральности плазмы концентрация ионов должна изменяться в той же пропорции, что и концентрация электронов. Причины и характерные особенности искажений зондовых характеристик обсуждаются нами детально в указанной выше статье (<sup>8</sup>). Ток при потенциале пространства определялся из пересечения двух прямых (фиг. 4).

При наложении магнитного поля мы поддерживали разрядный ток постоянным. Один случай контракции плазмы для разряда в аргоне показан на фиг. 4, где приводятся 4 пары электронных частей зондовых характеристик. Три пары получены при помощи плоского зонда, установленного перпендикулярно к оси трубки на различных расстояниях от оси трубки ( $d=0; 8; 15$  мм). Четвертая пара получена при помощи зонда, прилегающего к стенке ( $d=22$  мм). Потенциал пространства и плотность электронного тока находим в точке пересечения двух прямых, проведенных с тех мест, где эффектами магнитного поля вблизи зонда можно пренебречь. При такой обработке характеристик зонды показывают увеличение концентрации электронов в магнитном поле. Если же определять концентрацию электронов по первой точке отхода от прямолинейной части зондовой характеристики, то игнорируется уменьшение тока на зонд вблизи потенциала пространства, вызванное местным эффектом магнитного поля.

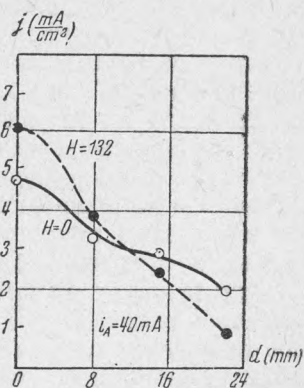
Мы видим, что имеет место рост концентрации электронов в поле двух магнитных линз ( $i_a=40\text{ мА}$ ,  $p=0,037\text{ мм}$ , трубка с накаливаемым катодом). Справа на фиг. 1 по оси ординат нанесены линии, которые показывают, примерно, значения логарифма плотностей электронных токов в отсутствии магнитного поля (значок  $\perp$ ) и при наложении поля (значок  $\parallel$ ) для соответствующих расстояний зонда от оси. В наших экспериментах зондовые характеристики не показывают заметного изменения средней энергии электронов при смещении зонда от оси к стенкам трубки, поэтому плотность токов на зонд может служить мерой относительной концентрации электронов в данной точке плазмы. Данные, полученные из указанных измерений, представлены на фиг. 2. По оси ординат—абсолютные значения плотности тока, по абсциссе—расстояние от оси разряда.

Прирост плотности тока в магнитном поле ( $H=132\text{ гаусса}$ ) на оси разряда



Фиг. 1. Характеристики плоского зонда на различных расстояниях от оси трубки

—○—  $H=0$   
 ---●---  $H=132\text{ гаусс}$



Фиг. 2. Распределение концентрации электронов по радиусу

—○—  $H=0$   
 ---●---  $H=132\text{ гаусс}$

равен примерно 27%, на расстоянии 8 мм от оси около 43%, на расстоянии 15 мм от оси плотность тока уже падает примерно на 14%. Резкое падение этой величины происходит на самой стенке (около 50%). Таким образом концентрации растут вблизи оси и падают вблизи стенок (контракция плазмы в магнитном поле).

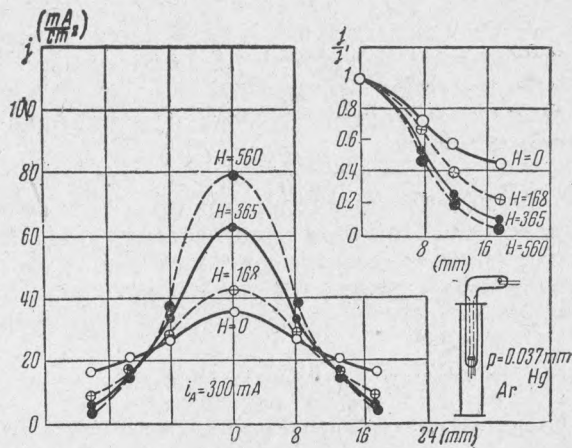
§ 4. О том, что плазма контрагируется в сильных магнитных полях, можно также получить непосредственные данные из измерения направленного тока на разделенный на кольца анод. Во всех наших измерениях анод занимал все поперечное сечение разрядной трубки. В достаточно сильных магнитных полях следует ожидать стремления поперечного градиента потенциала к нулю<sup>(2)</sup>. Тогда эквипотенциальные поверхности превращаются в плоскости, параллельные плоскости анода. При постоянстве же продольного градиента потенциала по сечению разрядной трубки направленный ток пропорционален электронным концентрациям в плазме.

Измерения хода продольного градиента потенциала (при наложении  $H$ ) по радиусу трубки показали, что в пределах плазмы градиент меняется мало. При этом изменение градиента потенциала на оси и на некотором расстоянии от нее имеет параллельный ход. Если поместить плазму в длинный соленоид и измерить распределение плотности тока по анодным кольцам для разрядного тока в 300 мА, то получаются результаты (аргон,  $p=0,037\text{ мм}$ ), показанные на фиг. 3. Сплошная кривая показывает слу-

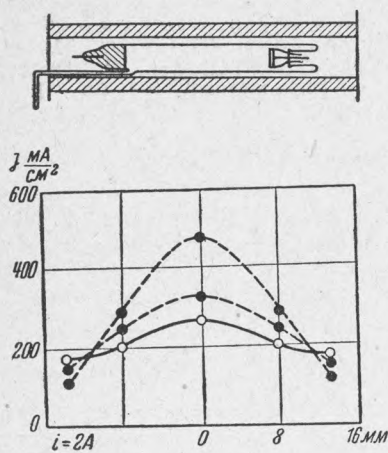


чай, когда магнитное поле отсутствует ( $H=0$ ); пунктирные линии соответствуют случаю различных магнитных полей ( $H=168; 365; 560$  гаусс). В правой части фиг. 3 показана схема расположения опыта и ход относительной плотности тока в различных магнитных полях. То, что точки для относительной плотности с ростом  $H$  не укладываются на одну кривую, а на кривые, все более круто спадающие, говорит отчетливо о контракции плазмы и отступлении от бесселевского распределения. При этом даже слабые магнитные поля вызывают уже значительные эффекты в плазме.

Отсутствие заметного эффекта в опытах Фаталиева<sup>(9)</sup> объясняется указанным выше выбором экспериментальных условий, типичных для случая слабых магнитных эффектов в плазме. Нами были проведены опыты и при более высоких давлениях ( $p=1$  мм) и больших  $H$ , когда свободный пробег электронов заведомо не превышал 2—3 мм. Характер контракции плазмы был аналогичен ходу этого явления при низком давлении. Следует отметить, что в этих измерениях значительная область плазмы, во много раз превышающая



Фиг. 3. Распределение плотности тока по радиусу.



Фиг. 4. Распределение плотности тока по радиусу  $r$  в однородном магнитном поле

- $H=0$
- $H=84$  гаусс
- ▨—  $H=336$  гаусс

контракция плазмы при помощи зондов из-за искажения верхних частей характеристик не всегда может быть замечена<sup>(10)</sup>. С другой стороны электроны описывают спиральные пути, охватывающие сходящиеся магнитные силовые линии, что с самого начала задает размеры действующему сечению плазмы.

величину свободного пробега электронов, была охвачена однородным магнитным полем. Эффект контракции как в этом случае, так и при пользовании двумя короткими линзами, был достаточно отчетливо наблюдаем. Светящийся положительный столб в магнитном поле контрагировался в узкую нить по оси трубки. Отметим, что показания зондов и измерения по анодным кольцам находятся в хорошем соответствии друг с другом.

§ 5. Как показал Тонкс<sup>(2)</sup>, уменьшение коэффициента диффузии электронов к стенкам (в продольном магнитном поле) в точности компенсируется уменьшением электрического поперечного поля, тормозящего движение электронов. Теория требует, таким образом, чтобы в однородном магнитном поле распределение концентраций оставалось бесселевским. Лэнгмюр<sup>(10)</sup> считает, что концентрация у оси увеличивается из-за радиальной компоненты магнитного поля. Повидимому, отчетливая

Для исключения влияния концов катушки на эффект контракции были поставлены дополнительные опыты. Длинный соленоид полностью вмещал в себе разрядную трубку, причем вся трубка помещалась в заведомо однородное магнитное поле. Однако и в этом случае отчетливо наблюдалась контракция. Эти измерения велись в парах ртути и в аргоне при давлении  $p=0,3$  мм. Результаты для ртути (жидкий катод) при разрядном токе в 2А показаны на фиг. 4, где вверху дано расположение опыта, а внизу распределение плотностей по анодным кольцам при  $H=84$  и 336 гаусс.

Аналогичные результаты были получены и в аргоне, где происходит разряд между двумя плоскими электродами в широком интервале разрядных токов.

Так как диаметр соленоида был заметно больше диаметра трубки, то последняя могла перемещаться по радиусу соленоида параллельно самой себе. При этом распределение токов по кольцам не менялось. Токи были симметричны относительно оси трубки, а не оси магнитного поля. Описанные в этом параграфе опыты показывают, что контракция может также вызываться и однородным магнитным полем.

Кафедра физики электронных  
и ионных процессов  
Московский государственный университет

Поступило  
1 VII 1940

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> A. Engel u. M. Steenbeck, Elektrische Gasentladungen, B. 2 (1934).  
<sup>2</sup> L. Tonks, Phys. Rev., **56**, 360 (1939). <sup>3</sup> W. Fabrikant u. G. Rochlin, C. R. Ac. Sci. USSR, XIX, 393 (1938); XX, 437 (1938); Ж. теор. и эксп. физики, **9**, 804 (1939). <sup>4</sup> G. Spiwak u. E. Reichrudel, Sow. Phys., **9**, 655 (1936); Tech. Phys. USSR, **5**, 715 (1938); Ch. Fataliev, C. R. Ac. Sci USSR, XXIII, 891 (1939). <sup>5</sup> G. Spiwak u. E. Reichrudel, Изв. Ак. Наук, сер. физ., № 4 (1938). <sup>6</sup> F. Keller, ZS. f. Phys. **97**, 8 (1935); G. Jarnold u. S. Holmes, Phil. Mag., **22**, 988 (1936); M. Druyvesteyn, ZS. f. Phys., **81**, 571 (1933). <sup>7</sup> A. Engel u. M. Steenbeck, Elektrische Gasentladungen, B. I (1932). <sup>8</sup> E. Reichrudel u. G. Spiwak, Journ. of Phys., (1940). <sup>9</sup> Ch. Fataliev, Ж. теор. и эксп. физики, **9**, 813 (1939). <sup>10</sup> J. Langmuir a. H. Mott-Smith, Gen. El. Rev., **27**, 810 (1924).