

04;12

Экспериментальные исследования влияния продольного магнитного поля на катодные части тлеющего разряда в гелии

© И.М. Уланов, А.Ю. Литвинцев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: litvinsev@itp.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 30 июня 2003 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования влияния продольного магнитного поля на электрические и оптические свойства отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства тлеющего разряда в гелии при токе разряда $J_d = 11$ mA и давлении в разрядной камере 100–150 Pa. Описана созданная экспериментальная установка. Обнаружено, что в области отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства нет продольного электрического поля как в присутствии магнитного поля, так и без него. Показано, что магнитное поле уменьшает напряжение тлеющего разряда, полная светимость разряда и интенсивность отдельных спектральных линий при этом увеличиваются в 10–12 раз. Сделана попытка объяснить полученные экспериментальные результаты.

Введение

Несмотря на то, что изучению тлеющего разряда посвящено очень большое количество работ, до сих пор нет полной ясности процессов происходящих в катодных областях разряда, которые находятся между катодом и положительным столбом и включают в себя слой катодного падения потенциала, отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства [1–3].

Главная особенность продольной структуры тлеющего разряда состоит в том, что в области отрицательного свечения и темного фарадеева пространства спектр энергии электронов имеет нелокальный характер, как показано в [4], в разряде гелия зарегистрированы три группы электронов со средними энергиями 2, 22.5 и 150 eV. В этом случае простые зондовые измерения могут привести к ошибочным результатам.

И самое главное в этих областях отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства практически нет электрического поля (или оно чрезвычайно мало). Поэтому области отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства наиболее чувствительны к внешнему воздействию на тлеющий разряд [3]. Мы имеем плазму, свободную от электрического поля, в этом случае влияние на нее магнитного поля будет осуществляться в чистом виде.

Имеется достаточно большое количество экспериментальных работ, посвященных исследованию влияния продольного магнитного поля на тлеющий разряд. В большинстве из них исследуется положительный столб разряда в продольном магнитном поле [5–7]. В этих работах не рассматривались оптические характеристики положительного столба тлеющего разряда.

Наиболее близкие исследования по отношению к нашим экспериментам приведены в работах [8,9]. Однако в работе [8] авторы не указывают, в каком месте по продольной длине разряда проводились измерения, а в

работе [9], как утверждает автор, оптические измерения проводились в районе положительного столба разряда.

Основная цель предлагаемой работы заключалась в исследовании влияния продольного магнитного поля на оптические характеристики (полное излучение и излучение отдельных спектральных линий) тлеющего разряда в области отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства.

Экспериментальная установка и методика измерений

Для проведения экспериментов была создана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1. Разрядная кварцевая трубка 1 имела внутренний диаметр 45 mm, расстояние между анодом и катодом составляло 56 cm. Катод 2 был из молибдена ϕ 42 mm, анод — из нержавеющей стали ϕ 42 mm. Для поддержания стабильного давления разряда и удаления примесей, поступающих в разряд из кварцевой трубы разрядной камеры 3 и электродов, система непрерывно откачивалась форвакуумным насосом 6 с азотной ловушкой. Исследуемый газ подавался из баллона 5 через игольчатый вентиль. Давление в разрядной камере измерялось с помощью деформационного манометра ВД-1.

Магнитная система 4 состояла из двух катушек и позволяла создавать продольное магнитное поле с индукцией до 0.1 Т. Для наблюдения за разрядом и проведения оптических измерений катушки имели просвет шириной 6 cm. Магнитное поле в просвете между катушками имело градиент не более 5% от величины напряженности в центре каждой отдельной катушки. Магнитная система была проградуирована магнитометром РШ1-10. Во время экспериментов источником питания ИП-3, с регулируемым постоянным током, индукция магнитного поля поддерживалась с точностью 1%.

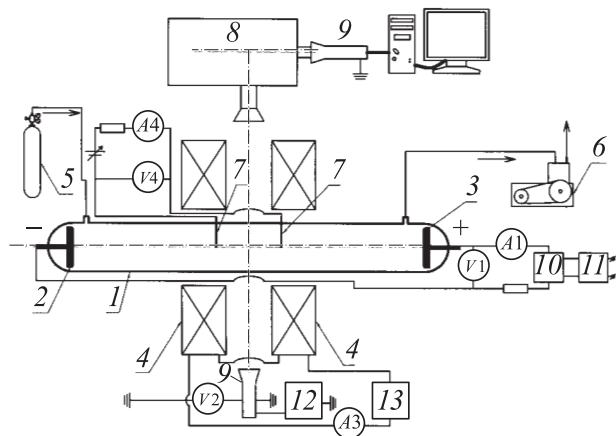


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (8 — монохроматор, 9 — ФЭУ, 10 — ИП-1, 11 — РНО, 12 — ИП-2, 13 — ИП-3).

Питание тлеющего разряда осуществлялось источником постоянного тока ИП-1 с регулируемым напряжением до 5 kV. Напряжение и ток разряда измерялись электростатическим вольтметром (V1), амперметром (A1) с точностью 1 и 2%. Общее излучение разряда измерялось с помощью (ФЭУ-2), проградуированного по образцовой температурной лампе ТРУ 1100-2350. Спектральные измерения проводились монохроматором МДР-23 с подачей сигнала на АЦП соединенным с компьютером.

Для проведения зондовых измерений разрядной камере были установлены два зонда 7, которые представляли собой серебряные проволочки \varnothing 0.6 см, изолированные тонким кварцевым капилляром. Рабочая поверхность зонда была 2 мм². Зонды располагались по центру разрядной камеры. Расстояние между зондами было 8 см, поэтому температура и плотность электронов усреднялась на этом расстоянии.

Применялся только двухзондовый метод измерения температуры и плотности электронов как наиболее приемлемый для измерений в магнитном поле.

Результаты измерений

Для того чтобы правильно оценить результаты визуального наблюдения влияния магнитного поля на тлеющий разряд и понять предлагаемые ниже фотографии разряда, на рис. 2 показана схема расположения катушек магнитного поля по отношению к аноду и катоду.

Без магнитного поля в разрядной трубке четко наблюдались все характерные части тлеющего разряда. Положительный столб при исследованных давлениях и токах разряда всегда был стратифицирован и при давлении \sim 150 Па его длина составляла примерно 20 см. При увеличении давления длина положительного столба увеличивалась и он мог заполнять почти всю длину разрядной трубки.

При наложении даже слабого магнитного поля (\sim 0.005 Т) при давлении в разрядной трубке меньше 100÷130 Па положительный столб разряда исчезал и всю длину трубки заполняли катодные части разряда: катодное свечение, отрицательное свечение и темное фарадеево пространство. Разряд при этом начинал контрагироваться, и диаметр светящейся части уменьшался с увеличением напряженности магнитного поля. Это хорошо видно из рис. 3, где представлены фотографии разряда без магнитного поля, и с магнитным полем индукцией 0.05 Т при давлении в разрядной трубке 100 Па и токе разряда 11 мА. Темные полосы на фотографии представляют собой стягивающие шпильки установки, и они затеняют разряд.

При исследовании электрических характеристик разряда измерялись полное напряжение на разряде U , напряжение между зондом и катодом и напряженность электрического поля между зондами. В пределах точности измерений, когда зонды находятся в области отрица-

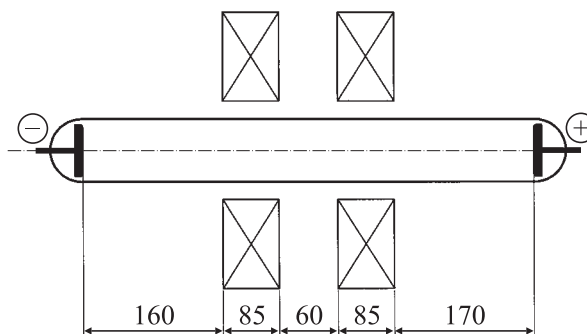


Рис. 2. Схема расположения катушек магнитного поля.

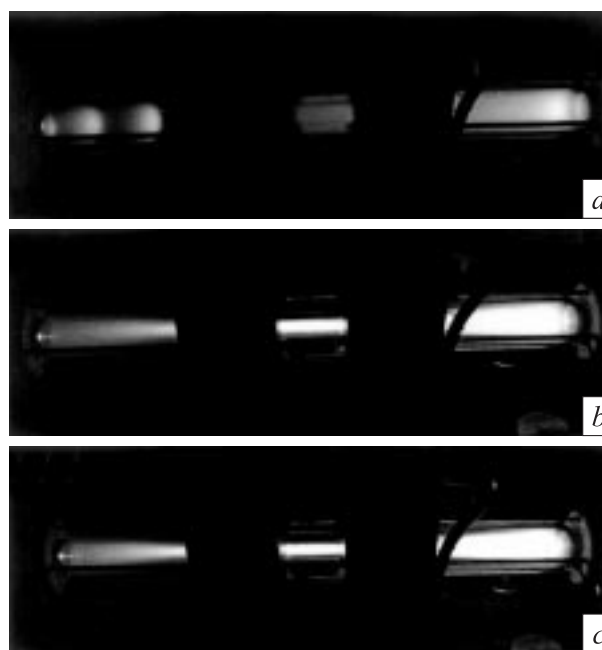


Рис. 3. Фотографии разряда без магнитного поля (a), при магнитном поле 0.025 Т (b), при магнитном поле 0.05 Т (c).

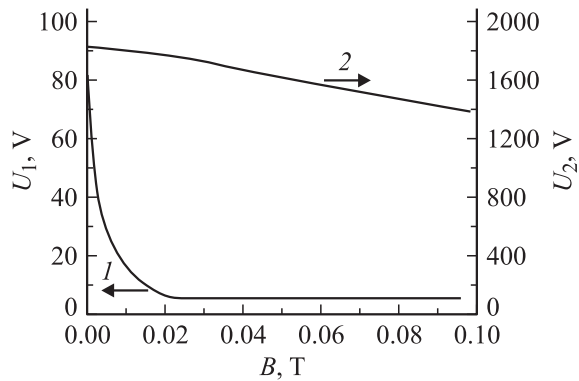


Рис. 4. Зависимость полного напряжения на разряде U_2 (1) и напряжения между зондом и анодом U_1 (2) от величины магнитного поля ($J_d = 11$ мА, $P = 130$ Па).

тельного свечения и темного фарадеевского пространства, электрического поля между зондами не обнаружено или оно по крайней мере меньше, чем 0.01 В/см.

Результаты измерений полного напряжения на разряде и напряжение между зондом и анодом представлены на рис. 4. Видно, что с увеличением магнитного поля уменьшается полное напряжение на разряде и происходит резкое падение напряжения между зондом и анодом до некоторой постоянной величины. В нашем случае для тока разряда 11 мА и давления в разрядной камере 130 Па эта величина составила 5.4 В. По-видимому, это есть анодное падение, а первоначальное резкое уменьшение напряжения между зондом и анодом можно объяснить потерей разрядом с увеличением магнитного поля, положительного столба, в котором существует электрическое поле.

Интересно отметить, что если давление в разрядной камере повысить до 200 – 250 Па при том же токе разряда 11 мА, то магнитное поле не действует на электрические характеристики разряда. Полное напряжение на разряде и напряжение между зондом и анодом остаются постоянными, разряд не контрагируется, длина положительного столба не меняется.

Переходя к результатам зондовых измерений, необходимо особо отметить, что в наших измерениях использовался только двойной зонд, так как применение одиночного зонда при измерении в магнитном поле вызывает большие сложности при интерпретации полученных результатов.

Двойной зонд может применяться в достаточно сильных магнитных полях [10,11]. Это связано с тем, что для двойного зонда определяющим является ионный ток насыщения.

На рис. 5 представлены характерные зондовые характеристики для двойного зонда при токе разряда 11 мА и давлении в разрядной камере 130 Па. Зондовые характеристики всегда снимались таким образом, чтобы ближайший к аноду зонд не находился в положительном столбе разряда.

Температура электронов рассчитывалась по формуле [10]

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{J_1^i \cdot J_2^i}{J_1^i + J_2^i} \left(\frac{dJ}{dU} \right)^{-1},$$

где J_1^i — ионный ток насыщения первого зонда, J_2^i — ионный ток насыщения второго зонда, $(dJ/dU)^{-1}$ — производная полного тока на зонд.

Результаты измерения температуры электронов в зависимости от величины напряженности магнитного поля приведены на рис. 6. Так как зондовые характеристики, представленные на рис. 5 имеют симметричный вид до определенной величины магнитного поля, то с большой степенью вероятности можно предположить, что температура электронов в промежутке между зондами постоянна. Это подтверждается также визуальными на-

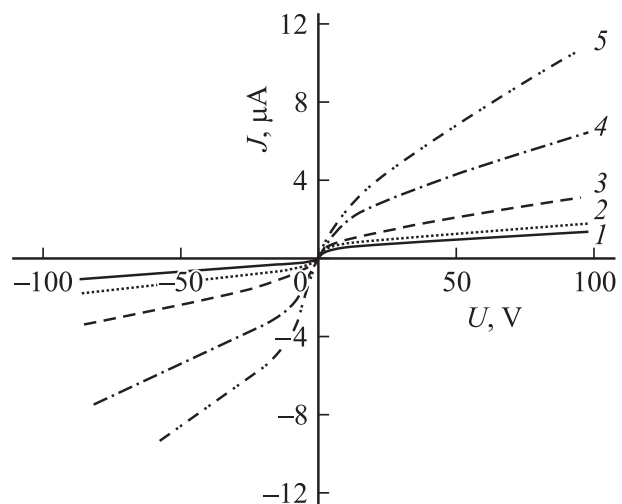


Рис. 5. Зондовые характеристики разряда в He, $J_d = 11$ мА, $P = 130$ Па. 1 — без магнитного поля, 2 — магнитное поле 0.005 Т, 3 — 0.01 Т, 4 — 0.025 Т, 5 — 0.05 Т.

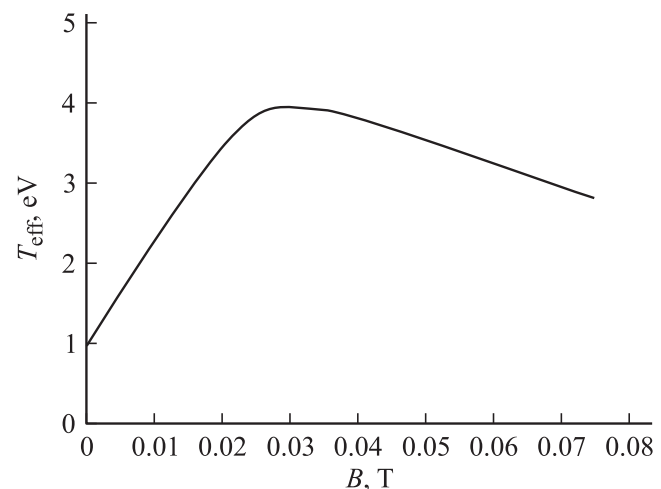


Рис. 6. Температура электронов T_{eff} в зависимости от величины магнитного поля ($J_d = 11$ мА, $P = 130$ Па).

блюдениями: обжаты магнитным полем столб разряда равномерно светится во всем промежутке между зондами. Зондовые характеристики при магнитном поле больше 0.05 Т становятся несимметричными ввиду того, что температура электронов в районе каждого зонда различна. В этом случае измеряется средняя температура электронов в промежутке между зондами. Визуально наблюдается различная светимость столба разряда в районе каждого зонда. Интересно отметить, что в работах [5–7,9], когда исследовалось влияние магнитного поля на положительный столб разряда, температура электронов уменьшалась. В работе [9], например, при той же напряженности магнитного поля температура электронов падала более чем в два раза. Сравнение еще раз показывает, насколько тлеющий разряд неоднороден по длине.

Перейдем к рассмотрению результатов оптических измерений. На рис. 7 представлена зависимость относительной интенсивности свечения разряда от величины индукции магнитного поля, где $J(0)$ — интенсивность свечения разряда без магнитного поля, $J(M)$ — то же при различных значениях напряженности магнитного поля.

Спектральный диапазон 340–1200 нм был выбран для того, чтобы исключить длинноволновое излучение нагретых частей установки и приборов. Для этого был установлен водяной фильтр. Спектральный диапазон для видимого излучения (340–620 нм) выбирался путем установки стеклянного фильтра СЗС23 на водяной фильтр.

Как видно из рис. 7, наблюдается сильное увеличение общей светимости разряда с увеличением индукции магнитного поля. Кривые имеют максимум при магнитном поле 0.02–0.05 Т. Такой же максимум наблюдается и в температуре электронов на рис. 5.

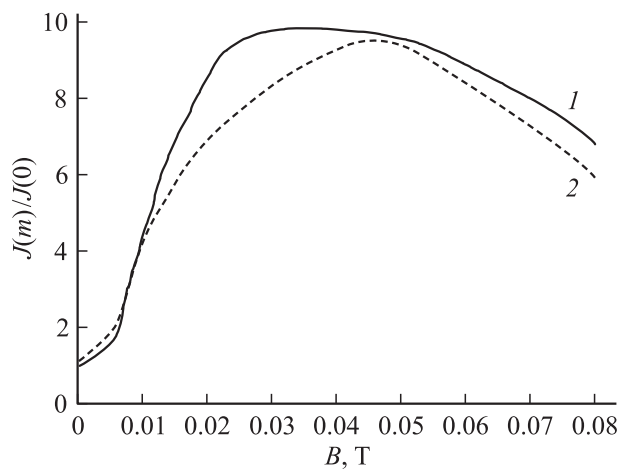


Рис. 7. Зависимость относительной интенсивности свечения разряда от напряженности магнитного поля для двух спектральных диапазонов: 1 — 320–1200, 2 — 340–620 нм.

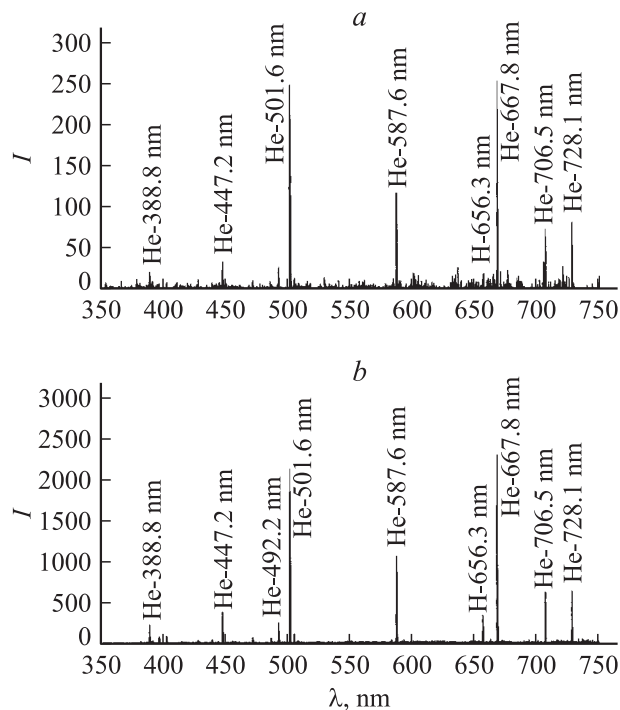


Рис. 8. Спектр He, $J_d = 11$ мА, $P = 100$ Па. *a* — без магнитного поля, *b* — магнитное поле 0.025 Т. I — относительная интенсивность.

Для выяснения вопроса, как влияет магнитное поле на возбуждение отдельных спектральных линий, были исследованы спектры разряда в диапазоне длин волн 350–750 нм. На рис. 8 представлен спектр He без магнитного поля и с магнитным полем 0.025 Т. Как видно, с увеличением напряженности магнитного поля интенсивность спектральных линий увеличивается. Так же как и общая интенсивность свечения разряда (рис. 7), интенсивность спектральных линий имеет максимум при магнитном поле 0.02–0.05 Т.

Интенсивность спектральных линий He в продольном магнитном поле увеличивается в зависимости от длины волны по-разному, в коротковолновой области спектра — в 10–12 раз, а в длинноволновой — в 8–10 раз.

Появление в спектре He линий водорода объясняется выделением водорода из катода. Эти примесные линии водорода хорошо видны на рис. 9. Учитывая большую разницу в потенциалах возбуждения водорода и гелия, даже малые примеси водорода вызовут появление водородных линий. На рис. 9 представлен спектр гелия при давлении в разрядной камере 180 Па. В этом случае в районе наблюдения за разрядом между магнитными катушками находился положительный столб разряда. Как видно из рисунка, возбуждаются в основном только примесные линии водорода. При этом действие магнитного поля приводит к уменьшению интенсивности линий. Этот результат соответствует литературным данным, когда исследовался положительный столб разряда [9].

Интересный результат был получен при исследовании спектра He в разряде на переменном токе. К сожалению, на переменном токе были проведены только единичные эксперименты. Ток в разряде и давление в разрядной камере поддерживались такими же, как и для постоянного тока.

На рис. 10 представлен спектр разряда в He при переменном токе разряда 11 мА и магнитном поле 0.025 и 0.05 Т. Визуальные наблюдения разряда на переменном токе показывают, что со стороны обоих электродов имеется катодное свечение, которое переходит в отрицательное свечение. В середине разрядной трубки наблюдается только зона отрицательного свечения. Положительного столба при давлении 100 Па нет. При включении продольного магнитного поля разряд начинает контрагироваться от обоих электродов. С увеличением напряженности магнитного поля диаметр светящегося шнура разряда уменьшается. При увеличении давления в середине трубки появляется стратифицированный положительный столб. При увеличении давления больше 150 Па длина положительного столба увеличивается и при давлении ~ 300 Па он заполняет $\sim 80\%$ длины разрядной трубки.

Необычно также и поведение спектра разряда. Как хорошо видно из рис. 10, с увеличением напряженности магнитного поля часть спектральных линий перестает возбуждаться, другие линии, наоборот, возбуждаются и т. д.

С некоторой долей предосторожности можно предположить, что продольное магнитное поле в разряде

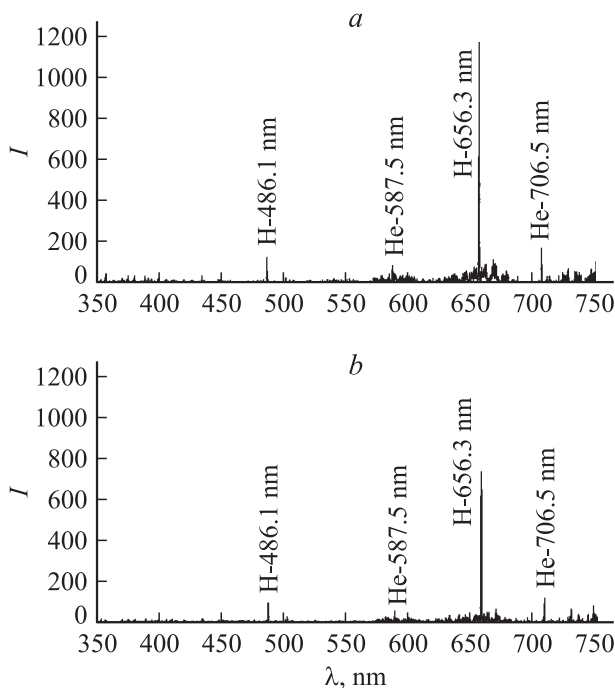


Рис. 9. Спектр He, $J_d = 11$ мА, $P = 180$ Па. a, b — то же, что и на рис. 8.

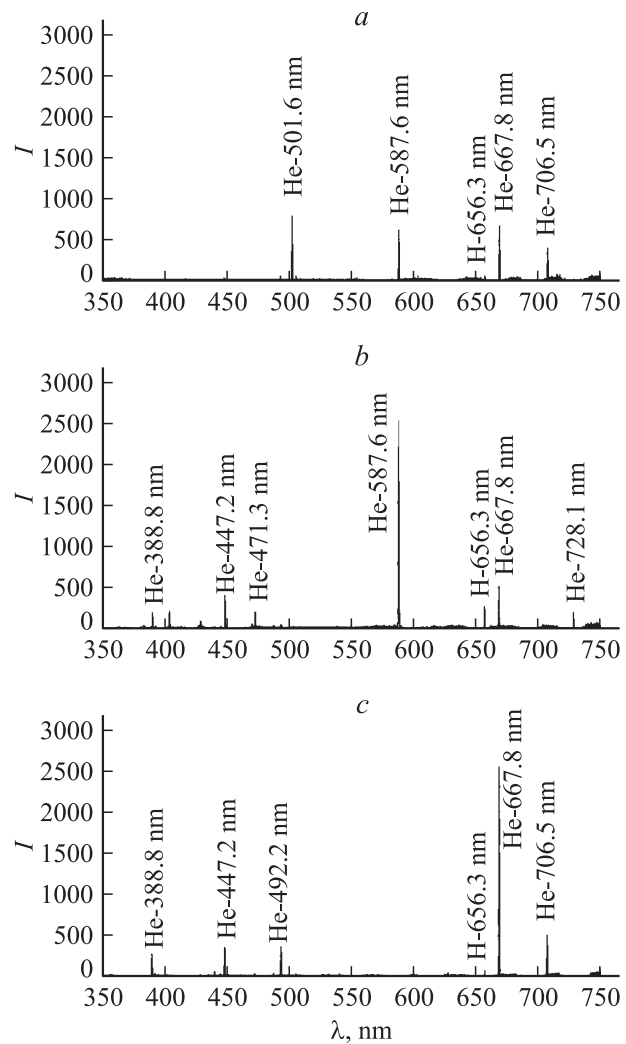


Рис. 10. Спектр He, $J_d = 11$ мА, $P = 100$ Па (переменный ток 50 Hz). a — без магнитного поля, b — магнитное поле 0.025 Т, c — 0.05 Т.

переменного тока при определенном давлении в разрядной камере оказывает достаточно сильное влияние на температуру и функцию распределения электронов по энергиям.

Обсуждение результатов экспериментов

Как уже говорилось выше, в [3–7,9] исследовалось влияние продольного магнитного поля на положительный столб разряда. В наших экспериментах при токе разряда 11 мА, индукции магнитного поля до 0.05 Т и давлении гелия в разрядной камере > 180 Па влияние магнитного поля на положительный столб разряда очень слабое. Мы не обнаружили уменьшения пристеночного тока под действием магнитного поля. Спектр разряда, показанный на рис. 9, также слабо меняется под действием магнитного поля. Напряжение, измеренное между

зондом и анодом, а следовательно, и напряженность электрического поля на этом участке положительного столба при давлении 200 Па уменьшились под действием магнитного поля на 5%. В работе [8] также показано, что при давлении в разрядной камере больше 150 Па магнитное поле величиной до 0.08 Т не оказывает заметного влияния на диффузию заряженных частиц.

Главным отличием наших экспериментов от описанных в [3–7,9] является то, что мы исследовали области разряда отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства.

Анализируя полученные экспериментальные результаты, мы считаем, что основной причиной влияния продольного магнитного поля на разряд является уменьшение диффузии заряженных частиц на стенку под действием магнитного поля. Это приводит к изменению электрического баланса носителей заряда и, как следствие, к изменению электрических и оптических характеристик разряда.

Основываясь на результатах работы [8], предполагается, что диффузия ионов и электронов поперек магнитного поля выражается коэффициентом амбиполярной диффузии D_a

$$D_a = \frac{D_a(0)}{1 + \omega_e \omega_p \tau_e \tau_p},$$

где $\omega = eB/mc$ — ларморовская частота, τ — среднее время свободного пролета носителей заряда, индексы e и p обозначают электроны и положительные ионы соответственно.

Расчеты, проведенные по формуле для отношения $D_a(B)/D_a(0)$ для наших экспериментов, показали, что уменьшение ионного тока на стенку с увеличением магнитного поля до 0.05 Т при давлении в разрядной камере 130 Па соответствует уменьшению коэффициента амбиполярной диффузии $D_a(B)$. Этот результат хорошо согласуется с данными работы [8]. При расчете $D_a(B)$ значения ω_e , ω_p , τ_e , τ_p были взяты из [11].

Таким образом, общая картина влияния продольного магнитного поля на отрицательное свечение и темное фарадеево пространство тлеющего разряда нам представляется так. Сжатие разряда начинается почти у катода. В этом месте величина магнитного поля составляет одну десятую часть от величины поля между катушками. Электроны начинают двигаться вдоль силовых магнитных линий. С увеличением напряженности магнитного поля магнитные силовые линии сгущаются и разряд все более контрагируется. Расчет такого движения электронов и обоснование сжатия разряда приведены в [9].

Уменьшение потерь заряженных частиц на стенку за счет уменьшения коэффициента амбиполярной диффузии приводит к увеличению концентрации и температуры электронов в сжатом шнуре разряда. При этом искажается функция распределения электронов по скоростям. За счет этого резко возрастают общая светимость сжатого разряда и интенсивность отдельных спектральных линий (рис. 7, 8).

Уменьшение потерь заряженных частиц на стенку приводит к увеличению длины отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства. В нашем случае при давлении в разрядной трубке меньше 130 Па и при включении даже слабого магнитного поля ~ 0.005 Т исчезает положительный столб разряда и всю длину разрядной трубки занимают катодное свечение, темное катодное пространство, отрицательно тлеющее свечение и темное фарадеево пространство.

Описанная картина действия продольного магнитного поля на отрицательное свечение и темное фарадеево пространство тлеющего разряда подтверждается экспериментом, когда со стороны катода у магнитных катушек был поставлен экран из железного листа, который экранировал магнитное поле в сторону катода. В этом случае сжатие разряда начиналось только после экрана и было резким. Шнур сжимался сразу до необходимого для данного магнитного поля диаметра. В то же время без экрана сжатие шнура происходило постепенно от катода по мере увеличения индукции магнитного поля. Спектры разряда с увтановленным экраном также резко отличались от спектров разряда без экрана. Интенсивность спектральных линий увеличилась всего в 3–4 раза, в то время как без экрана интенсивность линий увеличивается в 10–12 раз. Искажение функции распределения электронов по скоростям в области отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства, причем очень значительное, подтверждается экспериментом при переменном (50 Hz) токе разряда. При этом в спектре разряда без магнитного поля наблюдаются небольшое количество спектральных линий гелия (рис. 10), при магнитном поле 0.025 Т некоторые линии исчезают, другие появляются, при магнитном поле 0.05 Т снова одни линии исчезают, другие появляются. По-видимому, это может происходить только при сильном изменении функции распределения электронов по энергии.

Если встать на точку зрения авторов работы [12] о том, что возбуждение атомов для каждой спектральной линии происходит только за счет ударов первого рода и ступенчатым возбуждением и ударами второго рода можно пренебречь, то следует предположить, что магнитное поле увеличивает концентрацию электронов „пучка“, энергия которых способна возбудить атом ударом первого рода. По нашему мнению, возможной причиной столь сильного увеличения интенсивности спектральных линий гелия в продольном магнитном поле является то, что при увеличении температуры „основных“ электронов (рис. 6) резко возрастает ступенчатое возбуждение уже существующих долгоживущих метастабильных уровней атомов гелия. Это приводит к увеличению возбужденных состояний, способных излучать спектральных линий.

Заметим, что в вышеупомянутой работе [12] также сделано предположение, что действие магнитного поля на излучение разряда эквивалентно в смысле увеличения числа актов ступенчатого возбуждения.

Выводы

В работе экспериментально исследовано влияние продольного магнитного поля на области отрицательного тлеющего свечения и фарадеева темного пространства тлеющего разряда в гелии при токе разряда 11 мА и давлении в разрядной камере 100–200 Па.

С помощью электрических зондов показано, что в области отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства при токе разряда 11 мА и давлении меньше 130 Па продольное электрическое поле отсутствует как без магнитного поля, так и в магнитном поле, или по крайней мере оно меньше, чем 0.01 В/см.

Показано, что продольное магнитное поле меняет электрические характеристики разряда. Уменьшается общее напряжение на разряде, исчезает положительный столб разряда при исследованной длине разрядной камеры.

С включением магнитного поля уменьшаются потери заряженных частиц на стенку. Уход заряженных частиц на стенку уменьшается монотонно до поля ~ 0.05 Т и подчиняется приблизительно уменьшению коэффициента амбиполярной диффузии по закону Таундсена.

Особенно сильно влияет магнитное поле на оптические характеристики разряда. Общее излучение разряда и интенсивности излучения отдельных спектральных линий увеличивается в 10–12 раз.

Сделана попытка объяснить обнаруженные эффекты влияния продольного магнитного поля на тлеющий разряд при помощи гипотезы о том, что магнитное поле сильно искажает функцию распределения электронов по энергиям, причем доля высокоэнергетичных электронов „пучка“ в общем спектре возрастает.

Не обнаружено влияния продольного магнитного поля на электрические характеристики положительного столба разряда при давлении в разрядной камере больше 180 Па и токе разряда 11 мА.

Список литературы

- [1] Райзер Ю.П. // ТВТ. 1991. Т. 29. № 6. С. 1041.
- [2] Райзер Ю.П. // ТВТ. 1986. Т. 24. № 5. С. 984.
- [3] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971.
- [4] Gill P., Webb C.E. // J. Phys. D. 1977. Vol. 10. P. 229.
- [5] Bickerton R.J., Engel A. // Proc. Phys. Soc. 1956. Vol. B69. P. 768.
- [6] Hoh F.C. // Phys. Fluids. 1962. Vol. 5. P. 22.
- [7] Hoh F.C., Lehnert B. // Phys. Lett. 1961. Vol. 7. P. 75.
- [8] Васильева И.А., Грановский В.Л. // РиЭ. 1959. № 12.
- [9] Рохлин Г.Н. // ЖЭТФ. 1939. Т. 9. № 7.
- [10] Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.
- [11] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
- [12] Фабрикант В.А. Механизм излучения газового разряда. Тр. ВЭИ. Электронные и ионные приборы / Под ред. П.В. Тимофеева. Вып. 41. М.; Л., 1940.