

УДК 621.528.6

Э. М. Рейхрудель
Г. В. СмирницкаяИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА
С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ
ПРИ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Приводятся характеристики разряда с осциллирующими электронами в сильных магнитных полях напряженностью $H=5-50$ кЭ при анодных напряжениях $V_a=2-4$ кВ для различных геометрических размеров ячеек. Для определенной конфигурации разрядных трубок экспериментальные результаты сравниваются с теоретическими зависимостями, полученными авторами ранее. Сделаны выводы о выборе геометрических и физических параметров разряда при работе в сильных магнитных полях.

Известно, что разряд с осциллирующими электронами существует в различных режимах, зависящих от соотношения геометрических и физических параметров [1], и что для использования разряда в различных устройствах необходимо выбирать соответствующие оптимальные соотношения его параметров.

В магниторазрядных насосах широкого потребления и манометрах используется анодное напряжение $V_a=4-7$ кВ; значение произведения ($H \cdot r_a$) выбирается таким, которое соответствует максимуму разрядного тока как функции ($H \cdot r_a$). Обычно используются магнитные поля напряженностью 800—1500 Э и геометрические размеры ячеек 1—3 см. При изменении давления в магниторазрядном насосе и манометре в широком интервале от 10^{-2} до 10^{-11} мм рт. ст. разряд проходит разные режимы. В газоразрядных источниках ионов при давлениях более высоких целесообразны магнитные поля большей напряженности и меньшие габариты промежутков. Правильный выбор оптимальных значений параметров разряда ведет к существенному повышению эффективности работы тех или иных устройств, использующих разряд с осциллирующими электронами.

Особенно экономично использование разряда данного типа в устройствах, работа которых основана на применении постоянных или переменных магнитных полей. В этих случаях имеющееся магнитное поле может одновременно служить для поддержания разряда с осциллирующими электронами, используемого в качестве магниторазрядного насоса. Примером таких устройств могут служить ускорители, магнитные поля в которых достигают десятков кЭ, а вакуум, необходимый для их нормальной работы, порядка $10^{-9}-10^{-10}$ мм рт. ст. Для создания высокого вакуума в ускорителях, по-видимому, целесообразно использовать встроенные магниторазрядные насосы.

В работе [2] приводятся характеристики разряда с осциллирующими электронами при $V_a=3-7$ кВ и напряженностях магнитного поля до 11 кЭ для ячеек с разными геометрическими размерами. Сделана попытка объяснить полученные зависимости эмпирическими формулами.

В настоящей работе диапазон магнитных полей расширен до 50 кЭ, показано, что для определенных конфигураций разрядных ячеек полу-

ченные закономерности хорошо согласуются с теоретическими зависимостями, приведенными в работах [3—5]. Существование разряда при таких сильных полях возможно лишь в ячейках, в которых радиус анода r_a и размеры разрядных промежутков уменьшены до миллиметров. Поскольку при этом анодное напряжение имеет величину порядка нескольких киловольт, возникают технические трудности при осуществлении экспериментов.

На рис. 1 показана конфигурация электродов и геометрические размеры ячеек одной из экспериментальных разрядных трубок. Катоды — пластины из листового Та, аноды — стержень из Аl с высверленными в нем 5 отверстиями, геометрические размеры показаны на рисунке. Электроды помещались в стеклянную трубку $\varnothing = 0,8$ см. Магнитное поле до 16 кЭ создавалось электромагнитом.

На рис. 1, б приведены экспериментальные (точки) и теоретические (линии) зависимости интенсивности разряда I/p как функции H для разных значений V_a для данных ячеек. Теоретические значения I/p определялись по формулам, приведенным в работах [3—5]:

$$\frac{I}{p} = \left\{ \frac{\sqrt{2\omega^2 + \sqrt{2\omega^2 - \beta^2}}}{2\sqrt{2(\omega^2 - \beta^2)}} - 1 \right\} \left\{ \frac{m}{e} \beta^2 - \frac{V_0}{d^2} \right\} v_{01} l_a r_a^2, \quad (1)$$

где $\omega = \frac{eH}{2mc}$, $\beta^2 = \frac{2e}{m} \left(\frac{V_a - V_0}{r_a^2} \right)$, l_a — длина анода, $2d$ — расстояние меж-

ду катодами, V_0 — потенциал центра разрядной ячейки, v_{01} — частота соударений электронов с атомами газа при $p=1$ мм рт. ст. v_{01} для N_2 в первом приближении может быть принята равной $1,2 \cdot 10^{10}$ 1/с. Используемые при расчете I/p значения радиального падения потенциала $(V_a - V_0)$ как функции H [3] даны на рис. 1, в. Теоретические зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными. С уменьшением r_a и увеличением V_a максимум кривых $I/p=f(H)$ смещается в сторону больших H .

На рис. 2 показаны зависимости $I/p=f(V_a)$ при разных значениях для указанных геометрических значений разрядных ячеек. Полученные зависимости согласуются с полученными ранее в [4]. При уменьшении r_a и увеличении H насыщение (т. е. переход в первый режим разряда) наступает при больших значениях V_a . Следует отметить, что по мере увеличения H разница в величинах I/p для ячеек с разными значениями r_a становится все меньше, а при малых V_a ток в ячейках меньшего радиуса даже больше, чем в ячейках большего радиуса. Последнее объясняется большим уменьшением радиального падения потенциала в ячейках с большим r_a из-за влияния положительного заряда ионов во втором режиме разряда.

Повышение напряженности H сверх 16 кЭ потребовало дальнейшего сближения полюсов электромагнита до 0,63 см и установки конических полюсных наконечников. На рис. 3, а приведена другая конфигурация разрядной трубки. Металлическая трубка $\varnothing = 0,6$ см из нержавеющей стали являлась катодом. Внутри нее вставлялся на изоляторах стержень с просверленными в нем анодными отверстиями разрядных ячеек. Ячейки с разными r_a находились на таком расстоянии друг от друга, чтобы при горении разряда в данной группе ячеек ячейки с другим значением r_a находились вне области магнитного поля, создаваемого электромагнитом. Максимальное значение H равнялось 20 кЭ. Геометрические размеры r_a , l_a и $2d$ указаны на рисунке. Для данной конфигурации разрядной трубки (катод — металлическая трубка) экспе-

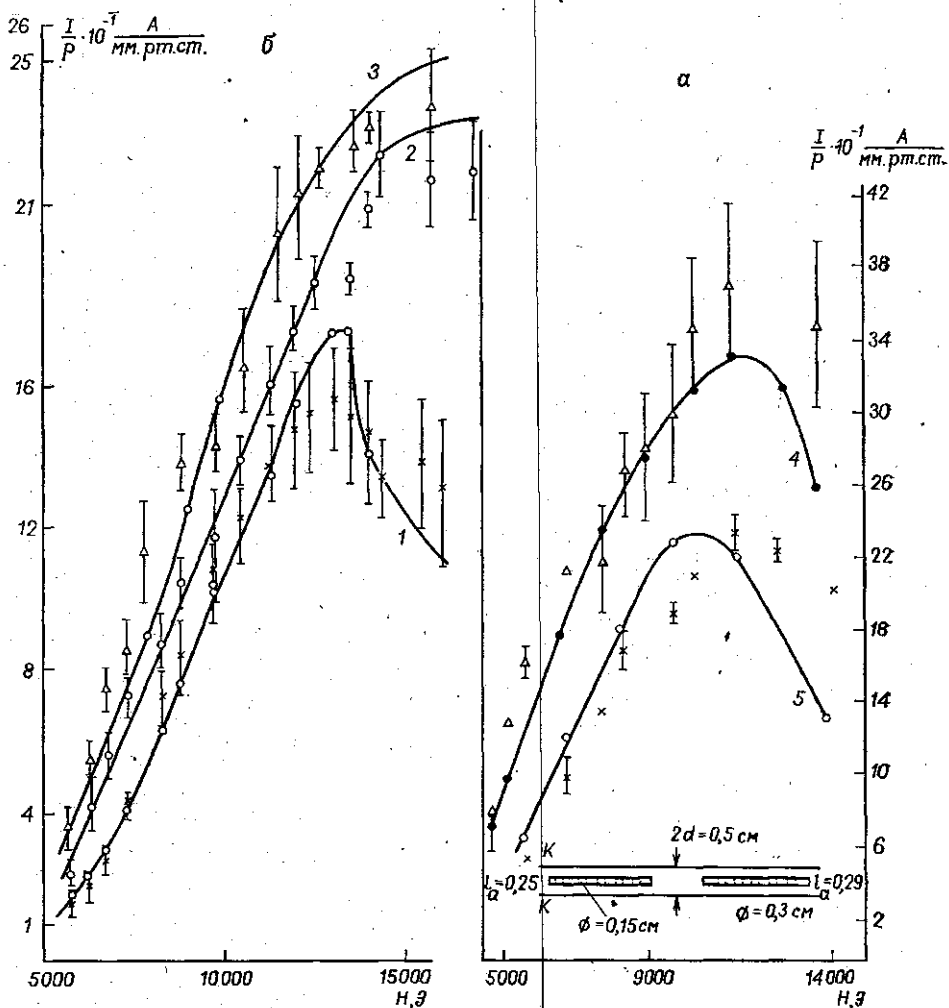
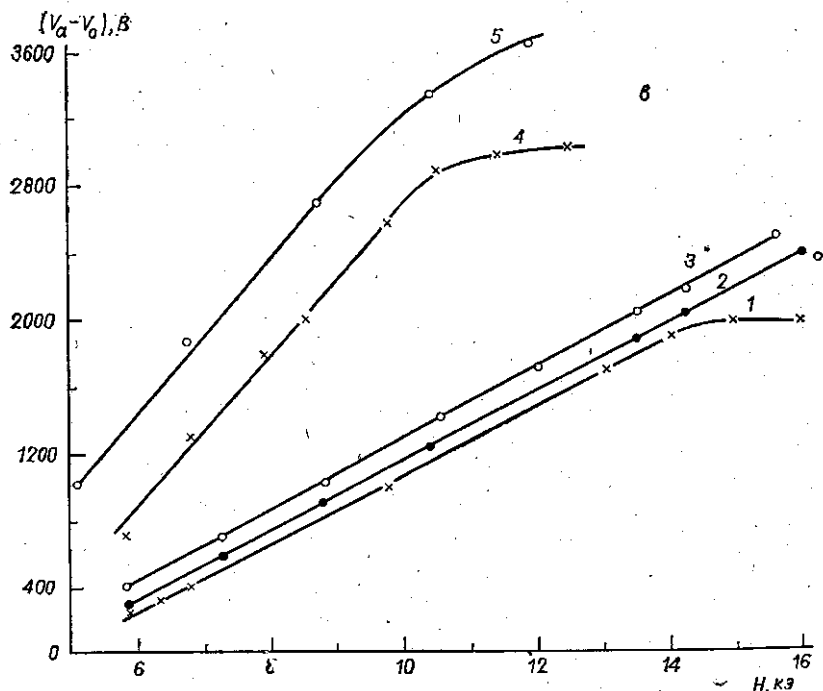


Рис. 1. а — схема разрядных ячеек, б — зависимость $I/p=f(H)$, 5 ячеек, в — зависи-

рimentальные зависимости согласуются с теоретическими, полученными в [3—4] лишь при сильных магнитных полях, когда потенциал центра V_0 близок к потенциалу катода.

На рис. 3, б даны зависимости $I/p=f(H)$ для ячеек с разными значениями r_a и l_a . Видно, что разрядный ток в первом режиме разряда (слабые H) больше для ячеек с большим r_a , однако по мере увеличения H и перехода разряда во второй режим эта разница становится все меньше. При одинаковых значениях r_a при слабых H интенсивность разряда выше в ячейках с меньшей длиной анода (больше $(V_a - V_0)$), напротив, при сильных H интенсивность разряда становится больше в ячейках с большим l_a . Последнее связано с тем, что чем больше l_a , тем при большем H достигается максимум $(V_a - V_0)$ и наступление переходного режима.

Для получения еще более сильных магнитных полей до 50 кЭ использовался криостат со сверхпроводящим соленоидом, охлаждаемым жидким гелием [6]. Разрядные ячейки помещались в стеклянные трубки, которые находились в криостате с жидким гелием. На рис. 4 пока-



мосьть $(V_a - V_0) = f(H)$, 1, 2, 3: $r_a = 0,075$, $l_a = 0,25$; $2d = 0,5$ см; 4, 5: $r_a = 0,15$, $l_a = 0,29$, $2d = 0,5$ см (V_a : 1=2, 2=3, 3=4, 4=3 и 5=4 кВ)

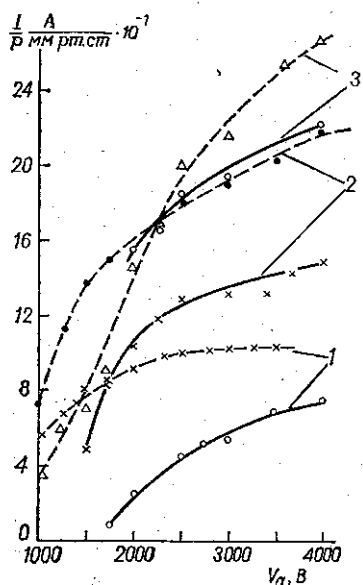


Рис. 2. Зависимость $I/p = f(V_a)$ 5 ячеек. 1 — $H = 6500$, 2 — $H = 9700$, 3 — $H = 12500$ Э; сплошная линия: $r_a = 0,075$, $l_a = 0,25$, $2d = 0,5$ см; пунктирная линия: $r_a = 0,15$, $l_a = 0,29$, $2d = 0,5$ см

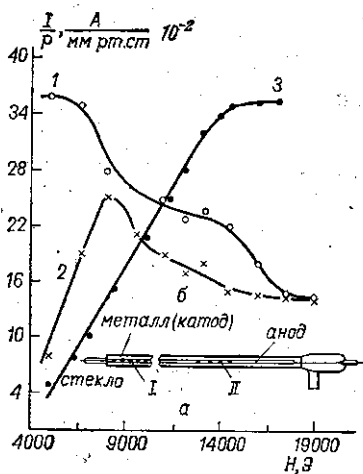


Рис. 3. а — схема разрядной трубки I — $\Phi 18$ см 10 ячеек, II — $\Phi 15$ см 12 ячеек, б — зависимость $I/p = f(H)$ при разных r_a и l_a . $V_a = 3,5$ кВ: 1 — $r_a = 0,09$, $l_a = 0,16$, $2d = 0,5$ см; 2 — $r_a = 0,075$, $l_a = 0,16$, $2d = 0,5$ см; 3 — $r_a = 0,075$, $l_a = 0,25$, $2d = 0,5$ см

зана схема разрядной трубки, используемой при измерениях в сверхпроводящем соленоиде. После создания предварительного разрежения и обезгаживания трубки и электродов трубка с припаянным к ней магниторазрядным насосом отпаивалась от установки. Магниторазрядный насос позволял регулировать давление в трубке. Давление измеря-

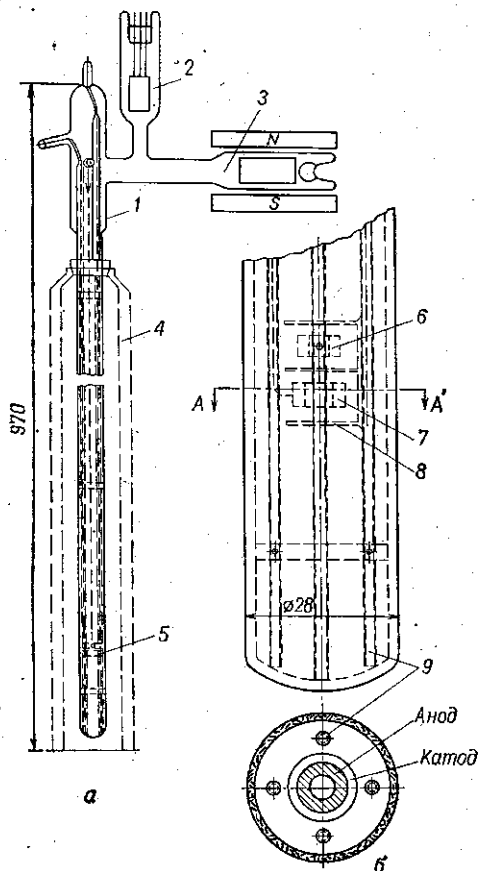


Рис. 4. Схема разрядной трубки для измерений в сверхсильных магнитных полях. а: 1 — корпус трубки, 2 — манометрическая лампа, 3 — ионный насос, 4 — корпус криостата, 5 — разрядные промежутки; б — разрядные ячейки в увеличенном виде: 6 — анод, $r_a=0,062$, $l_a=0,25$, $2d=0,8$ см; 7 — анод, $r_a=0,062$, $l_a=0,5$, $2d=0,8$ см; 8 — катоды, 9 — изоляторы с выводами

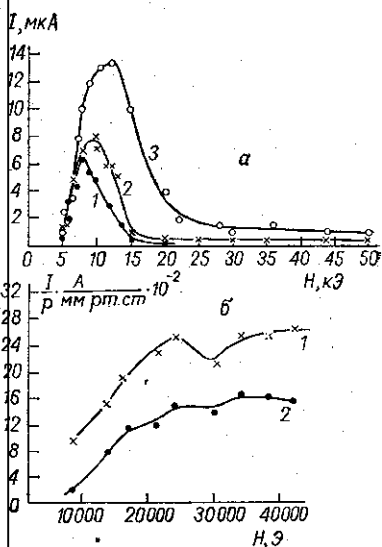


Рис. 5. а: Зависимость $I=f(H)$ при разных V_a ($r_a=0,09$, $l_a=0,16$, $2d=0,5$ см, $p \sim 10^{-5}$ мм рт. ст. 1 — $V_a=2$, 2 — 2,5, 3 — 3 кВ); б: Зависимость $1/p=f(H)$, 1 — $l_a=0,5$, $r_a=0,06$, $2d=0,7$ см, $V_a=3,4$ кВ и 2 — $l_a=0,25$, $r_a=0,06$, $2d=0,8$ см, $V_a=4$ кВ

лось ионизационным манометром, находящимся вне криостата, что позволяло при горении разряда определить лишь порядок p . На рис. 5, а приведены зависимости $I=f(H)$ для разных значений V_a . Хотя значения I лишь качественно согласуются с теоретическими, полученными в [4,5], так как неизвестно точное значение p в области разряда, однако положение максимума, вычисленное по формулам работы [3] и соответствующее такому значению ($H \cdot r_a$), при котором $(V_a - V_0) \approx V_a$, хорошо согласуется с экспериментом, что видно из таблицы.

I_{\max} \ V_a	2 кВ	2,5 кВ	3 кВ
$(H \cdot r_a) \text{ Э (см), эксп}$	720	810—890	900—1100
$(H \cdot r_a) \text{ Э (см), теор.}$	680	800	900

На рис. 5, б приведены зависимости $I/p=f(H)$ для ячеек еще меньшего радиуса и большего l_a . Дальнейшее уменьшение r_a и увеличение l_a привело к смещению максимума кривых $I=f(H)$ в сторону больших H .

Проведенные эксперименты показывают, что при сильных H разряд с осциллирующими электронами горит в ячейках, имеющих размеры порядка миллиметра. Для получения большей интенсивности разряда при сильных H необходимо использовать ячейки меньшего радиуса. Значение r_a выбирается из значения $(H \cdot r_a)$, соответствующего максимуму $(V_a - V_0)$ и I для данного V_a . Также следует использовать аноды большей длины, уменьшить зазор между анодом и катодом, увеличить анодное напряжение. При конструировании трубок необходимо предусмотреть хорошую изоляцию между анодом и катодом. Для разрядных ячеек с определенной конфигурацией электродов и геометрическими размерами промежутка экспериментальные зависимости удовлетворительно согласуются с теоретическими, полученными ранее.

Авторы выражают глубокую благодарность тов. С. М. Чудинову, любезно предоставившему гелиевый криостат со сверхпроводящим соленоидом, и тов. Б. А. Акимову, оказавшему помощь при проведении экспериментов с сильными магнитными полями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирницкая Г. В., Рейхрудель Э. М., Егназарян Г. А. ЖТФ, 1973, 43, вып. 1.
2. Malev M. «Tracht. E. Vacuum», 1973, 23, N 11, 403.
3. Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. ЖТФ, 1969, 39, вып. 6, 1044.
4. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. ЖТФ, 1969, 39, вып. 6, 1051.
5. Смирницкая Г. В., Егназарян Г. А. «Вестн. Моск. ун-та. Физ. астрон.», 1972, 13, № 5.
6. Караваев В. Г. Канд. дис. М., 1974.

Поступила в редакцию
28.9 1976 г.
Кафедра общей физики
для естественных факультетов