

Таким образом, уединенная деформация поверхности существует ниже порога срыва устойчивости плоской конфигурации ($\beta < 0$). Решение (5) описывает канавку малой амплитуды, а решение (6) — форму, получившую в силу наличия острия в точке минимума название «воронка». Оба предельных типа уединенных структур наблюдаются экспериментально [8], причем «воронка» реализуется в условиях стационарной подзарядки поверхности, компенсирующей стекание зарядов на подложку.

Список литературы

- [1] Гуцо Ю. П. Фазовая рельефография. М.: Энергия, 1974. 215 с.
- [2] Горьков Л. П., Черникова Д. М. // ЖЭТФ. 1973. Т. 18. Вып. 2. С. 119—122.
- [3] Черникова Д. М. // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. Вып. 1. С. 249—256.
- [4] Горькова Л. П., Черникова Д. М. // ДАН СССР. 1976. Т. 228. № 4. С. 829—832.
- [5] Кузнецов Е. А., Спектор М. Д. // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. Вып. 1 (7). С. 262—271.
- [6] Жакин А. И. // Магнит. гидродинамика. 1983. № 4. С. 41—48.
- [7] Жакин А. И. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 3. С. 94—102.
- [8] Панасюк Л. М., Ковтушенко С. И. // ЖНПФик. 1988. Т. 33. № 4. С. 375—386.
- [9] Выборнов В. И., Панасюк Л. М., Русанов М. М. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 5. С. 929—933.

Кишиневский
государственный университет
им. В. И. Ленина

Поступило в Редакцию
31 августа 1988 г.
В окончательной редакции
26 декабря 1988 г.

ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В СМЕСИ H_2 —He

А. В. Демьянов, И. В. Кочетов, А. Ф. Паль, В. В. Пичугин

Несамостоятельный разряд в смесях водорода с инертными газами при комнатной температуре исследовался в ряде работ [1–5]. Цель исследований состояла в получении возможно большего энерговклада в колебательные уровни H_2 . В работах [1–2] были достигнуты предельные энерговклады 1 кДж/л. Наблюдался и был объяснен ряд интересных явлений, таких как провал в зависимости тока разряда от времени [3, 4], связанный с конкуренцией процессов диссоциативного прилипания электронов и разрушения ионов H^- при столкновениях с колебательно-возбужденными молекулами H_2 . Такой провал в зависимости тока наблюдался в смесях H_2 как с Ar, так и с He [5], а также в смесях D_2 с Ar и He. При определенных условиях в 10%-ных смесях H_2 (D_2) с Ar и He впервые наблюдались неподвижные светящиеся слои, ориентированные поперек тока разряда, также получившие объяснение [6].

В ряде случаев, например для увеличения КПД СО лазеров [7], используется несамостоятельный разряд с глубоким охлаждением газа. Это связано с тем, что в охлажденной смеси уменьшается остаточный запас квантов на нижних колебательных уровнях молекулы СО. Молекула H_2 характеризуется большим ангармонизмом, чем СО, и влияние охлаждения на остаточный запас квантов в водородосодержащих смесях менее существенно. Однако представляет интерес исследовать влияние начальной температуры газа на энергетические характеристики и устойчивость разряда в водородосодержащих смесях. Для этого на установке, описанной в [8], разрядная камера была окружена рубашкой, заполненной жидким азотом. Рабочая газовая смесь предварительно охлаждалась до азотной температуры в теплообменнике и по охлажденному жидким азотом трубопроводу подавалась в камеру. Все эксперименты проводились при температуре ~ 100 К. Расстояние между электродами равнялось 1 см, диаметр электродов 1 см, энергия электронов пучка 120 кэВ, плотность тока ~ 100 мкА/см². Разность температур сетчатого катода, через который инжектировался пучок, и анода не превышала 5 К. В камере имелись окна для фотографирования разряда. Поскольку температура газа не регулировалась, то использовались смеси водорода и дейтерия только с гелием.

На рис. 1, а приведены осциллограммы тока разряда в смеси 10 % H_2 —He при комнатной температуре для двух значений напряжений разряда. Наблюдаются характерные особенности, получившие объяснение ранее. Выбрано давление 2.5 атм, поскольку в этих условиях легче наблюдаются структуры в виде полос в разряде [8]. На рис. 2, а приведены осциллограммы тока разряда в смесях 10 % 1H_2 и 10 % D_2 с гелием при температуре 100 К и давлении 1 атм. Видно, что по сравнению с осциллограммой при комнатной температуре, соответствующей по величине E/N , наблюдается небольшое смещение максимума тока во времени и монотонный спад тока. Полосатая структура в этих условиях не образуется, наблюдается множество слабосветящихся шнуров, выходящих от катода в сторону анода. Если импульс напряжения не ограничивать, то происходит шнурование разряда.

Таким образом, влияние охлаждения газа сводится к уменьшению тока разряда и отсутствию поперечных току полос, не сказываясь на времени устойчивого горения. Замена водорода на дейтерий приводит только к увеличению тока разряда.

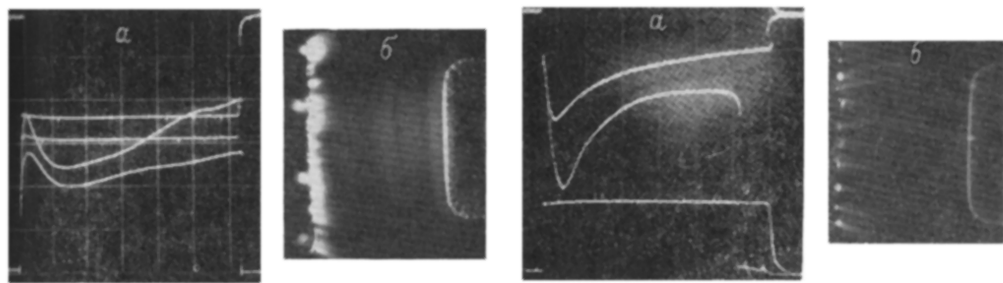


Рис. 1.

а — осциллограммы тока разряда (нижний луч, 200 мА/дел) при напряжениях 2, 4 и 2, 9 кВ (верхний луч, 1 кВ/дел) в смеси 10 % H_2 —He при комнатной температуре и давлении 2.5 атм. Развертка 100 мкс/дел. б — фотография разряда, соответствующая осциллограмме с большим током. Слева — катод, справа — анод.

Рис. 2.

а — осциллограммы тока разряда (верхний луч, 200 мА/дел) при напряжении 3.2 кВ (нижний луч, 2 кВ/дел) в смесях 10 % H_2 —He и 10 % D_2 —He (осциллограмма с большим током) при $T=100$ К и давлении 1 атм. Развертка 100 мкс/дел. б — фотография, соответствующая осциллограмме в смеси 10 % H_2 —He. Слева — катод, справа — анод.

Для объяснения наблюдаемых различий привлечены модели [3-6]. Особое внимание нужно обратить на температурные зависимости учитываемых в модели процессов. Концентрация ионов и электронов контролируется [3-5] процессами диссоциативного прилипания и разрушения H^- при столкновениях с колебательно-возбужденными молекулами водорода, а также ион-ионной рекомбинацией. Поэтому в модель [3-5] введены температурные зависимости констант колебательной кинетики ион-ионной рекомбинации, а также процессов перезарядки и передачи возбуждения.

Зависимость эффективной частоты колебательно-колебательного $V-V$ -обмена молекул H_2 взята из [8]. К сожалению, в настоящее время отсутствует экспериментальная информация по константам $V-V$ -обмена. С уменьшением температуры до 100 К скорость $V-V$ -обмена, согласно [8], возрастает ~ 5 раз. Но, как показано в [3], увеличение на порядок скорости $V-V$ -обмена слабо влияет на ток разряда из-за компенсации процесса диссоциативного прилипания процессом разрушения H^- .

Температурные зависимости констант колебательно-поступательной релаксации на молекулах H_2 , атомах He и H взяты из работ [9, 10]. Скорость $V-T$ -релаксации с уменьшением температуры уменьшается, поэтому при малых температурах распределение молекул H_2 имеет более протяженное «плато».

Основным ионом в смеси H_2 —He является [5] H_3^+ . Поэтому на квазистационарной стадии концентрация ионов [3-5] контролируется ион-ионной рекомбинацией



Известно [10, 11], что для подобных реакций константа $K_r \sim T^{-1/2}$ растет с уменьшением температуры. Константы перезарядки положительных ионов слабо зависят от температуры [12] $\sim T^\alpha$, где $-0.5 \leq \alpha \leq 0.5$. Эти процессы в наших условиях являются быстрыми, поэтому температурная зависимость констант перезарядки не может повлиять на ионный состав.

В работе [5] показано, что рост тока разряда в смеси H_2-He в основном связан с образованием атомов H^* и дальнейшей ассоциативной ионизацией H^* в столкновениях с молекулами H_2



Температурная зависимость (2) нам неизвестна. Константа по аналогии с подобными процессами $\sim 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ [4] такова, что характерное время этого процесса $(K \cdot n_{H_2})^{-1} \sim 10^{-9} \text{ с}$ много меньше времени жизни нижних резонансных состояний H , для которых $\tau \approx 10^{-8} - 10^{-7} \text{ с}$ [4]. Поэтому даже при уменьшении этой константы на порядок, практически все атомы H^* участвуют в процессе (2).

Уточненная изложенным выше образом модель разряда была использована затем для расчета временных зависимостей тока разряда в смеси H_2-He при температурах 100 и 300 К.

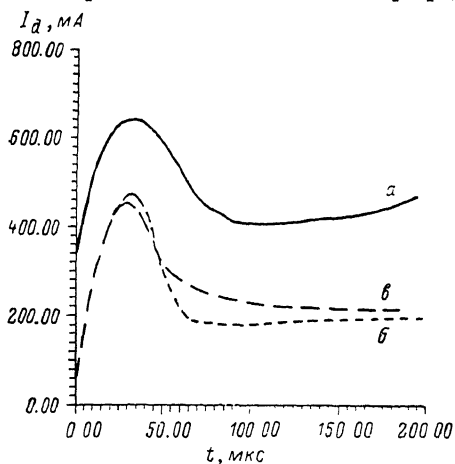
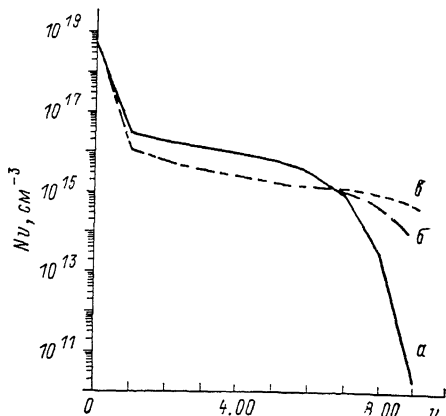


Рис. 3. Расчетные зависимости тока разряда I_d от времени для условий рис. 2 в смеси 10% H_2-He .

$a - T=300$, $b - 100$ (g_b из [9]), $c - 100 \text{ К}$ ($g_c = v+1$).

Рис. 4. Колебательные распределения молекул H_2 .

$a - T = 300$, $b - 100$, $c - 100 \text{ К}$ ($q_v, v-1 = (v+1)$).



Результаты расчета зависимости тока разряда от времени приведены на рис. 3. В эксперименте вначале в разрядный промежуток инжектируется пучок быстрых электронов и только спустя некоторое время к промежутку прикладывается импульс напряжения. В связи с этим еще до начала разряда в газе устанавливается некоторая концентрация тепловых электронов с энергией T_e , близкой к температуре газа. Из-за быстрых процессов передачи заряда основным оказывается ион H_3^+ . Поэтому начальная концентрация тепловых электронов была оценена с использованием констант диссоциативной рекомбинации из [3].



При низких температурах начальная концентрация электронов меньше и максимум тока разряда достигается на более поздних временах по сравнению со случаем комнатной температуры.

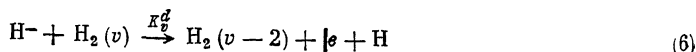
Расчетные временные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными. Спадание тока разряда в охлажденной смеси связано с увеличением скорости ион-ионной рекомбинации (см. выше)



Также нужно учесть, что константы диссоциативного прилипания электрона



при $E/N = 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$, типичных для условий эксперимента, максимальна $v=7$ ($4 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$) и еще достаточно велики на уровнях $v=8.9$ ($\sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$). В то же время процесс разрушения H^-



возможен [3] лишь для $v=2-6$. Причем для $v=6$ процесс имеет небольшой порог ~ 0.054 эВ. Поэтому константа (6) для $v=6$ зависит от температуры $K_{v=6}^d = 2.7 \cdot 10^{-9} \exp(-600/T)$ и равна для $T=100$ К $4 \cdot 10^{-12}$ и $3.3 \cdot 10^{-10}$ см³/с для 300 К. На квазистационарной стадии

$$n_e = \sqrt{S/K_r^i} / \sqrt{(1 + \nu_a/\nu_d) \nu_a/\nu_d}, \quad (7)$$

где S — скорость рождения ион-электронных пар; K_r^i — константа ион-ионной рекомбинации (4); ν_a, ν_d — частоты диссоциативного прилипания электрона и разрушения иона H^- при столкновениях с колебательно-возбужденными молекулами H_2 : $\nu_{a,d} = \sum K_{v,d}^a \cdot n_v$, n_v — населенности колебательных уровней H_2 .

Это означает, что по мере возбуждения колебаний молекул H_2 населенности верхних уровней растут (рис. 4). При этом частота ν_d разрушения H^- с некоторого момента времени перестает расти, а частота ν_a — диссоциативного прилипания продолжает увеличиваться. Соответственно уменьшаются концентрация n_e и ток разряда. При комнатных температурах возрастают скорости $V-T$ -релаксации и «плато» колебательного распределения достигает лишь 6-го уровня [3]. Поэтому спад тока оказывается менее глубоким. Темп изменения n_e определяется [13] скоростью «волны возбуждения» колебательных уровней и зависит от эффективной частоты $V-V$ -обмена и зависимости квадрата модуля матричных элементов колебательного перехода $q_{v,v-1}$ от номера v — колебательного перехода. В случае H_2 зависимость $q_{v,v-1}$ неизвестна. В наших расчетах использована зависимость $q_{v,v-1}$ для HCl [9], растущая до $v=4$, а далее практически не зависящая от v . Более быстрое спадание тока разряда во времени в расчете указывает на большую скорость «волны возбуждения». Как следует из [13], для улучшения согласия необходима более резкая зависимость q_v . Обычно используется линейная от v [14] аппроксимация, справедливая, например, для CO (молекул с малым ангармонизмом). Эволюция тока разряда от времени для этой зависимости несколько лучше согласуется с экспериментом рис. 3. Заметим, что в охлажденной смеси D_2-He (рис. 2) ток разряда повторяет временную зависимость тока в смеси H_2-He , но значение его больше \sim в 1.5–2 раза из-за меньшей скорости ион-ионной рекомбинации и диссоциативного прилипания [15]. Таким образом, в охлажденной смеси ток разряда существенно меньше тока при комнатных условиях. Как показано в [6], неподвижные слои существуют в достаточно узком интервале параметров, в том числе и тока разряда, т. е. при охлаждении смеси нарушаются условия [6] возникновения слоев.

Список литературы

- [1] Александров А. Ю., Басов Н. Г., Данилычев В. А. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 5. С. 413–416.
- [2] Басов Н. Г., Данилычев В. А., Долгих В. А. и др. // Квантовая электрон. 1986. Т. 13. № 6. С. 1161–1168.
- [3] Демьянов А. В., Дятко Н. А., Кочетов И. В. и др. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. С. 361–368.
- [4] Демьянов А. В., Дятко Н. А., Кочетов И. В. и др. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. С. 623–631.
- [5] Демьянов А. В., Кочетов И. В., Напартович А. П. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 1. С. 75–79.
- [6] Демьянов А. В., Кочетов И. В., Напартович А. П. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 14. С. 849–853.
- [7] Ковш И. Б., Леснов И. А., Пятакин М. А. и др. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 7. С. 1336–1342.
- [8] Демьянов А. В., Кочетов И. В., Напартович А. П., Старостин А. Н. // ТВТ. 1981. Т. 19. С. 1097–1103.
- [9] Вельх А. Д., Гурашвили В. А., Демьянов А. В. и др. Препринт ИАЭ. № 3757/12. М., 1983.
- [10] Демьянов А. В., Кочетов И. В., Певгов В. Г. и др. Препринт ИАЭ. № 3175. М., 1979.
- [11] Плазма в лазерах / Под ред. Дж. Бекефи. М.: Энергоиздат, 1982. 164 с.
- [12] Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974. С. 344, 368.
- [13] Демьянов А. В., Кочетов И. В., Напартович А. П., Старостин А. Н. // ТВТ. 1984. Т. 22. С. 216–221.
- [14] Sacchiatore M., Capitelli M., Dilonardo M. // J. Chem. Phys. 1978. Vol. 34. P. 193–198.
- [15] Christophorou L. G. // J. Chem. Phys. 1985. Vol. 83. P. 6219–6224.

Поступило в Редакцию

13 апреля 1988 г.

В окончательной редакции

25 октября 1988 г.