

УДК 537.521

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В СМЕСИ H_2 —He

*А. В. Демьянов, Н. А. Дятко, И. В. Кочетов, А. П. Напартович,
А. Ф. Паль, В. В. Пичугин, А. Н. Старостин*

Экспериментально и теоретически исследованы характеристики самостоятельного разряда в смеси H_2 —He. Обнаружен немонотонный ход тока во времени. Показано, что резкий рост тока разряда вызван прямым возбуждением молекул H_2 и последующей ассоциативной ионизацией при соударениях с атомами He. Экспериментальные предельные энерговклады в смеси H_2 —He оказались меньше, чем в смесях H_2 —Ar. При определенных условиях наблюдались неподвижные светящиеся слои, перпендикулярные току разряда. В целом физические процессы в исследуемой смеси аналогичны процессам в смесях H_2 —Ar.

Несамостоятельный разряд в смесях благородных газов с молекулярными позволяет относительно легко получать высоковозбужденные молекулы. Изучение процессов с участием таких молекул может представлять интерес для реализации лазеров ближнего ИК диапазона на колебательных переходах галогеноводородных молекул.

Один из эффектов колебательного возбуждения H_2 обусловлен резким ростом сечения диссоциативного прилипания электронов с номером колебательного уровня. Поэтому основные свойства разряда существенным образом определяются временем установления функции распределения по колебательным уровням τ_{v-v} . В работах [1, 2] исследовался разряд в смесях H_2 и D_2 с аргоном и гелием атмосферного давления на коротких временах (\sim мкс). За эти времена, по-видимому, успевали возбудиться лишь нижние колебательные уровни. В данной работе длительность разряда составляла сотни микросекунд, за счет $V-V$ обмена возбуждались высоколежащие уровни и успевало сформироваться плато на функции распределения по колебательным уровням. Именно это обстоятельство и обусловило качественно иные характеристики разряда в нашей работе, чем в [1, 2], такие как немонотонная зависимость тока разряда от времени, наличие светящихся слоев и уровень предельных энерговкладов.

В работах [3, 4] исследован самостоятельный разряд в смеси H_2 —Ar также длительностью ≥ 100 мкс. В данной работе изучается самостоятельный разряд атмосферного давления в смеси H_2 —He. Показано, что физические процессы в этой смеси аналогичны процессам в смеси H_2 —Ar. Проведены оценки времени развития неустойчивости, приводящей к шнурованию разряда. Экспериментально и теоретически определены предельные энерговклады в этой смеси.

Описание эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на установке, описанной в [3]. Через разрядный объем, который представлял собой куб с ребром в 1 см, прокачивалась смесь H_2 : He = 1 : 9 со скоростью ~ 5 м/с при атмосферном давлении. К разрядному промежутку прикладывалось постоянное напряжение до 2500 В. Несамостоятельный разряд контролировался пучком электронов с энергией 120 кэВ, ток пучка менялся от 0 до 250 мкА/см². В экспериментах снималась зависимость тока разряда от времени при различных напряжениях

на разряде и токах пучка. Типичные осциллограммы приведены на рис. 1. Из них видно, что при увеличении напряжения и плотности тока пучка ток разряда начинает немонотонно зависеть от времени.

Обсуждение результатов

Диаграмма основных процессов в плазме разряда в смеси He—H₂ представлена на рис. 2. При анализе их будем опираться на результаты детального исследования разряда в смеси Ag—H₂, опубликованные ранее [3, 4]. Путем решения электронного кинетического уравнения для функции распределения найдены для смеси He—H₂=9 : 1 скорости процессов возбуждения и ионизации частиц, скорость дрейфа и баланс энергии электронов (рис. 3). Информация о скоростях ионно-молекулярных реакций и реакций возбужденных частиц взята из работ [5-7].

В исследуемом разряде в смеси He—H₂ наблюдаются качественно те же явления, что и в смесях Ag—H₂ [3, 4, 8], — это немонотонное во времени поведение тока, возникновение неподвижных светящихся слоев. Сравнение процессов в плазме разрядов в этих двух смесях показывает, что в них много общего. В частности, в обоих случаях форму тока контролируют процессы диссоциативного прилипания к колебательно-возбужденным молекулам H₂ и разрушение ионов H⁺ при столкновении с колебательно-возбужденными молекулами H₂.

Количественные различия в характеристиках разрядов в смесях Ag—H₂ и He—H₂ обусловлены в первую очередь различием скорости ионизации атомов Ag и He электронами пучка (примерно на порядок). Кроме того, дрейфовая

скорость электронов v_e в смеси с He несколько меньше, чем в смеси с Ag. Эффективная константа рекомбинации, по оценкам, в смеси He—H₂ $K_r = 10^{-7}$ см³/с, так что плотность тока разряда

$$j_d = ev_e \sqrt{S/K_r}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона; S — скорость ионизации газа быстрыми электронами, что согласуется с экспериментом (рис. 4).

Различия в ионно-молекулярной кинетике обусловлены двумя обстоятельствами: различием потенциалов возбуждения и ионизации Ag и He; отличием в энергии сродства к протону (для He 1.85 эВ вместо 3.7 эВ для Ag). В результате образование HeH⁺ из H₃⁺ маловероятно, что делает основным в смеси He—H₂ ион H₃⁺. Маловероятен также процесс ассоциативной ионизации состояний H (2P, 2S) при соударении с He. Концентрация возбужденных атомов He при $E/N \leq 0.8 \cdot 10^{-16}$ В·см² чрезвычайно мала из-за высокого порога, а H₂ (C³Π_u) образуется намного эффективней, так что основной канал ионизации в плазме дает процесс



где H₂^{*} — молекула H₂ в метастабильном состоянии C³Π_u; H образуется в разряде главным образом в процессах диссоциативного прилипания и разрушения H⁻ [4]. Таким образом, основной механизм роста тока на поздней стадии раз-

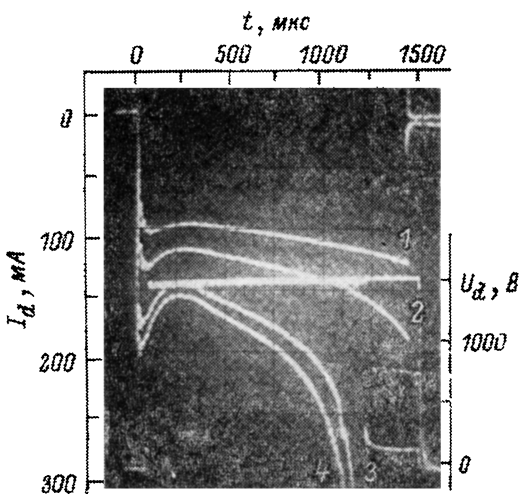


Рис. 1. Осциллограммы тока разряда (верхний луч, 50 мА/дел.) и напряжения на разряде (нижний луч, 500 В/дел.) при токе пучка $i_b=100$ (1), 145 (2), 210 (3) и 240 мкА/см² (4). Развертка — 250 мкс/дел.

ряда обусловлен нагревом и разрежением газа, увеличением скорости возбуждения H_2 и соответственно ионизации в процессе (2). Зависимость времени резкого нарастания тока τ_n от j_b (плотности тока пучка быстрых электронов) изображена на рис. 5. Ввиду сходства механизмов неустойчивости в смесях $He-H_2$ и $Ar-H_2$ можно оценить τ_n , используя выражение из [4]

$$\tau_n = \frac{1}{\nu_{тр}} \ln \frac{(E/N)_{кр}}{(E/N)_0}, \quad (3)$$

где $\nu_{тр} = j_0 E_0 / C_p N_0 T_0$ — частота нагрева газа при постоянном давлении; E_0 , $(E/N)_0$ — начальная напряженность (приведенная напряженность) электрического поля; C_p — теплоемкость газа при постоянном давлении; N_0 , T_0 — начальные плотность газа и температура; j_0 — плотность тока разряда в минимуме (рис. 1). Для смеси $He-H_2$

$$(E/N)_{кр} = \frac{B}{\ln \gamma_{тр}} \approx 0.8 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2, \quad (4)$$

где $\gamma = \nu_0 / 2K_r n_{e0}$; n_{e0} — концентрация электронов в минимуме тока; ν_0 и B определяют аппроксимацией константы скорости возбуждения H_2 в состоянии $C^3\Pi_u$ (рис. 2); $\nu_b = \nu_0 \exp(-BN/E)$. Оценки времени развития неустойчивости по формуле (3) с использованием (1) хорошо согласуются с результатами эксперимента (рис. 5).

Используя (3), можно оценить предельный энерговыход $w = \tau_n I_d E$ в смесях H_2-He (рис. 6). Оценки дают несколько завышенные по сравнению с экспериментом значения энерговыхода. Заметим, что при обработке экспериментальных данных учитывалось катодное падение напряжения $u_c \approx 400 \text{ В}$. Энерговыходы в смесях с He оказались меньше, чем в смесях с Ar , из-за меньшего значения

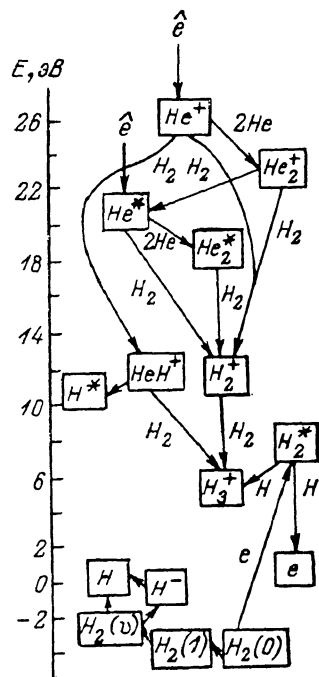


Рис. 2. Энергетическая диаграмма основных процессов в плазме H_2-He .

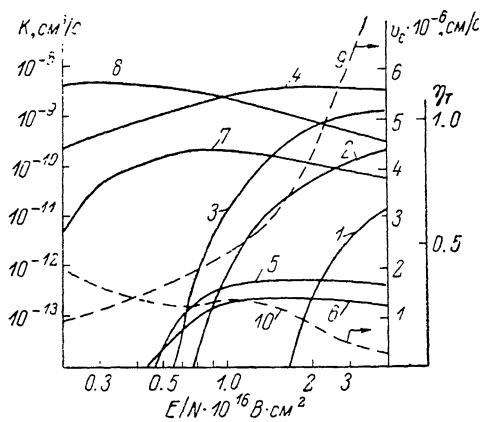
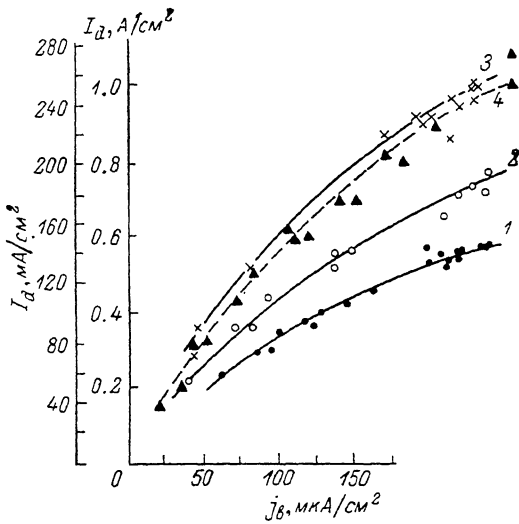


Рис. 3. Зависимости констант электронной кинетики K от E/N в смеси 10 % H_2-He .

1—4 — возбуждение электронных уровней He , H_2 ($C^3\Pi_u$), H ($2P$, $2S$), первого колебательного уровня H_2 ;

5—8 — диссоциативное прилипание электрона к молекуле H_2 ($v=0, 1, 4, 7$); 9, 10 — скорость дрейфа и доля энергии разряда, идущая в тепло η_r .

Рис. 4. Экспериментальная зависимость тока разряда от тока пучка при $u_d = 1450 \text{ В}$ (1), 1900 (2), 2100 В (3) для смеси 10 % H_2-He (левая шкала) и 2000 В (4) для смеси 10 % H_2-Ar (правая шкала I_d).



$(E/N)_{кр}$. При малых напряжениях на разряде наблюдается рост энерговклада при малых токах пучка, вызванный увеличением времени развития неустойчивости. По-видимому, это связано с увеличением значения катодного падения с уменьшением тока пучка. Экстраполяция экспериментальных ВАХ разряда в $Ne-H_2$ дает значение катодного падения $u_c \approx 400$ В при $j_b \approx 200$ мкА/см²

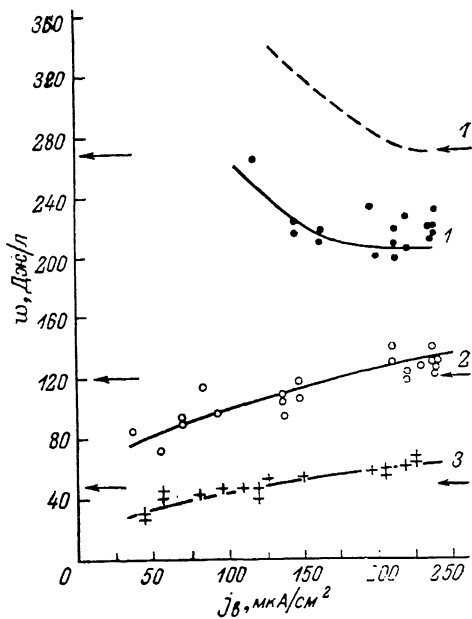
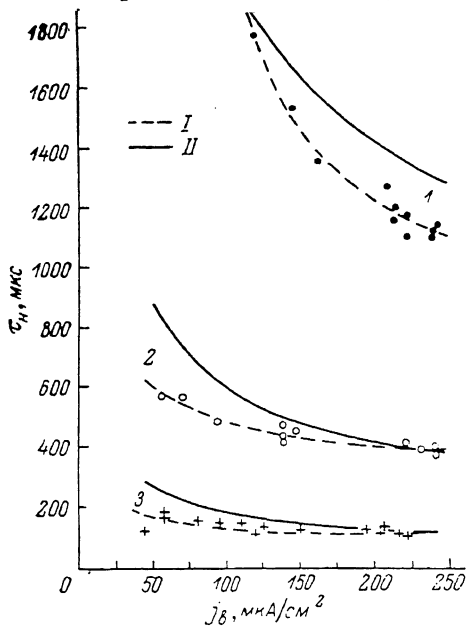


Рис. 5. Экспериментальные (I) и теоретические (II) зависимости времени развития неустойчивости от тока пучка при $u_d=1450$ (1), 1900 (2) и 2300 В (3).

Рис. 6. Зависимость удельного энерговклада от тока пучка при $u_d=1450$ (1), 1900 (2) и 2300 В (3).

Стрелками отмечен расчетный энерговклад. Штриховая кривая — энерговклад с учетом зависимости u_c от I_d (по формуле (5)).

и 900 В при $j_b \approx 50$ мкА/см². С учетом этого энерговклад можно оценить по формуле, полученной из (3)

$$w = N_0 T_0 C_p \ln \left(\frac{\tilde{u}}{u_d - u_c} \right), \quad (5)$$

где $\tilde{u} = (E/N)_{кр} N_0 L$, u_d — напряжение на разряде, L — длина разрядного промежутка. Такая зависимость лучше согласуется с экспериментом (рис. 6).

Для контроля однородности горения разряда проводилось фотографирование разрядного промежутка фотоаппаратом с открытым затвором при регулируемой длительности импульса напряжения, меньшей времени развития

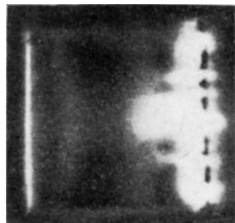


Рис. 7. Фотография разряда в неподвижной газовой смеси 10 % $H_2 + Ne$.

$p=1.4$ ата, $u_d=2200$ В, $J_b=200$ мкА/см², длительность разряда 300 мкс. Слева — катод, справа — анод. Пучок инжектируется через анод.

неустойчивости. Фотографирование показало, что существуют режимы, при которых свечение разряда сильно неоднородно вдоль тока и имеет структуру периодических неподвижных полос. Полосатая структура возникает в узком диапазоне приложенного электрического поля и более отчетливо выражена при давлении смеси больше атмосферного (рис. 7).

Подобные структуры наблюдались также в смесях $Ar-H_2$, $Ar-D_2$ [8]. Их образование связано с немонотонной зависимостью потока положительных

ионов Γ как функции электрического поля. Эта немонотонность обусловлена изменением соотношения концентраций электронов и ионов H^- за счет процессов прилипания к $H_2(v)$ (колебательно-возбужденным молекулам) и разрушения H^- при соударениях с $H_2(v)$ [3, 8]. Когда $\Gamma(E)$ немонотонен, дрейфовые уравнения для плазмы разряда совместно с уравнением Пуассона обладают периодическими решениями [8], соответствующими наблюдаемой полосатой структуре разряда. Поскольку перечисленные процессы остаются важными и для плазмы в смеси $He-H_2$, естественно перенести объяснение, данное в [8], на наш случай.

Анализ результатов исследования самостоятельного разряда в смесях H_2 с Ar и He позволяет сделать некоторые прогнозы о свойствах разряда в смесях H_2 с другими инертными газами Xe, Kr, Ne . Эти газы, имея в виду свойства разряда в смесях H_2-R , удобно классифицировать по энергии сродства к протону и потенциалам ионизации, энергии возбуждения электронных уровней. Не по этим параметрам ближе к He , а Xe и Kr — к Ar . Поэтому в смесях с Ne основным ионом будет, по-видимому, H_3^+ , а неустойчивость будет вызвана прямым возбуждением молекул H_2 . Энерговклады должны быть порядка энерговкладов в He смеси, а время развития неустойчивости при равных токах пучка меньше из-за большого тока разряда. В смесях с Xe, Kr по аналогии со смесью с Ar основными ионами будут XeH^+ и KrH^+ , а неустойчивость будет определяться возбуждением атомов Xe, Kr или атомов H . Энерговклады должны быть близки энерговкладам в смесях с Ar , а времена неустойчивости меньше из-за большего тока разряда.

Литература

- [1] Александров А. Ю., Басов Н. Г., Данилычев В. А. и др. Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 7, с. 413—416.
- [2] Басов Н. Г., Зворыкин В. Д., Ионин П. П. и др. Кр. сообщ. по физике, 1984, № 10, с. 53—57.
- [3] Демьянов А. В., Дятко Н. А., Кочетов И. В. и др. Физика плазмы, 1985, т. 11, № 3, с. 361—368.
- [4] Демьянов А. В., Дятко Н. А., Кочетов И. В. и др. Физика плазмы, 1986, т. 12, № 5, с. 623—631.
- [5] Вирин Л. П., Джагацпанян Р. В., Караченцев Т. В. и др. М.: Наука, 1979. 547 с.
- [6] Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974. 455 с.
- [7] Делькруа Ж.-Л., Ферейра К. М., Рикар А. В кн.: Плазма в лазерах / Под ред. Бекефия Дж. М.: Энергоиздат, 1982, с. 176—243.
- [8] Демьянов А. В., Кочетов И. В., Напартович А. П. и др. Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 14, с. 849—853.

Поступило в Редакцию
5 ноября 1986 г.