

ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СМЕСЕЙ H_2 (D_2) :He (Ar)

Н.Г. Басов, В.Д. Зворыкин, П.П. Ионин, А.И. Кипшакбаев, И.Б. Ковш, И.А. Леснов, А.П. Лыткин, В.И. Пантелеев, В.А. Соболев

УДК 621.373

Показано, что электроионизационное возбуждение смесей H_2 и D_2 с Ar и He при $T \leq 100$ К позволяет обеспечить устойчивый объемный энерговыход на уровне ≥ 100 Дж/л·Амага; эффективность колебательного возбуждения молекул составляет при этом 50-60% для смесей H_2 (D_2) :He и 70-80% для смесей H_2 (D_2) :Ar.

В 1972 г. в работе [1] был предложен эффективный электроразрядный лазер на колебательно-вращательных переходах основного электронного состояния молекулярного водорода и его изотопов. Теоретический анализ [2] показал, что для достижения высоких энергетических характеристик в водородном лазере необходимо реализовать удельный энерговыход $q \geq > 100$ Дж/л·Амага при глубоком охлаждении активной среды, причем уровень приведенной напряженности поля E/ρ в разрядном промежутке должен соответствовать эффективности колебательного возбуждения молекул η_v не ниже 50-60%. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию возможности выполнения этих требований при электроионизационном (ЭИ) возбуждении H_2 и D_2 и их смесей с He и Ar.

Энергетические характеристики ЭИ разряда в H_2 (D_2) и смесях H_2 (D_2) :He (Ar) изучались на трех различных установках, параметры которых указаны в табл. 1. Системы измерений аналогичны описанной в работе [3], ошибка измерений не превышала 15%.

Во всех исследованных режимах спад напряжения на разрядной емкости за время накачки не превышал 20%. Разряд имел чисто рекомбинационный характер, удельный энерговыход, квадратично увеличиваясь с ростом E/ρ , достигал 350 Дж/л·Амага для неохлаждаемой смеси H_2 :Ar — 1:3 и 150 Дж/л·Амага для смеси H_2 :He — 1:3 при $T = 100$ К. Энерговыход для смесей с D_2 при фиксированной плотности тока электронного пучка несколько выше, чем для смесей с H_2 , в соответствии с зависимостью эффективности ионизации от атомного веса.

Таблица 1.

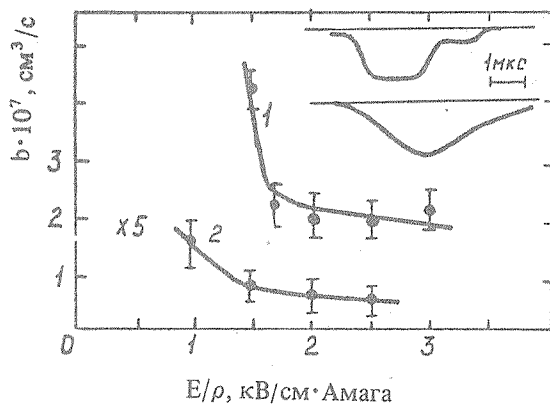
№ установки	V разряда*)	ρ , Амага	T_0 , К	τ_H , мкс	j_e , мА/см ²	E_e , кэВ
1	12 см ³ (ϕ 2,5 см·2,5 см) 1,2 л	0,5-7,5	80-300	2	800	1000
2	(3·5·80 см ³) 2 л	0,5-1	100-300	1,5	500	250
3	(3,6·3,8·150 см ³)	0,25-3	100-300	50-400	3-10	150

*) Разрядные промежутки "запирались" с боков диэлектрическими вставками, опирающимися на электроды /5/.

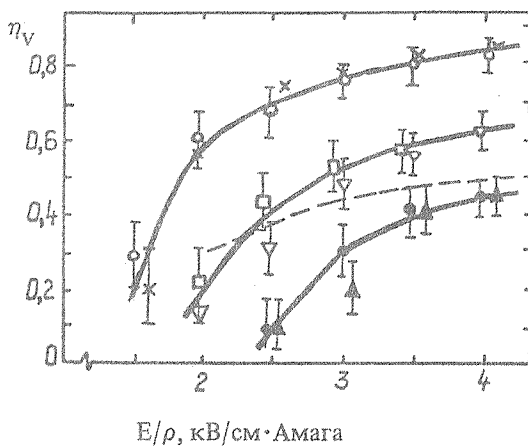
Анализ осциллограмм разрядного тока позволил определить величину коэффициента электрон-ионной рекомбинации b для использованных в эксперименте смесей (расчеты проводились по методике, изложенной в работе /3/, с использованием значений дрейфовой скорости электронов, приведенных в /4/). Полученные зависимости b от E/ρ и T_0 (рис. 1) качественно согласуются с литературными данными.

Эксперименты показали, что предельная величина E/ρ , при которой разряд остается объемным, уменьшается с ростом плотности и понижением температуры газовой смеси — так же, как и для активных сред ЭИ CO_2 - и CO -лазеров /5/, составляя в условиях установки 3 для смесей $\text{H}_2(\text{D}_2):\text{He}$ и $\text{H}_2(\text{D}_2):\text{Ar}$ с содержанием $\text{H}_2(\text{D}_2)$ 20-40% при плотности 1 Амага величину 3 кВ/см·Амага при $T = 100$ К и 4 кВ/см·Амага при 300 К.

Измерения эффективности колебательного возбуждения молекул H_2 и D_2 и их смесей с инертными газами в электрическом разряде проводились способом, основанным на регистрации скачка давления в разрядной камере при изохорическом ЭИ возбуждении газа /6/. На рис. 2 представлены измеренные зависимости η_v от E/ρ . Найденные в эксперименте значения η_v для H_2 при $E/\rho \geq 3,5$ кВ/см·Амага в пределах ошибки измерений совпадают с рассчитанными в работе /2/, расхождение с расчетом возникает лишь при малых E/ρ . Вычисленные в /2/ значения η_v для смесей $\text{H}_2(\text{D}_2):\text{He}(\text{Ar})$ очень близки к экспериментальным данным. Измеренные зависимости η_v от E/ρ и содержания инертного газа в смеси качественно согласуются с теоретическими: добавление He или Ar к $\text{H}_2(\text{D}_2)$ ведет к увеличению η_v при любом фиксированном E/ρ , что обуславливается повышением средней энергии электронов в



Р и с. 1. Зависимость коэффициента рекомбинации b от приведенной напряженности поля E/ρ , смесь $\text{H}_2:\text{He}-1:3$, $T_0 = 300$ К (1), 150 К (2). На врезке — осциллограммы импульсов тока электронного пучка (вверху) и основного разряда (внизу) для установки 1



Р и с. 2. Эффективность колебательного возбуждения молекул в электрическом разряде в H_2 (●), D_2 (▲), $\text{H}_2:\text{He}-1:3$ (▼), $\text{D}_2:\text{He}-1:3$ (□), $\text{H}_2:\text{Ar}-1:3$ (○), $\text{D}_2:\text{Ar}-1:3$ (×), штриховая линия — расчет для чистого H_2 [2]

разряде, величина η_v для смесей H_2 (D_2) с Ar выше, чем для смесей с He, из-за наличия резкого минимума в зависимости транспортного сечения электронов в Ar от энергии электронов при $\epsilon_e \cong 0,4$ эВ [2]. Измерения постоянной времени колебательно-поступательной релаксации показали, что для молекул H_2 и D_2 при всех условиях эксперимента $\tau_{VT} > 1,5 \cdot 10^{-3}$ с. Совпадение величин η_v для одинаковых смесей H_2 и D_2 с He и Ar позволяет предположить, что и для изотопа HD величина η_v должна быть близка к измеренной для H_2 и D_2 . Контрольные эксперименты со смесями $H_2:D_2$, содержащими в равновесных условиях небольшое количество HD, не обнаружили различий в величине η_v для смесей и для чистых H_2 и D_2 , а величина q соответствовала интерполяции данных для H_2 и D_2 . Пользуясь для оценки возможного коэффициента усиления a на переходе $(v=1, j=1) \rightarrow (v=0, j=2)$ молекулы HD тем же приближением пустого нижнего уровня, что и в работе [2], т. е. при $T \leq 100$ К $a \sim q\eta_v/\sqrt{T}$, где $T = T_0 + q(1 - \eta_v)/C_H$, C_H и T_0 — теплоемкость и начальная кинетическая температура рабочей газовой смеси), легко показать, что в рассмотренных условиях возбуждения максимальное значение a составляет $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ см $^{-1}$. Оно должно достигаться при удельном энергокладе 80-100 Дж/л·Амага в смесь HD:He—1:3 плотностью 1 Амага с начальной температурой 10-20 К, при этом должно быть $E/\rho > 3,5$ кВ/см·Амага, чтобы $\eta_v \cong 0,6$. Повышение q и T_0 приводит к уменьшению a из-за перегрева активной среды; при больших ρ трудно обеспечить устойчивость объемного разряда в требуемом диапазоне температур и напряженностей поля; использование смесей с Ar невозможно, так как для них начальная температура должна быть выше температуры сжижения Ar, и даже при сравнительно слабой накачке (100 Дж/л·Амага) конечная температура рабочей смеси оказывается равной 130-150 К.

Таким образом, ЭИ возбуждение смесей H_2 (D_2) с He(Ar) позволяет обеспечивать высокий уровень энергоклада. Получено 350 Дж/л·Амага при $T_0 = 300$ К и 150 Дж/л·Амага при $T_0 \cong 100$ К, и этот уровень может быть, несомненно, увеличен за счет использования обычных технических приемов — перехода к системам питания с "отсечкой" разрядного тока, повышения однородности и мощности ионизации и т. п. Для получения инверсии на колебательно-вращательных переходах основного электронного состояния молекулы H_2 (D_2 , HD) [2] оптимальным, по-видимому, является использование сравнительно слабого возбуждения ($q \cong 80$ -100 Дж/л·Амага) глубоко охлажденных гелиевых смесей ($T_0 \leq 20$ К). В этих условиях коэффициент усиления может достигать величины $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ см $^{-1}$.

Поступила в редакцию 14 июня 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Г. Басов, А.Н. Ораевский, А.Ф. Сучков, Письма в ЖЭТФ, **16**, 301 (1972).
2. Н.Е. Второва и др., Труды ФИАН, **116**, 7 (1980).
3. И.Б. Ковш, Кандидатская диссертация, ФИАН, 1975 г.
4. И. Мак-Даниель, Процессы столкновений в ионизованных газах. "Мир", М., 1967 г.
5. Н.Г. Басов и др., ЖТФ, **49**, 2629 (1979).
6. Н.Г. Басов и др., Препринт ФИАН № 292, М., 1983 г.