

О РЕЛАКСАЦИИ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ
ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОГО СВЧ РАЗРЯДА В АЗОТЕ

С. И. Грицинин, И. А. Косый, В. П. Силаков,
Н. М. Тарасова

УДК 533

Экспериментально исследован характер релаксации в азоте, колебательно возбужденном в импульсном СВЧ разряде при высоком давлении (100 - 800 торр) и относительно малом параметре E_e/N ($(1 - 5) \cdot 10^{-16}$ В·см²). Результаты проанализированы в рамках модели релаксации ангармонических осцилляторов.

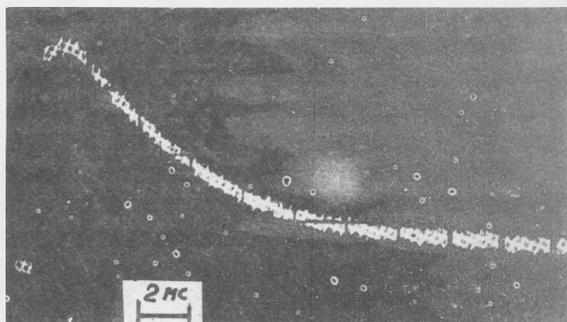
При решении задач оптимизации активных лазерных /1/ или плазмохимических /2/ газовых сред, создаваемых импульсными разрядами, приходится сталкиваться с проблемами динамики заселения колебательных состояний, а также релаксации колебательного возбуждения в условиях сильной неравновесности (колебательная температура T_v много больше поступательной T_g). Особую важность приобретают вопросы, связанные с нагревом газа (повышением поступательной температуры) как в течение импульсного разряда, так и после выключения накачки /3,4/.

Для изучения физических явлений в неравновесных газах был поставлен эксперимент, в котором - с целью исключения приэлектродных и пристеночных явлений - пробой производился в пучке импульсного СВЧ излучения сантиметрового диапазона и инициировался лазерной искрой. Длительность СВЧ импульса $\tau \leq 60$ мкс, давление азота варьировалось в пределах $100 \leq p \leq 800$ торр. Параметр E_e/N изменялся в пределах $(1-5) \cdot 10^{-16}$ В·см² (E_e - эффективная амплитуда электрического поля СВЧ излучения, N - начальное значение концентрации молекул газа).

Для наблюдения за населенностью уровня $v = 1$ использовался метод "следа" /5-7/, заключающийся в том, что в азот добавляется CO_2 с концентрацией столь малой, чтобы не влиять на процессы V - T релаксации молекул рабочего газа. Колебательное возбуждение с уровня H_2 ($v = 1$) резонансным V - V' обменом передается на уровень CO_2 ($00^0 1$), а спонтанное высвечивание в ИК диапазоне (4,3 мкм) при переходе $00^0 1 - 00^0 0$ регистрируется фотоприемником ФСТ-223. Наблюдаемый сигнал пропорционален населенности уровня CO_2 ($00^0 1$). Связь же ее с населенностью первого колебательного уровня рабочего газа определяется динамикой резонансного V - V' и внутримодового обменов.

Характерная осциллограмма сигнала в послеразрядный период представлена на рис. I. Отметим две области временного поведения сигнала. Первая - участок осциллограммы, где сигнал почти не изменяется ("плато"); вторая - спад сигнала, близкий к экспоненциальному с постоянной времени τ_p порядка нескольких миллисекунд. Длительность первой стадии может меняться в зависимости от условий эксперимента и места наблюдения в интервале 0-2 мс.

Если вторую стадию на осциллограмме рис. I приписать слабо-неравновесному состоянию, то в рамках теории Ландау - Теллера /8/ по постоянной времени спада сигнала можно оценить конечную (равновесную) температуру газа T_p . Для данного конкретного случая $T_p \approx 1300$ К. Такая температура может быть обеспе-



Р и с. I. Осциллограмма ИК сигнала в послеразрядный период

чена лишь при условии, что во время пробоя во внутренних степенях свободы газа запасена энергия, соответствующая среднему числу колебательных квантов на молекулу $\bar{v} \approx 1$, что отвечает начальной "температуре" первого уровня $T_1|_{t=0} \approx 2900$ К.

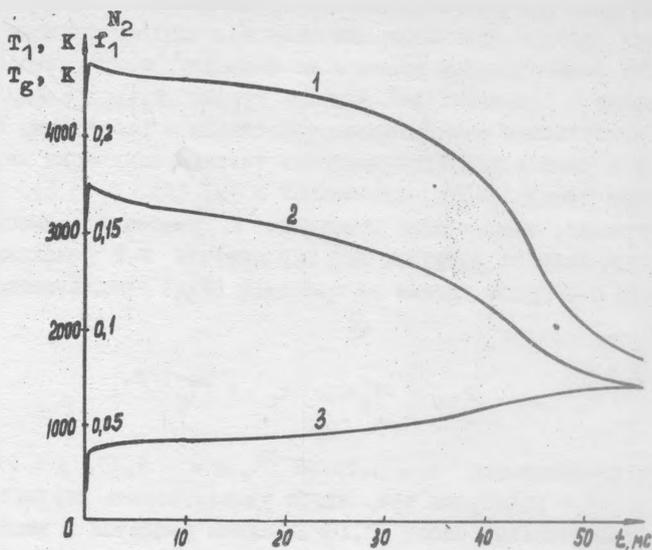
Результаты эксперимента сопоставим с расчетами, проведенными в рамках квазистационарной теории релаксации ангармонических осцилляторов, изложенной в /9/ (гл. 4, § 5). При этом уравнение, описывающее изменение \bar{v} , решается совместно с уравнением баланса энергии. Для вероятности v -г релаксации молекул азота с первого уровня на основной (P_{10}) предлагается аппроксимация:

$$P_{10} = \Delta T_g^\alpha \exp(\beta T_g^{-1} + \gamma T_g^{-1/3}), \quad (I)$$

где коэффициенты $\Delta = 1,77 \cdot 10^{-37}$, $\alpha = -4,17$, $\beta = 7334$, $\gamma = -565,9$ подобраны так, чтобы удовлетворить результатам экспериментальных работ /5,10/. Задача решается в изохорическом приближении.

Результаты численного решения для $T_{g_0} = 300$ К, $T_1|_{t=0} = 2900$ К приведены на рис. 2. Наряду с относительной населенностью первого колебательного уровня азота \bar{v}_1^2 на рисунке приведены также и расчетные значения параметров T_1 и T_g . Сравнение расчетного изменения \bar{v}_1^2 с видом характерной осциллограммы (рис. 1) свидетельствует об удовлетворительном качественном соответствии. Так же, как в эксперименте четко выражена область слабого изменения населенности и область почти экспоненциального спада. Вместе с тем очевидны и количественные расхождения. Так длительность "плато" в эксперименте оказывается существенно меньше расчетной, регистрируемый сигнал ИК излучения на второй стадии спадает к нулевому значению, а не к отличной от нуля константе и т.д.

Количественные отличия могут быть объяснены тем, что идеализированная расчетная модель не учитывает ряд факторов, проявляющихся в эксперименте. К последним следует отнести: а) наличие в рабочем газе примесей (H_2O , O_2 и др.), которые даже при весьма незначительном содержании могут оказать влияние на ход



Р и с. 2. Зависимость вычисленных значений $\bar{n}_1^{N_2}$ (1), T_1 (2) и T_g (3) от времени для $T_{g0} = 300$ К и $T_1|_{t=0} = 2900$ К.

процессов релаксации, б) газодинамические процессы, развивающиеся при быстром нагреве газа в области СВЧ разряда, в) нагрев газа в течение СВЧ импульса за счет нерезонансных процессов $\bar{v}-\bar{v}$ обмена на нестационарной стадии колебательного возбуждения /II/. Если справедливо последнее предположение, то весь процесс колебательного возбуждения азота может быть представлен, как формирование функции распределения $\bar{n}_1^{N_2}$ за время СВЧ импульса с сопутствующим ему нагревом газа. В послеразрядный же период за времена порядка 5–10 мс происходит релаксация возбужденного состояния, хорошо описываемая квазистационарной теорией, рассматривающей газ как систему ангармонических осцилляторов.

Поступила в редакцию
21 декабря 1982 г.

Л и т е р а т у р а

И. Б. Ф. Гордиец, А. М. Осипов, УФН, 108, 665 (1972).

2. В. Д. Русанов и др., УФН, 134, 186 (1981).
3. В. Ю. Баранов, В. Г. Низьев, С. В. Пигульский, Физика плазмы, 3, 1380 (1977).
4. В. Ю. Баранов и др., У Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы, Тезисы докладов, Киев, 1979 г., т. I, с. 61.
5. R. C. Millikan, D. R. White, J. Chem. Phys., 39, 98 (1963).
6. R. E. Center, J. F. Newton, J. Chem. Phys., 68, 3327 (1978).
7. А. П. Зуев, Б. К. Ткаченко, Изв. ВУЗов сер. Физика, № 6, 193, 84 (1978).
8. L. Landau, E. Teller, Phys. Z. Sow., 10, 34 (1936).
9. Б. Ф. Гордиец, А. И. Осипов, Л. А. Шелепин, Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры, "Наука", М., 1979 г.
10. M. A. Kovacs, IEEE J. of Quant. Electr., QE-9, 189 (1973).
11. К. В. Баиадзе и др., Физика плазмы, 5, 923 (1979).