

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА  
СМЕСИ ГЕЛИЯ С ПАРАМИ КАЛИЯ

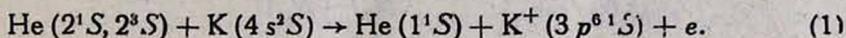
Г. Р. БАДАЛЬЯНЦ, В. О. ПАПАНЯН

Институт физических исследований АН АрмССР

(Поступила в редакцию 20 октября 1989 г.)

В положительном столбе тлеющего разряда чистого гелия и смеси измерены населенности синглетного и триплетного метастабильных уровней атомов гелия в зависимости от концентрации калия, давления смеси и разрядного тока. Показано, что существуют оптимальные значения параметров, при которых происходит эффективное заселение высоколежащих метастабильных уровней.

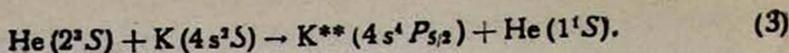
Интерес к разрядной плазме смесей инертных газов с парами щелочных металлов обусловлен возможностями ее использования для многих прикладных задач, в частности, в плазменной технологии и МГД-генераторах. Необходимость подробного исследования гелий-калиевой плазмы была вызвана предложенными и исследующимися, в последнее время, нелинейнооптическими методами преобразования лазерного излучения в дальний ультрафиолетовый диапазон спектра. При этом энергия накапливается на квазиметастабильных кватертных уровнях калия, например,  $3p^5 3d 4s^4 P_{5/2}$  которые являются начальными состояниями для комбинационного рассеяния [1, 2]. Эффективное возбуждение этих уровней осуществляется посредством столкновительной передачи энергии от  $2^1S$  и  $2^3S$  возбужденных метастабильных состояний атомов гелия. Сечения таких реакций оцениваются порядка  $10^{-14}$ — $10^{-16}$  см<sup>2</sup> [3]. Наряду с этим процессом, основным механизмом дезактивации метастабильных атомов гелия является пеннинговская ионизация атомов калия



Сечение этой реакции составляет порядка  $5,5 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup> [4]. К другим процессам дезактивации можно отнести диффузию атомов к стенкам трубки, дезактивацию в электронных и атомных столкновениях и т. д. Для эффективного использования гелий-калиевой разрядной плазмы в качестве нелинейной среды, при преобразовании лазерного излучения в дальний ультрафиолетовый диапазон спектра, необходима максимальная концентрация квазиметастабильных кватертных состояний атомов калия  $N_{**}$ . Ее можно оценить по элементарному балансу уравнению

$$N_{**} = \tau \langle \sigma v \rangle N_m n_k, \quad (2)$$

где  $\tau = 3,3 \cdot 10^{-7}$  с — время жизни квазиметастабильного уровня,  $\sigma \approx 10^{-16}$  см<sup>2</sup> — сечение его возбуждения в реакции



$N_m$  и  $n_k$  — концентрации метастабилей гелия и паров калия в основном состоянии, соответственно;  $v$  — приведенная тепловая скорость атомов. Увеличение концентрации паров калия в смеси приводит, согласно (2), к росту населенности  $N_{**}$ . Однако, с другой стороны при этом, вследствие процесса (1), растет ионизация, что вызывает падение напряженности электрического поля в плазме и уменьшает среднюю энергию электронов. Последнее приводит к падению концентрации метастабилей гелия. Таким образом, должны существовать оптимальные значения концентраций паров калия в разряде для различных величин напряженностей электрического поля. Эти значения можно получить используя результаты работы [5], в которой были теоретически исследованы процессы возбуждения и дезактивации атомов в стационарной разрядной плазме смеси гелия с калием. На рис. 1 приведена зависимость населенности  $N_{**}$  от содержания калия в смеси для различных напряженностей электрического поля  $E/N_0$ . Оптимальные значения величин относительных концентраций атомов калия в основном состоянии соответствуют максимумам кривых и могут быть оценены из соотношения

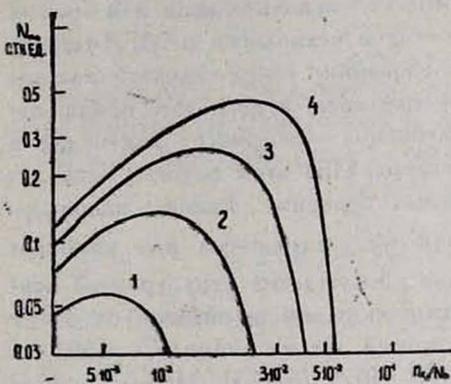


Рис. 1. Зависимость населенности квази-метастабильного высоколежащего уровня атома калия от относительной концентрации калия в смеси с гелием при различных значениях приведенной напряженности поля: 1 —  $E/N_0 = 10^{-15}$  В·см<sup>2</sup>; 2 —  $1,5 \cdot 10^{-15}$  В·см<sup>2</sup>; 3 —  $2 \cdot 10^{-15}$  В·см<sup>2</sup>; 4 —  $2,5 \cdot 10^{-15}$  В·см<sup>2</sup>.

$$\left(\frac{n_k}{N_0}\right)_{\text{опт.}} \sim 7 \cdot 10^{12} \left(\frac{E}{N_0}\right), \left[\frac{E}{N_0}\right] = B \cdot \text{см}^2, \quad (4)$$

где  $N_0$  — полная концентрация атомов в смеси.

В данной работе измерялись концентрации синглетных и триплетных метастабильных атомов гелия в положительном столбе стационарного тлеющего разряда в зависимости от относительных концентраций паров калия, давления смеси и разрядного тока.  $n_k/N_0$  изменялось в пределах от  $2,6 \cdot 10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-2}$  (давление паров калия — от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $5,3 \cdot 10^{-2}$  тор), полное давление смеси — от 1 до 4 тор, ток разряда — от 6 до 55 мА. При заданном токе напряженности электрического поля в положительном столбе измерялись с помощью зондов Ленгмюра и находились в интервале от 3 до 7 В/см. Предварительно измерялись вольт-амперные характеристики разряда как в чистом гелии, так и в смесях. Измерения производились в газоразрядной трубке радиусом 1,5 см из пирекса. Для удержания паров калия в центральной зоне она была сконструирована на основе

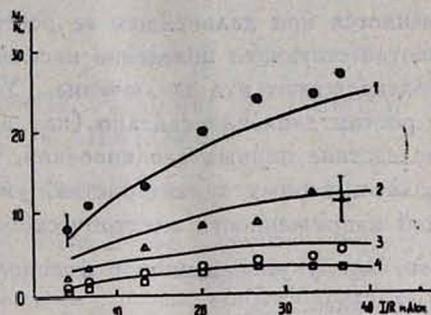
принципа тепловой трубы, средняя область трубки нагревалась, а ее края охлаждались проточной водой. Электроды из чистого алюминия цилиндрической формы помещались в отростках трубки таким образом, чтобы область трубки длиной  $l = 50$  см, в которой производились измерения, была заполнена только положительным столбом разряда. Регулятор температуры ВРТ-2 с термопарой, установленной на внешней стороне центральной части трубки, поддерживал температуру, необходимую для получения требуемых концентраций паров калия, которые дополнительно контролировались по интенсивности линии  $4045\text{Å}$  калия. Для исследования спектра излучения разряда использовались монохроматор МДР-2, фотоумножитель ФЭУ-106, микровольтмикроамперметр Ф116/2 и осциллограф С1-15. Измерения концентраций метастабилей гелия производились известным методом поглощения с одним зеркалом на линии  $5016\text{Å}$  для  $2^1S$  и  $3889\text{Å}$  для  $2^3S$  состояний гелия [16].

На рис. 2 приведены полученные зависимости населенностей  $2^3S$  метастабилей гелия  $N_T$  от отношения разрядного тока к радиусу трубки в

Рис. 2. Зависимость относительной концентрации триплетных метастабилей гелия,  $N_T/N_0$ , от разрядного тока в чистом гелии.

$$P = P \frac{273}{T} - \text{приведенное давление газа.}$$

Значения инвариантного параметра  $P_0 R$ :  
 $\bullet$  — 1,6 тор·см.;  $\Delta$  — 2,5 тор·см.;  $\circ$  — 3,7 тор·см.;  
 $\square$  — 5 тор·см. Теоретические кривые: 1 —  $P_0 R = 1,5$  тор·см.; 2 — 2 тор·см.; 3 — 3 тор·см.; 4 — 5 тор·см.



чистом гелии. На этом же графике даны теоретические кривые из работы [7]. Относительное поведение теоретических кривых хорошо совпадает с экспериментальными точками, а для согласования абсолютных величин концентраций метастабилей, вычисленных в [7], введен коэффициент 0,1. Уменьшение на порядок концентрации  $N_T$  по сравнению с расчетной, связано с отличием реального радиального распределения концентраций электронов и ионов по радиусу трубки от принятого в расчетах вида функции Бесселя нулевого порядка, а также, по-видимому, с недостаточной чистотой используемого газа.

Приведенные далее результаты относятся к измерениям в гелий-калевой плазме, для которой, к сожалению, отсутствуют соответствующие вычисления населенностей. Так, на рис. 3 приведены зависимости концентраций  $2^1S$  и  $2^3S$  метастабилей гелия от разрядного тока. Концентрация триплетов, как и в чистом гелии, растет с увеличением тока. Для синглетных метастабилей в области  $n_k/N_0 < 10^{-2}$  оказалось, что рост тока может приводить к их тушению. С ростом относительных концентраций калия населенность метастабилей падает вследствие пеннинговской ионизации (1). Для триплетных метастабилей это падение может быть компенсировано увеличением тока, т. е. интенсификацией процессов возбуждения. У синглетных метастабилей зависимость от тока почти не выражена (для чистого

го гелия согласно расчетам [7] при  $I/R > 1-2$  мА/см наблюдается насыщение и даже некоторый спад концентрации синглетных метастабилей). В смеси это падение  $N_c$  ярко выражено для малых концентраций калия  $n_k/N_0 < 10^{-2}$ .

Уменьшение населенностей метастабилей с ростом относительной концентрации паров калия подтверждается и кривыми на рис. 4. По данным расчетов работы [5] средняя кинетическая энергия электронов в разряде резко падает при увеличении  $n_k/N_0$  до значений  $(2-5) \cdot 10^{-2}$  (для разных величин напряженностей электрического поля) и практически не из-

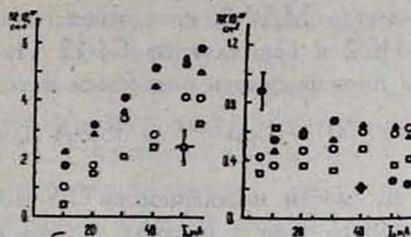


Рис. 3. Зависимости населенностей триплетного (а) и синглетного (б) метастабильных уровней гелия от разрядного тока. Относительная концентрация паров калия  $n_k/N_0$ : ● —  $0,8 \cdot 10^{-2}$ ; △ —  $1,2 \cdot 10^{-2}$ ; ○ —  $1,8 \cdot 10^{-2}$ ; □ —  $2,66 \cdot 10^{-2}$ .

меняется при дальнейшем ее росте. Такое изменение  $\bar{\epsilon}$  должно вызывать соответствующее поведение населенностей метастабилей. Наши измерения подтверждают это заключение. Уменьшение населенностей метастабилей с ростом давления связано (как и в чистом гелии) с ростом их тушения вследствие парных столкновений. С ростом  $P$ , как следует из измерений вольт-амперных характеристик, уменьшается также величина приведенной напряженности электрического поля  $E/N_0$ . Это приводит к соответствующему уменьшению  $\bar{\epsilon}$  и дополнительному падению концентраций метастабилей.

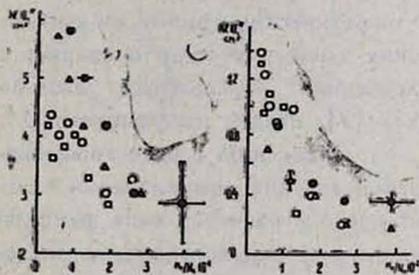


Рис. 4. Зависимости населенностей триплетного (а) и синглетного (б) метастабильных уровней гелия от  $n_k/N_0$  для различных давлений  $P$ : ● — 1,3 тора, △ — 2 тора, ○ — 3 тора, □ — 4 тора. Ток разряда: а)  $I=55$  мА, б)  $I=6$  мА.

Таким образом, в работе получены экспериментальные доказательства существования оптимального режима горения стационарного гелий-калиевого разряда, при котором концентрация метастабильных атомов имеет максимальное значение. Оптимальное значение относительной концентрации калия в смеси, при различных значениях напряженностей электрического поля в разряде, можно получить из формулы (4). Следует заметить, что при использовании положительного столба импульсного разряда, вместо стационарного, можно значительно увеличить населенность высоколежащих метастабильных уровней как атомов гелия, так и калия.

