

## К ВОПРОСУ О ПЕРЕНОСЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ГЕЛИИ

И. П. Богданова и В. Д. Марусин

Изучена зависимость от энергии возбуждающих электронов яркости излучения спектральных линий гелия с уровнями  $3^3D$  и  $4^3D$ , обусловленного процессом дополнительного заселения этих уровней. Наблюдается различие в ходе этой зависимости по сравнению с формой функции возбуждения уровня  $3^1P$  гелия.

При возбуждении гелия электронным пучком наблюдается дополнительное заселение уровней  $n^1D$ ,  $n^1S$ ,  $n^3P$ ,  $n^3D$  и  $n^3S$ , где  $n \geq 3$  [1-3], приводящее к зависимости формы функций возбуждения спектральных линий от давления гелия. С увеличением давления гелия на функциях возбуждения появляется побочный максимум в области энергий электронов 100 эв. Положение этого побочного максимума совпало с положением максимума на функциях возбуждения  $n^1P$ -уровней гелия, что позволило предположить, что дополнительное заселение обусловлено переносом энергии излучения от  $n^1P$ -уровней гелия за счет соударений 2-го рода, согласно реакции



Кей и Хьюгс [4], изучая длительность послесвечения линий гелия с уровня  $3^3D$ , высказали предположение, что возбуждение от уровней  $n^1P$  передается соседним  $F$ -состояниям, а с них уже каскадом попадает на состояния  $D$ .

Представлялось интересным экспериментально проверить, протекает ли вообще реакция (1). При возбуждении электронным пучком ход зависимости концентрации атомов на уровнях  $n^1P$  от энергии электронов будет совпадать с функцией возбуждения этих уровней. Поэтому принципиально проверка хода реакции может быть осуществлена следующим образом. Нужно выделить свечение какой-либо спектральной линии гелия, обусловленное только одним процессом дополнительного заселения уровня, с которого происходит излучение данной линии, и проследить зависимость хода ее интенсивности от энергии электронов, а затем сравнить с ходом функции возбуждения  $n^1P$ -уровня.

Как показали измерения [5], дополнительное излучение, о котором идет речь, имеет большую длительность послесвечения, чем радиационное время жизни данного состояния. В частности, для уровней  $3^3D$  и  $4^3D$  радиационные времена жизни равны 14 и 32 нсек., а длительность послесвечения, обусловленная дополнительным процессом заселения составляет величину 140, 260 и 600 нсек. При этом, как было показано авторами ранее [3], если электронную пушку открывать прямоугольными импульсами напряжения длительностью 1 мсек., то при давлении гелия  $2.4 \cdot 10^{-2}$  мм в послесвечении линий с  $3^3D$ -и  $4^3D$ -уровней наблюдается только длительность вторичного процесса (при энергии электронов  $\sim 100$  эв), а по величине дополнительное свечение более четырех раз превосходит электронное возбуждение. Таким образом, дополнительное заселение уровней  $3^3D$  и  $4^3D$  можно отделить от возбуждения электронным ударом, если наблюдать только послесвечение спектральных линий 587.6 нм ( $3^3D$ ) и 447.2 нм ( $4^3D$ ).

Измерения проводились на установке, схема которой подробно описана ранее [6]. Временная селекция излучения осуществлялась с помощью схемы ворот (рис. 1). На вход схемы поступали импульсы с ФЭУ, предварительно усиленные широкополосным усилителем. Туннельные диоды

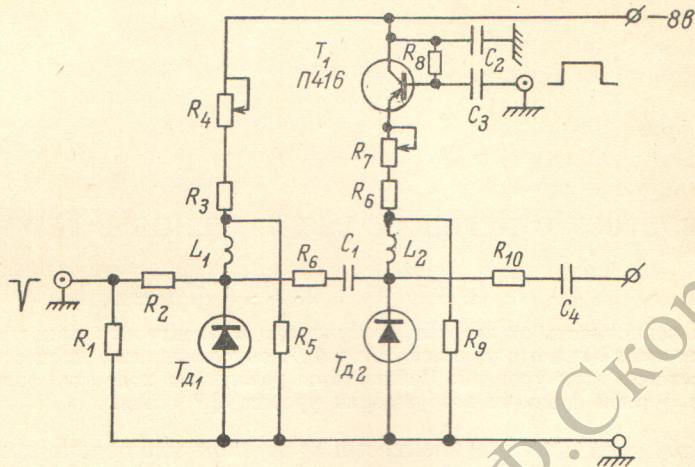


Рис. 1. Схема ворот.

$T_{Д1}$  и  $T_{Д2}$  формировали импульсы по длительности и амплитуде. В цепи туннельного диода  $T_{Д2}$  включен триод  $T_1$ , на вход которого подавались запирающие прямоугольные импульсы от генератора, синхронизованные по частоте следования с импульсами тока в трубке возбуждения. Варьируя длительность импульсов управления и задержку их относительно импульсов тока в трубке возбуждения, можно регистрировать излучение в любом желаемом интервале времени, например, только во время прохождения тока в трубке, либо интегральное послесвечение в промежутках между импульсами. Таким образом записывалась форма функций возбуждения линий 587.6 нм ( $3^3D$ ), 447.2 нм ( $4^3D$ ), а также 501.6 нм ( $3^1P$ ) в импульсе длительностью  $T_1=1$  мксек. (рис. 2, а, б) и в послесвечении (рис. 2, в, г). Давление гелия составляло  $2.0 \cdot 10^{-2}$  мм.

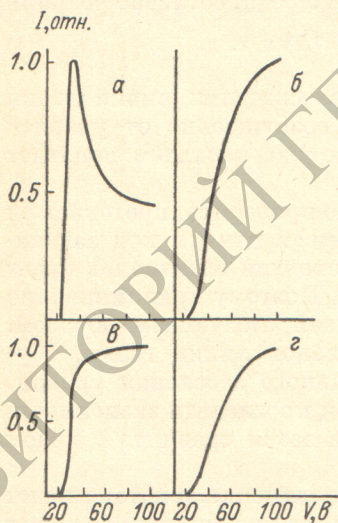


Рис. 2. Форма функций возбуждения.

а — 587.6 и 447.2 нм; б — 501.6 нм (в импульсе); в — 587.6 и 447.2 нм; г — 501.6 нм (в послесвечении).

Форма функций возбуждения в импульсе для всех трех линий совпадает с полученной ранее. В послесвечении форма функции возбуждения спектральной линии 501.6 нм такая же, как и в импульсе (рис. 2, б и г), а для спектральных линий 587.6 и 447.2 нм форма функций возбуждения в импульсе (рис. 2, а) и в послесвечении (рис. 2, в) различается. Кроме того, в послесвечении, как видно из сопоставления рис. 2, в и г, форма зависимости интенсивности свечения имеет различный ход от скорости электронов для линии 501.6 нм ( $3^1P$ ) и для линий 587.6 нм ( $3^3D$ ) и 447.2 нм ( $4^3D$ ). По-видимому, это обстоятельство свидетельствует о том, что дополнительное заселение уровней  $3^3D$  и  $4^3D$  в условиях возбуждения гелия электронным пучком определяется не только реакцией (1), а имеет еще и иную природу. Полученная форма зависимости интенсивности послесвечения линий 587.6 и 447.2 нм от скорости электронов ближе всего напоминает форму функции возбуждения метастабильного уровня гелия  $2^1S$ . А тогда встает вопрос о том, каким путем происходит возбуждение более высоких

уровней гелия как  $3^3D$ , и т. д. Если бы дополнительное возбуждение уровней с  $n \geq 2$  происходило ступенчатым путем из метастабильного состояния, то наблюдалась бы квадратичная зависимость величины его от концентрации электронов (т. е. от силы тока в пучке). Однако, как Маурер и Вольф [1], так и авторы настоящей работы, наблюдали линейную зависимость суммарной интенсивности спектральных линий гелия (электронное возбуждение + дополнительное возбуждение) от силы тока в пучке. Тем не менее был поставлен еще один контрольный опыт, который заключался в следующем. Возбуждение гелия при давлении  $2.0 \cdot 10^{-2}$  мм производилось прямоугольными импульсами длительностью  $T_1 = 1$  мксек. Энергия возбуждающих электронов в импульсе была равна  $50 \div 70$  эв. После обрыва импульса проводилось измерение спада послесвечения спектральных линий гелия 587.6 и 447.2 нм методом задержанных совпадений. Затем вплотную к заднему фронту возбуждающего импульса подавался второй прямоугольный импульс напряжения не выше 20 эв и  $T_2 = 1$  мксек. так, что прямым электронным ударом уровень  $3^3D$  гелия во втором импульсе возбуждаться не мог. Ток в пучке во втором импульсе изменялся мало по сравнению с тем, что имело место в первом импульсе. В этих условиях снова измерялся спад послесвечения после обрыва первого импульса. Однако не было обнаружено никаких изменений в ходе спада послесвечения по сравнению с возбуждением одним импульсом, т. е. не было обнаружено никакого дополнительного возбуждения уровня  $3^3D$  за счет ступенчатого возбуждения из метастабильного состояния гелия  $2^1S$  или  $2^3S$  электронами пучка.

Однако в пользу того, что дополнительное заселение уровней  $3^3D$  и  $4^3D$  и т. д. осуществляется сложным путем, говорят и масс-спектрометрические измерения в гелии, из которых вытекает, что при энергии 30 и 70 эв существуют различные механизмы образования молекулярных ионов гелия [7]. Эти измерения проводились в той же области давлений, что и описываемые в настоящей работе. Авторы наблюдали при энергии 70 эв появление молекулярных ионов гелия, которые могли возникнуть лишь за счет следующей (предложенной ими) цепи реакций:

1.  $He + e \rightarrow He^* + e$  (возбуждение электронным ударом);
2.  $He^* + He \rightarrow HeHe^*$  (образование молекулярного соединения);
3.  $HeHe^* + He \rightarrow He_2^+ + He + e$  (перевод молекулярного соединения в молекулярный ион).

Следовательно, появление молекулярного иона должно квадратично зависеть от давления гелия. При энергии электронов 30 эв такой цепи реакций не наблюдается.

Из третьего этапа реакции следует, что молекулярный ион возникает в результате разрушения некоего молекулярного образования  $HeHe^*$  за счет соударения с нормальным атомом гелия. При изучении же дополнительного заселения  $3^3D$ ,  $4^3D$  и др. уровней оптическим методом наблюдение ведется за вторым этапом реакции, т. е. за этапом образования  $HeHe^*$  и последующим распадом его на  $He$  ( $3^3D$  и т. д.) +  $He$ , т. е. ход реакции должен быть таким:

2.  $He^* + He \rightarrow HeHe^* \rightarrow He^{**} + He$  (оптические измерения);<sup>1</sup>
3.  $HeHe^* + He \rightarrow He_2 + He + e$  (масс-спектрометрические измерения).

Это означает, что выход дополнительного излучения, наблюдавшегося в настоящей работе, при отсутствии третьего этапа должен линейно зависеть от давления гелия, так как число образовавшихся молекулярных соединений  $HeHe^*$  будет пропорционально давлению гелия. С повышением давления гелия начинает сказываться третий процесс, т. е. разрушающее действие на молекулярное образование столкновений с нормальными атомами гелия. Экспериментально именно такая зависимость от давления и наблюдается. До давлений гелия  $3 \cdot 10^{-2}$  мм имеет место линейный ход, а при давлениях более высоких прирост дополнительного свечения замедляется, стремится к насыщению [3].

<sup>1</sup> Под  $He^{**}$  понимается состояние  $He$ , отличное от  $He^*$ .

Ответ на вопрос о том, как образуется молекулярное соединение, распадающееся затем на нормальный атом и возбужденный в состоянии  $n^3D$ ,  $n^1D$  и т. д., пока однозначно дать нельзя. Можно лишь высказать некоторые предположения, опираясь на имеющиеся экспериментальные данные. Возможно, например, образование чрезвычайно слабо связанных пар He—He в нормальном состоянии, которые затем и возбуждаются электронным ударом, образуя возбужденные молекулярные состояния, которые распадаются по схеме, рассмотренной выше.

В заключение авторы выражают благодарность С. Э. Фришу за внимание к работе и обсуждение результатов.

#### Литература

- [1] W. Mauger, R. Wolf. *Z. Phys.*, **92**, 100, 1934; **115**, 410, 1940.
- [2] R. M. St. John, Tsu Wei Nee. *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 426, 1965.
- [3] И. П. Богданова, В. Д. Марусин. *Опт. и спектр.*, **28**, 645, 1970.
- [4] R. Kay, R. Hughes. *Phys. Rev.*, **154**, 61, 1967.
- [5] W. R. Pendleton, R. Hughes. *Phys. Rev.*, **138A**, 683, 1965.
- [6] И. П. Богданова, В. Д. Марусин. *Опт. и спектр.*, **20**, 209, 1966.
- [7] J. S. Dahler, J. L. Franklin, M. S. B. Munson, F. H. Field. *J. Chem. Phys.*, **36**, 3332, 1962.

Поступило в Редакцию 23 июня 1971 г.