

ЭЛЬ ДЕССУКИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАСЕЛЕННОСТИ УРОВНЕЙ

Интерференческим методом и методом зондов исследована заселенность атомных уровней неона в чистом неоне и в гелий-неоновой смеси. Получены данные о заселенности ряда уровней неона в зависимости от тока разряда, давления, примеси гелия и электронной температуры. Обнаружено значительное влияние отрицательной дисперсии на заселенность уровней неона.

Явление отрицательной дисперсии [1—4], которая возникает при прохождении света через возбужденное вещество, представляет очень большой интерес как для изучения процессов, связанных с квантовыми переходами, так и для определения соответствующих сил осцилляторов. Исследования аномальной дисперсии в возбужденных газах проводились многими авторами [5—9], но они, как обычно, пренебрегали отрицательной дисперсией.

В настоящей работе измерены заселенность каждого уровня $2p^53s_x$ и $2p^53p_y$ неона по методу крюков Рождественского с учетом отрицательной дисперсии и относительной интенсивности эмиссионных спектральных линий, а также по электрическим измерениям.

Спектроскопические измерения

Относительная интенсивность спектральных линий и заселенность уровней измеряется с помощью следующего отношения:

$$\frac{N_k}{N_n} = \frac{I_{km}}{I_{nm}} \frac{\lambda_{km} A_{nm}}{\lambda_{nm} A_{km}}, \quad (1)$$

где I_{km}/I_{nm} — относительная интенсивность спектральных линий, N_k и N_n — концентрации возбужденных атомов на верхнем уровне k и на верхнем уровне n ; индексом m обозначен нижний уровень. Число дисперсионных центров $R\Delta_{mn}$ и заселенность уровней определяются по методу крюков путем измерения расстояния между вершинами крюков ($2\Delta_{mn}$), расположенными по обе стороны от линии поглощения λ_{mn} (рис. 1). Величина R вычислена по формуле

$$R = f_{mn} N_n \left(1 - \frac{g_m N_n}{g_n N_m} \right) = \frac{\pi m_0 c^2 K_{mn}}{L e^2 \lambda_{mn}^3} (2\Delta_{mn})^2, \quad (2)$$

где m_0 и e — масса и заряд электрона, f_{mn} — сила осциллятора для перехода $m \rightarrow n$, g_m и g_n — статические веса верхнего и нижнего уровней, L — длина положительного столба разряда.

Для того чтобы изменить величину k_{mn} , достаточно сфотографировать наклонные интерференционные полосы, получающиеся в спектрографе при введении в интерферометр компенсационной пластинки, и измерить число полос x , укладываемых в интервале $\Delta\lambda$, посредине которого находится λ_{mn} .

Тогда

$$k_{mn} = \frac{x\lambda_{mn}}{\Delta\lambda}. \quad (3)$$

Для k и n уровней уравнение (2) может быть записано в виде

$$\frac{R_{km}}{f_{mk}} = (N_m - \beta_1 N_k) = \alpha_1, \quad (4)$$

$$\frac{R_{nm}}{f_{mn}} = (N_m - \beta_2 N_n) = \alpha_2, \quad (4')$$

где

$$\beta_1 = \frac{g_m}{g_k} \quad \text{и} \quad \beta_2 = \frac{g_m}{g_n}.$$

Отсюда имеем

$$\frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{N_n} = \beta_2 - \beta_1 \frac{N_k}{N_n}. \quad (5)$$

Из формул (1) и (5) можно определить абсолютную заселенность уровней N_k , N_n и N_m с учетом отрицательной дисперсии. Для того чтобы сделать более уверенно интерпретацию полученных экспериментальных результатов, наряду со спектроскопическими измерениями проводились измерения электронной температуры по методу зондов.

Исследования оптико-спектральных характеристик положительного столба разряда в неоне и в смеси гелия и неона проводились в разрядной трубке диаметром 4 мм и длиной 100 см. Длина положительного столба разряда была 91 см. Измерения велись в видимой (красной-желтой) части спектра. Как уже сказано, заселенность верхних и нижних уровней неона $2p^53s_x$ и $2p^53p_y$ находилась по интерферометрическому методу (метод крюков) и относительной интенсивности спектральных линий. При вычислении концентрации возбужденных атомов мы пользовались значениями сил осцилляторов, приводимыми в работе [10].

Все оптические измерения выполнялись с помощью двухлучевого интерферометра Майкельсона, скрещенного со спектрографом ИСП-51, с автоколлимационной камерой УФ-85. Величина обратной дисперсии спектрографа равнялась 9,3 Å/мм в красной области спектра. Относительная интенсивность спектральных линий измерялась микрофотометрическим методом.

Для освещения интерферометра использовался импульсный источник белого света большой яркости. Источник представляет собой искро-

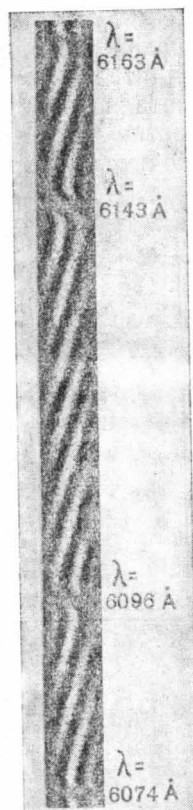


Рис. 1. Фотография крюков около линии неона

вой разряд между электродами специальной формы. Один электрод был медный ($\phi = 50$ мм) в виде пластинки с узким круглым отверстием, второй — железный в виде стержня с коническим концом. Оба электрода были смонтированы в специальном держателе. Питание разряда осуществлялось от высоковольтного конденсатора большой емкости. Зажигание разряда производилось принудительным образом с помощью дополнительного разряда. Возникающие при разряде возбужденные пары металла электродов и сильно нагретый воздух выбрасываются из отверстия медного электрода в виде быстрой струи плазмы, дающей исключительно яркий свет, имеющий сплошной спектр.

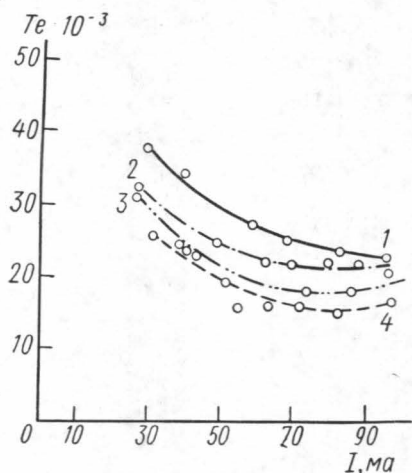


Рис. 2. Зависимость электронной температуры T_e газа Ne и смеси Ne+Ne от разрядного тока: 1 — Ne=2,5; 2 — Ne=5; 3 — смесь 2,3 и 4 — смесь 8,6 мм рт. ст.

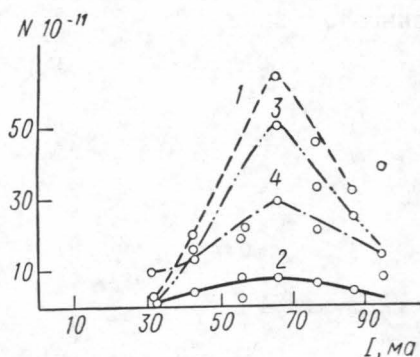


Рис. 3. Зависимость заселенности верхних уровней неона ($N_{p=5}$ мм рт. ст.) $2p^53ru$ от разрядного тока в смеси Ne+Ne: 1 — $(p_3)^3p_1$, 2 — $(p_4)^3p_2$, 3 — $(p_5)^1p_1$, 4 — $(p_6)^1D_2$

Параллельно с оптическими измерениями в тех же условиях разряда методом зондов измерялась электронная температура T_e разряда. Для этого в трубку впаивался молибденовый зонд диаметром 0,1 мм, длиной 2 мм, зонд располагается в центре трубки по ее оси. Электронная температура находилась из зондовой характеристики [11, 12]. Электронная температура T_e измерялась для разных токов разряда, разных давлений и разных смесей. Результаты измерения приведены на рис. 2. С увеличением давления газа или тока разряда электронная температура T_e падает как в чистом неоне, так и в смеси гелия и неона. Добавление гелия к неону уменьшает электронную температуру разряда. Эти результаты хорошо согласуются с результатами других авторов [13].

Измерение концентрации возбужденных атомов

Результаты измерения концентрации возбужденных атомов неона на уровнях $2p^53sx$ и $2p^53ru$ в чистом неоне и в смеси гелия и неона приведены на рис. 3—5 и в таблицах.

Величина $\left(\frac{g_m}{g_n} \cdot \frac{N_n}{N_m}\right)$ на уровнях $2p^53ru$ неона не является малой. Во многих случаях она равна половине или больше половины. На рис. 3 и 4 приведены зависимости концентрации возбужденных атомов на

верхних уровней неона в зависимости от силы разрядного тока и давления газа. Концентрация атомов на уровнях 3p_1 , 1p_1 и 1D_2 увеличивается в два раза и больше с увеличением давления от 2,5 до 5 мм рт. ст. Но концентрация атомов на уровне 3p_2 (нижний уровень генерации неона $3S_2-2p_4$, $\lambda=6328 \text{ \AA}$ и $2S_2-2p_4$, $\lambda=11523 \text{ \AA}$) уменьшается на половину с увеличением давления неона. При добавлении гелия ($p=8,6 \text{ мм рт. ст.}$) при постоянном отношении в смеси концентрации воз-

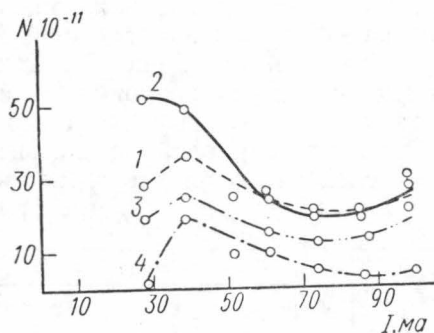


Рис. 4. Зависимость заселенности верхних уровней неона $2p^53pu$ от разрядного тока в чистом неоне ($\text{Ne-Ne-}p=4,3 \text{ мм рт. ст.}$): 1 — $(p_2)^3p_1$, 2 — $(p_4)^3p_2$, 3 — $(p_5)^1p_1$, 4 — $(p_6)^1D_2$

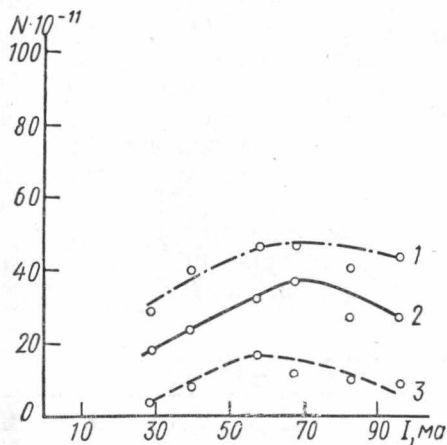


Рис. 5. Зависимость заселенности нижних уровней неона $2p^53sx$ от разрядного тока в чистом неоне ($\text{Ne-}p=2,5 \text{ мм рт. ст.}$): 1 — $(S_5)^3p_2^0$, 2 — $(S_4)^3p_1^0$, 3 — $(S_3)^3p_0^0$

бужденных атомов на уровнях 3p_1 , 3p_2 , 1p_1 и 1D_2 уменьшаются больше, чем в два раза по сравнению с чистым неоном при давлении $p=5 \text{ мм рт. ст.}$ Если отношение смеси гелия к неону постоянно, но общая плотность смеси увеличивается (p от 4,3 до 8,6 мм рт. ст.), то заселенность уровней уменьшается. Особенно падает заселенность уровня 3p_2 . На рис. 5 показана зависимость от силы тока в чистом неоне и концентрация возбужденных атомов на нижних уровнях неона. С увеличением давления неона от 2,5 до 5 мм рт. ст. заселенность метастабильных уровней $^3p_0^0$ и $^3p_2^0$ увеличивается, в то время как заселенность резонансного уровня $^3p_1^0$ уменьшается. При добавлении гелия к неону ($p=4,3 \text{ мм рт. ст.}$) заселенность всех уровней $^3p_0^0$, $^3p_1^0$ и $^3p_2^0$ увеличивается. При большем давлении смеси ($p=8,6 \text{ мм рт. ст.}$), но при сохранении концентраций гелия и неона концентрация атомов на метастабильных уровнях $^3p_0^0$ и $^3p_2^0$ уменьшается по сравнению с чистым неоном при давлении $p=5 \text{ мм рт. ст.}$ Заселенность резонансного уровня $^3p_1^0$ при этом мало изменяется. При увеличении плотности смеси от 4,3 до 8,6 мм рт. ст. концентрация атомов на уровнях $^3p_0^0$, $^3p_1^0$ и $^3p_2^0$ уменьшается по сравнению с таковой при давлении смеси $p=4,3 \text{ мм рт. ст.}$

Обсуждение результатов

При стационарности процесса заселенность каждого уровня определяется из условия равенства числа актов возбуждения числу атомов разрушения в единицу времени [14].

Заселение уровней происходит в основном за счет прямого и ступенчатого возбуждения при соударениях 1-го рода с электронами, переходов между уровнями за счет соударений 2-го рода с атомами, спонтанных переходов с более высоких уровней поглощения излучения.

Разрушение уровней в основном происходит за счет спонтанного излучения, перехода на более высокие уровни при соударениях 1-го рода с электронами, перехода между уровнями за счет соударений 2-го рода с электронами и атомами, тройных столкновений и столкновений со стенками. При увеличении давления происходит сильное изменение распределения электронов по скоростям, что эквивалентно соответствующему изменению электронной температуры T_e , которая падает с ростом давления (см. рис. 2). При этом на кривых, изображающих заселенность уровней энергии атомов неона, обнаруживаются хорошо выраженные максимумы при возрастании давления (см. рис. 3). Как показано в работе [15], в полном соответствии с диффузионной теорией положительного столба газового разряда, наличие гелия в гелий-неоновой смеси приводит к увеличению градиента потенциала, вследствие чего возрастает средняя электронов и, следовательно, вероятность

Таблица 1

Уровень, $2p^33p_{ru}$	$p=2,5$ мм рт. ст.						$p=5$ мм рт. ст.						
	Ток, ма												
	29	40	58	68	83	96	32	43	56	66	77	87	95
3p_1 (p_2)	1,9	12,8	33,0	19,0	18,1	6,7	0,8	20,4	23,1	63,1	46,3	31,7	38,6
3p_0 (p_3)	2,5	3,8	4,9	7,9	4,7	—	3,8	0,7	1,5	0,9	2,6	1,9	0,3
3p_2 (p_4)	9,2	13,0	19,5	30,1	17,0	4,3	2,3	3,9	2,2	8,0	6,2	4,0	7,9
1p_1 (p_5)	1,4	9,0	25,8	15,6	12,3	4,6	0,5	14,2	18,8	50,5	33,8	24,4	26,6
1D_2 (p_6)	9,2	16,6	6,3	5,6	3,9	—	10,4	13,4	7,1	29,3	21,0	2,0	25,6
3D_1 (p_7)	2,5	10,0	27,5	13,8	1,9	1,6	2,3	3,2	2,4	0,7	2,1	0,4	0,4
3D_2 (p_8)	8,4	17,4	21,9	18,9	9,7	9,8	9,4	17,6	21,1	25,5	25,3	25,3	25,1
3D_3 (p_8)	2,6	5,9	7,3	6,2	3,1	—	3,1	5,0	6,8	8,7	8,2	9,9	8,3

$N \cdot 10^{-11}$, $см^{-3}$

Таблица 2

Уровень, $2p^33p_{ru}$	$p=4,3$ мм рт. ст.						$p=8,6$ мм рт. ст.							
	Ток, ма													
	28	39	52	61	74	86	98	32	41	52	59	72	81	96
3p_1 (p_2)	28,0	36,8	18,5	24,8	20,2	21,5	27,6	14,7	26,2	21,4	7,5	8,2	1,3	1,0
3p_0 (p_3)	13,6	13,4	18,7	6,6	5,0	5,3	8,0	5,7	1,0	3,3	1,9	0,8	0,4	0,6
3p_2 (p_4)	51,1	48,9	24,4	25,0	20,3	20,2	29,5	0,1	3,7	3,4	0,7	1,4	1,4	3,3
1p_1 (p_5)	20,0	25,3	2,6	15,8	12,7	14,9	21,1	11,0	18,5	17,4	5,7	4,0	0,9	0,7
1D_2 (p_6)	0,5	19,9	10,0	10,6	5,3	3,1	4,1	1,9	12,5	11,7	2,2	4,6	4,9	11,0
3D_1 (p_7)	3,9	1,3	1,1	1,1	3,1	1,7	3,4	5,9	3,1	4,1	7,4	4,3	3,0	2,6
3D_2 (p_8)	6,4	19,4	8,5	8,9	17,7	12,8	11,2	25,9	21,3	17,6	13,2	13,7	3,7	0,8
3D_3 (p_9)	2,1	5,6	2,8	2,8	5,8	3,9	3,5	8,6	7,4	5,9	4,6	4,8	1,1	0,3

Смесь гелия и неона (процент гелия в смеси равен 42%), $N \cdot 10^{-11}$, $см^{-3}$

прямого и ступенчатого возбуждения энергетических уровней He и Ne электронным ударом. Это иллюстрируют данные рис. 4. Уменьшение концентрации возбужденных атомов неона при давлении смеси

$p=8,6$ мм рт. ст. по сравнению с чистым неоном при давлении $p=5$ мм рт. ст. может происходить благодаря отклонению распределения электронов по энергиям от максвелловского, а также изменения плотности газа и электронной температуры [16, 17], при увеличении давления ($p > 5$ мм рт ст.)

Поведение уровня $2p^5 3p^3 p_2(p_4)$ существенно отличается от поведения других уровней. Это объясняется тем, что уровень p_4 является нижним уровнем для переходов $3S-2p_4$ и $2S_2-2p_4$, на которых возникают генерации на длинных волнах 6328 Å и 11 523 Å. Естественно ожидать, что и при отсутствии генерации стимулированные переходы будут способствовать заселению уровня $2p_4$, если уровни $3S_2$ и $2S_2$ будут сильно заселяться, что и происходит при добавлении гелия. Сказанное иллюстрируется данными рис. 4. Разумеется этот фактор имеет решающий перевес только в определенных условиях давлений и токов.

Проведенные исследования показали, что влияние отрицательной дисперсии при измерениях заселенности уровней неона $2p^5 3p^3 p_2$ не является малым и им нельзя пренебрегать. Это позволяет утверждать, что при исследованиях заселенностей уровней и сил осцилляторов оптическими методами в возбужденных газах и парах влияние индуцированных радиационных эффектов должно приниматься во внимание, если желают получить прецизионные результаты.

В заключение автор приносит сердечную благодарность проф. Ф. А. Королеву за неизменное внимание к работе, обсуждение результатов и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ladenburg R. Zeits für Phys., **48**, 15, 1928.
2. Ladenburg R., Koplerman H. Zeits für Phys., **48**, 26, 1928.
3. Ladenburg R., Koplerman H. Zeits für Phys., **48**, 51, 1928.
4. Ladenburg R. Rev. Mod. Phys., **5**, 243, 1933.
5. Пеккин Н. П. «Оптика и спектроскопия», **2**, 545, 1957.
6. Шухтин А. М. «Оптика и спектроскопия», **7**, 838, 1959; **10**, 436, 1961.
7. Шухтин А. М., Егоров В. С. «Вестн. Ленингр. ун-та», № 16, 61, 1959.
8. Егоров В. С., Козлов Ю. Г., Шухтин А. М. «Оптика и спектроскопия», **15**, 6, 839, 1963.
9. Егоров В. С., Козлов Ю. Г., Шухтин А. М. «Оптика и спектроскопия», **17**, 154, 1964.
10. Wiese W. L., Smith M. W., Glennon B. M. Atomic transition probabilities, vol. I, NBS, Washington, 1966.
11. Захарова В. М., Коган Ю. М. «Оптика и спектроскопия», **1**, 627, 1956.
12. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. М., 1969.
13. Young R. T., Willbitt C. S., Maupin R. T. J. Appl. Phys., **41**, 2936, 1970.
14. Фриш С. Э. «Успехи физических наук», **61**, 461, 1957.
15. Francis G. Handbuch Physik, **22**, Berlin, 1956.
16. Golubowsky Ju. B., Kagan Ju. M., Michel P., Nesterowa L. L. Beitr plasmaphys., **9**, 217, 1969.
17. Golubowsky Ju. B., Kagan Ju. M., Ljagustschenko R. J., Michel P. Beitr plasmaphys., **10**, 265, 1970.

Поступила в редакцию
8.9 1972 г.

Кафедра
электроники