

Обнаружение обмена магнитной когерентностью между термами неона, индуцированного собственным излучением разряда, и влияния пленения излучения на время жизни скрытого выстраивания

Э. Г. Сапрыкин, С. Н. Селезнев⁺, В. А. Сорокин⁺

Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

⁺*Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН 630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 8 июля 2002 г.

Исследован дихроизм газоразрядной плазмы неона в слабых магнитных полях при зондировании перехода $3s_2-2p_4$ монохроматическим лазерным излучением. Выделены оптико-магнитные резонансы собственного макроскопического и скрытого выстраивания уровня $2p_4$. На их фоне обнаружены резонансы, обусловленные переносом когерентности с уровней $1s_{2,4,5}$ и двулучепреломлением крыльев ближайших линий поглощения с уровнями $1s_{4,5}$. Зарегистрирован новый тип выстраивания – интегральное скрытое выстраивание с временем жизни, увеличивающемся с ростом пленения излучения без ограничения, имеющего место при пленении макроскопического выстраивания.

PACS: 33.55.-b, 42.50.Gy

1. Процессы столкновительного и радиационного переносов населенности и когерентности играют важную роль в формировании излучательных характеристик газоразрядной плазмы. Лазерное излучение расширило возможности их изучения. Так в [1, 2] лазерным методом был исследован перенос населенности при неупругих столкновениях с атомами и электронами. Первое обнаружение столкновительного переноса нелинейных резонансов [3] показало возможность существенного изменения скорости атомов при их неупругом рассеянии на электронах. В газовом разряде существенную роль играют и процессы радиационного переноса, индуцированные его излучением. Реабсорбция излучения дает вклад в скорость распада метастабилей. В некоторых условиях этот процесс оказывается более важным, чем неупругие переходы при столкновениях с электронами [4]. Следует ожидать, что излучение разряда может осуществлять и перенос когерентности зеемановских подуровней. Идея о переносе когерентности с метастабильного уровня $1s_5$ “вверх” на $2p$ -уровни неона проверялась в опытах с регистрацией спонтанного излучения [5]. Однако оптикомагнитные резонансы (ОМР) с узкими ширинами обнаружены не были. Целью нашей работы было обнаружение переноса магнитной когерентности (выстраивания) уровней в неоне лазерным методом.

2. Эксперимент описан в [6, 7]. Разрядная трубка (диаметр 4 мм, длина 40 см, ток 80 мА), охлаждаемая

водой, помещалась в поперечное сканируемое магнитное поле. Для регистрации выстраивания уровня $2p_4$ переход $3s_2-2p_4$ зондировался слабым лазерным излучением круговой поляризации. Измерялась разность интенсивностей линейных компонент излучения, параллельных и ортогональных магнитному полю (дихроизм). Использовался метод производной (частота девиации – 400 Гц, амплитуда – 0.1 Гс) и накопление сигнала (~ 15 мин). Лабораторные магнитные поля компенсировались, а их остаточное влияние учитывалось при обработке. Образцы обработанных спектрограмм приведены на рис.1, а схема переходов – на рис.2.

Визуально ОМР содержит узкую и широкую компоненты. Однако в его образовании участвует много факторов. Во-первых, это выстраивание уровня $2p_4$ излучением на переходах $2p_4-1s_j$. Во-вторых, это индуцированный перенос выстраивания с уровнями $1s_{2,4,5}$. В-третьих, выстраивание состоит из макроскопического (МВ), обусловленного анизотропией выстраивающего излучения или частиц в лабораторной системе координат, и скрытого (СВ), обусловленного анизотропией в системе координат движущегося атома, индуцированной изотропной компонентой этого же излучения и анизотропными столкновениями (АС) [8, 9]. МВ и СВ релаксируют по-разному и, следовательно, по-разному влияют на контур общего ОМР. Наконец, из-за наличия остаточного паразитного магнитного поля (~ 0.05 Э) в

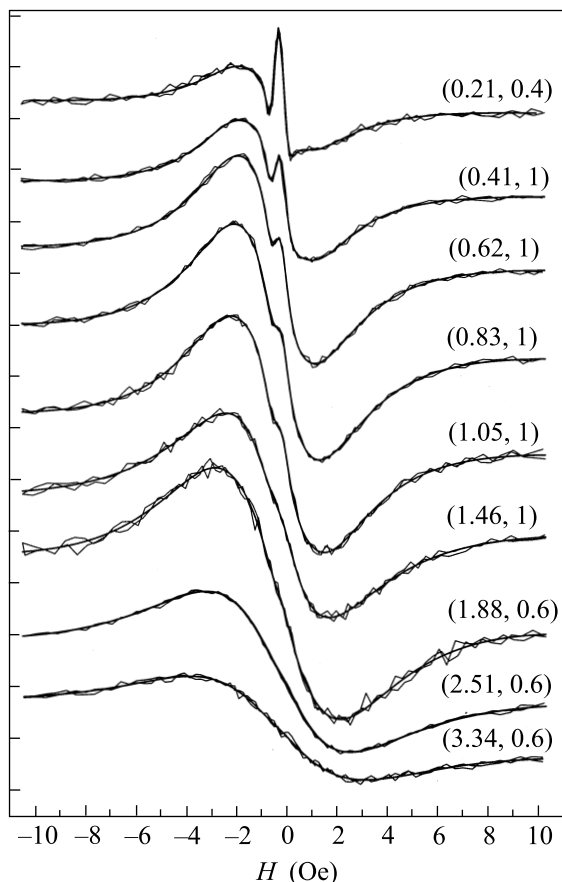


Рис. 1. Образцы спектрограмм. Около кривых указано давление в торрах и относительный масштаб

канал дихроизма попадает сигнал двулучепреломления [10].

В геометрии нашего опыта вклады P_i макроскопического ($i = m$) и скрытого ($i = h$) выстраивания описываются одинаковой лорентцевой зависимостью от магнитного поля (H), отличаясь зависимостью амплитуд $I_i(\omega)$ выстраивания от частоты ω зондирующего излучения и релаксационных констант $\Gamma_{2i}(p)$ от давления газа p :

$$P_i = I_i(\omega)\Gamma_{2i}(p)/[\Gamma_{2i}(p)^2 + (2\mu_B g H)^2], \quad (1)$$

$$\Gamma_{2i}(p) = \Gamma_0 k_i + \alpha_2 p,$$

где Γ_0 – вероятность радиационного распада, k_i – коэффициент, зависящий от пленения излучения [11] и частот вынужденного обмена выстраиванием с другими уровнями [12]. Зависимость $I_m(\omega)$ повторяет контур линии излучения, формирующей МВ, а его время жизни растет при пленении излучения. $I_h(\omega)$ знакопеременна¹⁾, и время жизни СВ не зависит от

¹⁾ При малых отстройках частоты ее знак совпадает со знаком МВ, а для больших – противоположен ему.

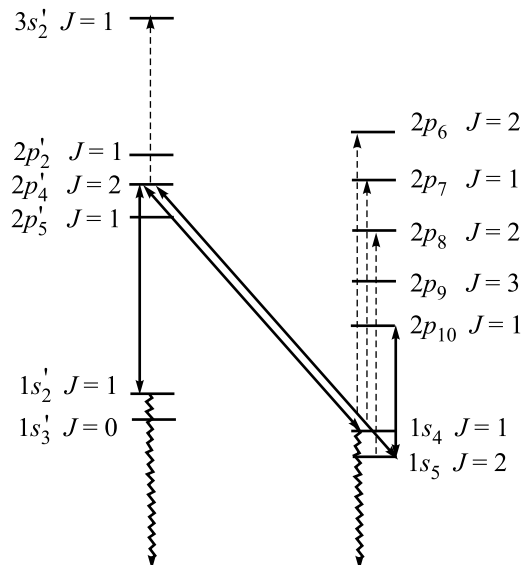


Рис. 2. Схема уровней. Пунктирные стрелки – зондирующее излучение ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) резонансное: центру перехода $3s_2 - 2p_4$, синему крылу переходов $2p_8 - 1s_5$ ($\lambda = 6334 \text{ \AA}$) и $2p_7 - 1s_4$ ($\lambda = 6383 \text{ \AA}$), красному крылу перехода $2p_6 - 1s_4$ ($\lambda = 6305 \text{ \AA}$). Жирные стрелки – излучение, вынуждающее обмен выстраиванием

пленения излучения [8]. Это следствие отсутствия у СВ интегральной спектральной составляющей.

Вклады дихроизма и двулучепреломления в измеряемый сигнал при изменении амплитуд сканируемого и паразитных магнитных полей определены в [10]. Паразитное поперечное поле H_y приводит к появлению слагаемого противоположной четности по отношению к изменению знака сканируемого поля. Именно им обусловлена структура симметричной формы на кривых рис.1 (напомним, что регистрировалась производная ОМР). Ранее мы связывали ее с двулучепреломлением крыла линии поглощения с уровня $1s_5$ (переход $2p_8 - 1s_5$, отстройка 16 см^{-1} , то есть порядка 1000 доплеровских ширин) [13]. В последних опытах обнаружено также присутствие подобных ОМР с характеристиками МВ и СВ уровня $1s_4$. Мы связываем их с двулучепреломлением крыльев еще более далеких линий поглощения с уровня $1s_4$: $2p_6 - 1s_4$ (отстройка -58.2 см^{-1}) и $2p_7 - 1s_4$ ($+136.1 \text{ см}^{-1}$). Вклад крыльев описывался тремя ОМР с амплитудами, не зависящими²⁾ от ω . Кроме того, в структуру суммарного резонанса включались пять ОМР, отвечающих выстраиванию уровней³⁾ $1s_{2,4,5}$. Опыт с вариацией

²⁾ Численные оценки амплитуд этих контуров отвечают их величинам в канале двулучепреломления.

³⁾ Для описания ОМР СВ и МВ уровней $1s_{2,4}$ использовались по два контура с одинаковым α_2 и различными k_i .

H_y показал, что они присутствуют и при полной его компенсации. Мы связываем их с вынужденным переносом выстраивания.

Продольное магнитное поле приводит к появлению дополнительных комбинаций контуров, включающих для каждого ОМР наряду с лорентцианами одинарной ширины также и лорентцианы удвоенной ширины, которые описывались, согласно [10]. В модели также включались: сдвиги по осям координат; амплитуда контура, обусловленного дихроизмом доплеровской линии поглощения; амплитуды остаточных паразитных магнитных полей, параметр девиационного уширения⁴). Обеспечить удовлетворительную оценку такого большого числа параметров можно только при одновременной обработке серии кривых для различных давлений (12 кривых по 168 точек). Последнее стало возможным благодаря прогрессу в производительности компьютеров. Это позволяет использовать общие параметры и определенные физические предпосылки, такие как линейная зависимость ударного уширения от давления газа, одинаковая для разных типов выстраивания одного уровня, монотонность зависимостей.

Необычно появление сигналов СВ уровней $1s_{2,4}$. Отмечалось, что $I_h(\omega)$ знакопеременна и интегрально равна нулю. Поэтому интегральный по спектру перенос СВ и СВ крыльев линий должны отсутствовать. Однако в эксперименте интегрально не равная нулю компонента СВ (ИСВ) присутствует. Причиной ИСВ может быть более эффективная “откачка” медленных выстроенных атомов со скрыто выстроенных уровней вынужденными переходами. Это возможно, если спектральная ширина излучения, вынуждающего перенос, уже или близка к ширине спектра выстраивания, что и имеет место. При этом на исходных уровнях остается ИСВ со знаком выстраивания быстрых атомов. Но время жизни интегрального выстраивания уже зависит от степени пленения излучения. Поэтому мы допустили возможность вариации k_i для ОМР ИСВ такого рода ($i = hi$). В дальнейшем это ИСВ переносится обычным образом, подобно МВ. Отметим, что “откачанная” часть СВ должна иметь его временные характеристики (без влияния пленения излучения на ширину ОМР), хотя при переносе также приобретает интегральные свойства. И действительно, такой положительный контур с характеристиками СВ уровня $1s_4$ в структуре резонанса про-

явился⁵). На уровне $2p_4$ было допущено присутствие собственных СВ и ИСВ.

Известно, что столкновительная деполаризация уровней $1s_2$ и $1s_4$ в собственном газе, в основном, определяется резонансным обменом возбуждением. При этом на переходе $J = 1 \rightarrow J = 0$ скорость разрушения выстраивания дается выражением $\alpha_2 p = 0.028 \Gamma_0 N \lambda^3$, где N – концентрация атомов, а λ – длина волны резонансного перехода [14]. При 0°C $\alpha_2(1s_4)/\Gamma_0 = 0.408 \text{ торр}^{-1}$, а $\alpha_2(1s_2)/\Gamma_0 = 0.395 \text{ торр}^{-1}$. Поэтому относительное столкновительное уширение резонансных уровней описывалось одной переменной. Было принято также $\Gamma_0(1s_2) = 13.3 \Gamma_0(1s_4)$.

Амплитуды “собственных” и “переносных” ОМР и значения k_i для различных типов выстраивания приведены на рис.3–6. Оценки релаксационных констант даны в таблице.

Уровень g -фактор	Γ_0 (МГц)		α_2/Γ_0 (торр ⁻¹)	
	оценка	литература	оценка	литература
$2p_4$ 1.301	8.3	8.3 [15] 8.47 [4] 7.31 [7]	0.43	0.48 [16] 0.43 [7]
$1s_5$ 1.503	1.3	1.14 [7]	0.8	0.83 [7]
$1s_4$ 1.464	6.6	6.3 [17] 6.4 [5] 6.64 [4]	0.35	0.34 (325 К) [14] 0.32 [17] 0.35 (340 К) [18] 0.203 [5]
$2p_0$ 1.984		6.8 [4]		0.01 (315 К) [18]

Для уровня $2p_4$ получена Γ_0 , близкая к измерениям [15, 16] и расчету [4], а столкновительное затухание α_2 – к данным [16]. Для ОМР($1s_5$) получен отрицательный знак⁶) (рис.4, кривые 3, 4), согласующийся с определенным ранее различием знаков выстраивания уровней $2p_4$ и $1s_5$ [7], и релаксационные константы, близкие к данным [7]. $\Gamma_0(1s_4)$ оказалась близка к результатам [4, 5, 17]], а α_2 – к данным из [14, 17, 18]. Для ОМР МВ($1s_4$) получен положительный знак (рис.5, кривые 1, 2), а для ИСВ – отрицательный (рис.4, кривые 5, 6). Согласно [5], выстраивание уровня $1s_4$ также состоит из контуров разных знаков – широкого, обусловленного СВ, и узкого, который, на наш взгляд, и есть суженный пленением

⁴) Последний был определен в отдельном опыте с вариацией амплитуды девиации.

⁵) Подобный ОМР уровня $1s_2$ нельзя отделить от других широких ОМР в силу узости диапазона сканирования.

⁶) Знак выстраивания уровня $2p_4$ принят положительным. Он отвечает МВ на переходе $J = 1 \rightarrow J = 0$.

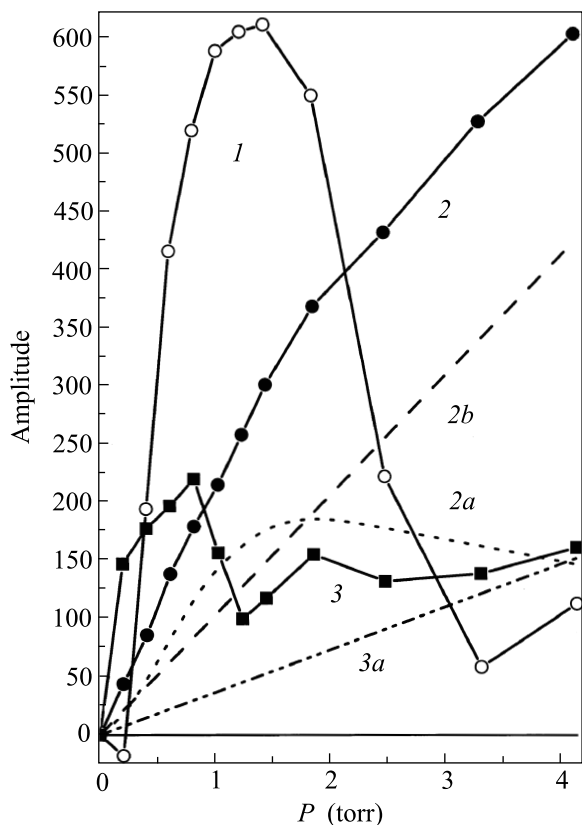


Рис.3. Амплитуды ОМР уровня $2p_4$: 1 – МВ ($2p_4$), 2 – СВ ($2p_4$), 2a – СВ ($2p_4$), индуцированное излучением, 2b – СВ ($2p_4$), индуцированное анизотропными столкновениями, 3 – ИСВ ($2p_4$), 3a – ИСВ ($2p_4$), индуцированное анизотропными столкновениями

контур МВ⁷⁾. Знаки соответствующих ОМР с уровня $1s_2$ оказались противоположными (рис.4, кривая 1 и рис.5, кривая 3). Однако это следствие различия ширины, а не знаков выстраивания уровней. При спонтанном или вынужденном переносе выстраивания на конечном уровне индуцируются два ОМР – один с шириной исходного уровня, другой – конечного, имеющие разные знаки, но равные площади [12]. Знак исходного ОМР “наследует” более узкий из них, определяющий знак выстраивания в нуле магнитного поля. В случае $1s_2$ исходный знак получает ОМР($2p_4$), а ОМР($1s_2$) – противоположный.

3. Таким образом, при разложении суммарного ОМР выстраивания уровня $2p_4$ на лоренцианы были обнаружены контуры с характеристиками выстраивания $1s$ -уровней (ширинами и знаками). Это свидетельствует о переносе выстраивания этих уровней вверх, на $2p$ -уровни.

⁷⁾ В [5] была принята иная интерпретация и узкий контур связывался с переносом выстраивания с уровня $1s_5$.

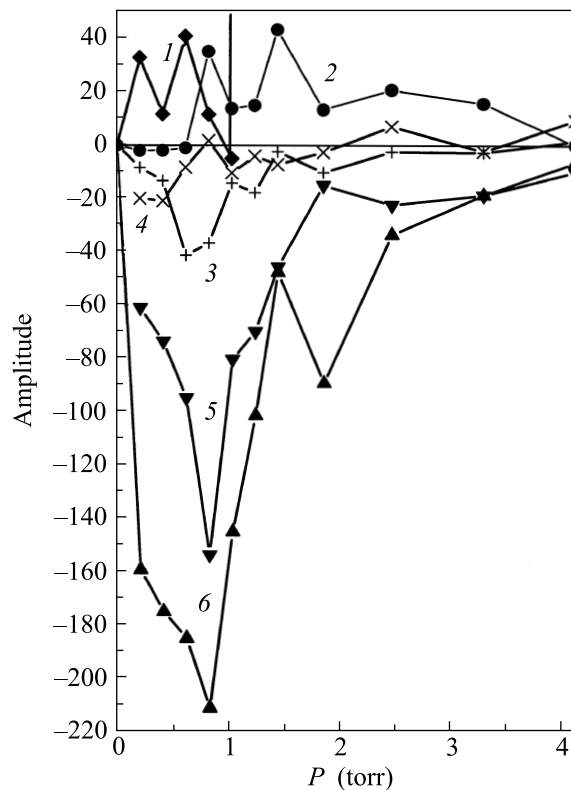


Рис.4. Амплитуды ОМР СВ $1s$ -уровней: 1 – ИСВ ($1s_2$), 2 – переносное СВ ($1s_4$), 3 – ИСВ ($1s_5$), 4 – ИСВ ($1s_5$) в крыле линии, 5 – ИСВ ($1s_4$) в крыле, 6 – ИСВ ($1s_4$)

Факт сужения ОМР при пленении излучения в случае их регистрации с помощью монохроматического излучения сообщается, как нам кажется, впервые. Хотя первое наблюдение подобного сужения было, по-видимому, сделано в [5], но там оно интерпретировалось как следствие переноса выстраивания с уровня $1s_5$. Вместе с тем ничего необычного здесь нет. Время жизни выстраивания определяется интегральными спектральными процессами перепоглощения излучения в разряде, а форма ОМР, отражающая эти процессы, – разрушающим выстраивание магнитным полем. Поэтому спектр зондирующего излучения не играет особой роли.

Для $k_m(1s_4)$ наблюдается падение (рис.6, кривая 1a) большее предела полного пленения (0.3 для перехода $J = 1 \rightarrow J = 0$ [11]). Как следует из [12], это может быть следствием вынужденного обмена выстраиванием с более широкими уровнями $2p_j$, ОМР которых при этом должны уширяться. Однако среди них выделяется уровень $2p_{10}$. Он наиболее узок, имеет максимальный g -фактор, мало уширяется столкновениями и ширина его ОМР МВ в области давлений 3.3 торр сравнивается и становится уже ОМР МВ

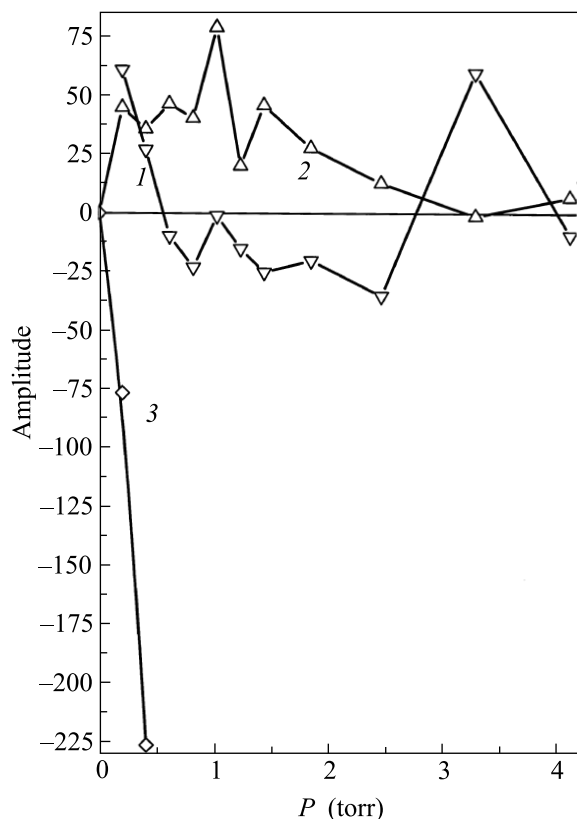


Рис.5. Амплитуды ОМР МВ $1s$ -уровней: 1 – МВ ($1s_4$) в крыле линии, 2 – МВ ($1s_4$), 3 – МВ ($1s_2$)

уровня⁸⁾ $1s_4$. По-видимому, подъем ширины ОМР МВ($1s_4$) при этом давлении (кривая 1a) может быть обусловлен обменом МВ с уровнем $2p_{10}$. Для $k_m(2p_4)$ зафиксирована немонокотная зависимость от давления (рис.6, кривая 2a), что также может быть связано с процессами обмена.

Однако для k_{hi} (рис.6, кривые 1, 2, 3) уменьшение при пленении, большее, чем дает теория [11] для МВ, нельзя связать с процессами обмена. Причиной может быть то, что у ИСВ, как и у СВ, направления осей выстраивания отдельных атомов исходно имеют изотропное распределение. Поэтому, в отличие от МВ, некоторая изотропизация исходной анизотропии при переизлучении, ограничивающая рост времени жизни МВ при полном пленении, не сказывается на увеличении “плененного” времени жизни ИСВ. По этой же причине и деориентирующие столкновения не должны разрушать ИСВ. В силу этого нельзя исключить возможность образования ИСВ при переносе неупругими атом-атомными столкновениями

⁸⁾ Согласно [12], эффект изменения ширины максимален при близости ширины ОМР уровней, обменивающихся выстраиванием, и зависит от знака разности ширины ОМР уровней.

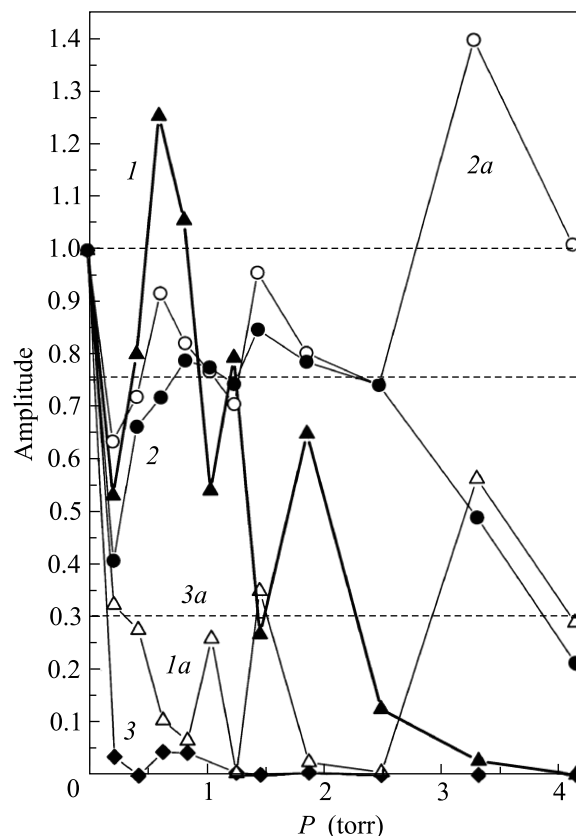


Рис. 6. Вариации радиационных составляющих ширины ОМР: 1 – $k_{hi}(1s_4)$, 1a – $k_m(1s_4)$, 2 – $k_{hi}(2p_4)$, 2a – $k_m(2p_4)$, 3 – $k_{hi}(1s_2)$, 3a – $k_m(1s_2)$

ИСВ и СВ быстрых атомов с уровня $1s_4$ на $1s_5$. В пользу этого свидетельствует влияние температуры кюветы на характеристики ОМР($1s_5$) [13]. Что касается пиков кривой 1 на рис.6, то они, по-видимому, – следствие обмена ИСВ между уровнями $1s_4$ и $2p_{10}$. На левом склоне первого пика ширина ОМР ИСВ($1s_4$) больше ширины ОМР ИСВ($2p_{10}$) и ширина первого растет с ростом частоты обмена и сближением ширины ОМР. На правом склоне плененная ширина ОМР ИСВ($1s_4$) становится равной и меньшей плененной ширины ОМР ИСВ($2p_{10}$), что сопровождается резким сужением ОМР ИСВ($1s_4$). В дальнейшем большее столкновительное уширение уровня $1s_4$, компенсируя сужение при пленении, снова приводит к преобладанию ширины ОМР ИСВ($1s_4$) и появлению еще одного пика. ОМР с характеристиками уровня $2p_{10}$ не были заложены в алгоритм обработки и вариации их характеристик проявляются как искажения (немонотонность) амплитуд и ширины других резонансов в области 1–1.5 и 3.3 торр.

Для уровней $1s_{2,4}$ анизотропия облучения на оси разряда в центре линии при использованных давлениях мала. МВ в крыле линии (рис.5, кривая 1) оче-

видно, образуется на быстрых в поперечном к оси кюветы направлении атомах, которые в силу их малой плотности обеспечивают длину пробега фотона больше диаметра кюветы. Смена знака этого ОМР с ростом давления может быть связана со спонтанным приходом отрицательного МВ с уровня $2p_6$. Для переносных ОМР (кривая 2) оказывается более существенным вклад анизотропии вблизи стенок трубки⁹⁾ и знак ОМР сохраняется. На уровне $1s_5$ МВ может создаваться за счет откачки излучением с $2p$ -уровней, а не спонтанным распадом, который отсутствует. В силу этого нет пленения излучения и нельзя различить ширины ОМР ИСВ и МВ, которые описывались одним контуром с шириной, линейно зависящей от давления. Возможные вариации ширины ОМР вследствие процессов обмена проявляются в искажении оценок других параметров.

Пик амплитуды ОМР МВ($2p_4$) на рис.3 (кривая 1) обусловлен переходами $2p_4-1s_{2,4}$ ($\Delta J = 1$) с наибольшими силами осциллятора (0.249, 0.173), провал – излучением на переходе $2p_4-1s_5$ ($\Delta J = 0$, поэтому знак этого ОМР отрицателен). Здесь сила осциллятора заметно меньше (0.074) и максимум МВ приходится на большие давления. В ОМР СВ($2p_4$) (рис.3, кривая 2), подобно [8], наряду с вкладом, пропорциональным интенсивности излучения (кривая 2а)¹⁰⁾, обнаруживается вклад АС, пропорциональный концентрации атомов (прямая 2б). Для ОМР ИСВ($2p_4$) зарегистрирован положительный знак (кривая 3). Это возможно, если ИСВ индуцировано переносом с уровня¹¹⁾ $1s_4$. И действительно, кривая 3 за вычетом наклона, пропорционального концентрации атомов (прямая 3а), схожа с амплитудой ОМР ИСВ с этого уровня (см. рис.4), взятой с обратным знаком. Часть ИСВ, растущая линейно с давлением, по-видимому, образуется из СВ($2p_4$), индуцированного АС, вследствие ухода быстрых атомов на другие $2p$ -уровни в результате неупругих атом-атомных столкновений.

Объем письма не позволяет обсудить все детали полученных результатов, определяемые сложным взаимодействием $2p$ -, $1s$ -уровней. Мы обращаем внимание на присутствие переносных ОМР и интегрально не равно нулю СВ, на зависимость радиационной части ширины ОМР ИСВ от давления неона, отличную

от предсказанной для МВ в условиях пленения излучения, и на зависимость ширины ОМР от частоты вынужденного обмена выстраиванием. В количественном плане, ввиду взаимозависимости параметров, оценки могут быть искажены и требуются более точные измерения и более полный алгоритм обработки.

Авторы благодарны С. Г. Раутиану за обсуждение работы, С. Н. Кобцеву за техническую поддержку, программе “Университеты России” (# УР.01.01.054) и Российскому фонду фундаментальных исследований (проект #02-02-17923) за финансовую поддержку.

1. J. H. Parks and A. Javan, Phys. Rev. **A139**, 1351 (1965).
2. А. С. Хайкин, ЖЭТФ **54**, 52 (1968).
3. С. Н. Атутов, А. Г. Никитенко, С. Г. Раутиан и др., Письма ЖЭТФ **13**, 232 (1971).
4. Л. А. Вайнштейн, В. Р. Мироненко, С. Г. Раутиан и др., Опт. и спектр. **87**, 372 (1999).
5. Н. Г. Лукомский, В. А. Полищук, М. П. Чайка, Опт. и спектр. **71**, 46 (1991).
6. Э. Г. Сапрыкин, С. Н. Селезнев, В. А. Сорокин, Письма в ЖЭТФ **50**, 316 (1989).
7. Э. Г. Сапрыкин, С. Н. Селезнев, В. А. Сорокин, ЖЭТФ **102**, 14 (1992).
8. М. П. Чайка, *Интерференция вырожденных состояний*, Л.: Изд-во ЛГУ, 1975.
9. Г. Н. Николаев, Г. Д. Родионов, С. Г. Раутиан и др., Опт. и спектр. **60**, 244 (1986).
10. Э. Г. Сапрыкин, С. Н. Селезнев, В. А. Сорокин, Опт. и спектр. **91**, 313 (2001).
11. М. И. Дьяконов, В. И. Перель, ЖЭТФ **47**, 1483 (1964).
12. С. Г. Раутиан, Э. Г. Сапрыкин, Опт. и спектр. **92**, 385 (2002).
13. Э. Г. Сапрыкин, С. Н. Селезнев, В. А. Сорокин, Опт. и спектр. **85**, 721 (1998).
14. М. И. Дьяконов, В. И. Перель, ЖЭТФ **48**, 345 (1965).
15. W. R. Bennett, Jr., P. J. Kindlmann, Phys. Rev. **149**, 38 (1966).
16. Им Тхек-де, С. Г. Раутиан, Э. Г. Сапрыкин и др., Опт. и спектр. **49**, 438 (1980).
17. Им Тхек-де, Э. Г. Сапрыкин, А. М. Шалагин, Опт. и спектр. **35**, 202 (1973).
18. С. А. Казанцев, УФН **139**, 621 (1983).

⁹⁾ Сигнал в крыльях отвечает оси трубки, а переносной сигнал интегрален по ее сечению.

¹⁰⁾ Кривая 2а, пропорциональная поглощению лазерного излучения, в первом приближении отвечает закону изменения интенсивности выстраивающего излучения с ростом давления.

¹¹⁾ Напомним, что отрицательный знак ИСВ этих уровней накладывают более узкие собственные переносные ОМР, а ОМР с характеристиками уровня $2p_4$ получает положительный знак.