

УДК 535.375.5 + 621.373 : 535] : 546.35

# СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВКР В ПАРАХ РУБИДИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ВБЛИЗИ ПЕРЕХОДОВ $5^2S_{1/2} - 5^2P_{1/2, 3/2}$

Н. В. Знаменский, В. А. Михайлов и В. И. Одинцов

Экспериментально исследовано положение и форма линии ВКР при возбуждении паров рубидия излучением лазеров на красителях с перестраиваемой частотой и узкой ( $\sim 0.2 \text{ см}^{-1}$ ) линией генерации. С целью выявления действия оптического эффекта Штарка на линию ВКР интенсивность излучения, заселяющего исходный для ВКР уровень  $5^2P_{1/2}$  или  $5^2P_{3/2}$ , изменялась в широких пределах до  $\sim 20 \text{ МВт/см}^2$ , а его частота перестраивалась в окрестности резонансного перехода, включая точную настройку в резонанс. Установлено, что эффект Штарка в линии ВКР не проявляется.

ВКР вблизи резонансных переходов Rb наблюдалось в [1] и исследовалось в условиях перестройки частоты возбуждающего излучения в [2, 3]. Однако в этих исследованиях остался не выясненным вопрос о проявлении в линии ВКР смещения атомных уровней, происходящего вследствие оптического эффекта Штарка. В [5] отмечается регистрация штарковского смещения линии ВКР в парах калия, однако результаты, приводящиеся в [4, 5], неоднозначны.

В настоящей работе для выявления действия оптического эффекта Штарка при резонансном ВКР было проведено исследование положения, формы и ширины линии ВКР при возбуждении паров Rb излучением одного или двух лазеров на красителях с перестраиваемой частотой и узкой ( $\sim 0.2 \text{ см}^{-1}$ ) линией генерации (см. также [6]). Длительность возбуждающего импульса составляла 25 нс. Диаметр светового пучка в кювете с парами рубидия длиной 18 см был  $\sim 1 \text{ мм}$ .

При работе с двумя лазерами на красителях их световые пучки совмещались в пространстве с помощью системы зеркал, а синхронность их импульсов генерации обеспечивалась возбуждением обоих лазеров одним и тем же импульсом рубинового лазера. ВКР исследовалось при температуре паров от 200 до 280° С. Излучение, выходящее из кюветы, направлялось на щель дифракционного спектрографа с линейной дисперсией  $5 \text{ см}^{-1} \text{ мм}$ . Спектральная ширина щели составляла  $0.08 \text{ см}^{-1}$ . Частота линии ВКР определялась с точностью не ниже  $0.2 \text{ см}^{-1}$ .

При использовании двух лазеров на красителях частота одного из них (лазера А)  $\omega_A$  настраивалась на частоту перехода  $5^2S_{1/2} - 5^2P_{1/2}$  или  $5^2S_{1/2} - 5^2P_{3/2}$ , что обеспечивало заселение соответствующего верхнего уровня (рис. 1, а, б). Второй лазер осуществлял возбуждение ВКР с этого уровня. Его частота  $\omega_B$  была близка к частоте другого резонансного перехода. Чтобы избежать самофокусировки излучения лазера В, частота  $\omega_B$  перестраивалась с длинноволновой стороны от этого перехода. При этом канал просветления среды, создаваемый излучением лазера А, препятствовал проявлению самофокусировки излучения лазера В, образуя для него оптический волновод [3]. Работа проводилась при достаточно низких температурах паров (220° С), при которых лазер А сам по себе не мог возбуждать ВКР. Интенсивность лазера А варьировалась в широких пределах до  $\sim 20 \text{ МВт/см}^2$ .

Штарковское смещение линии ВКР должно быть наибольшим в случае, когда импульс ВКР развивается вблизи максимума импульса заселяющего лазера. Было установлено, что последнее происходит, когда интенсивность лазера  $B$  близка к порогу возбуждения ВКР. Поэтому линия ВКР фотографировалась при минимальной интенсивности возбуждающего лазера  $B$ .

При настройке частоты  $\omega_A$  на частоту перехода  $5^2S_{1/2} - 5^2P_{3/2}$  (рис. 1, а) ВКР возбуждалось в виде узкой линии шириной  $\Delta\omega_S \leq 0.5 \text{ см}^{-1}$ . Ее частота  $\omega_S$  обнаруживала лишь незначительный сдвиг ( $\leq 0.5 \text{ см}^{-1}$ ) в коротковолновую сторону от «несмещенной» частоты  $\omega_S^0$ , определяемой положением невозмущенных атомных уровней. С уменьшением интенсивности заселяющего лазера  $A$   $I_A$  величина смещения линии ВКР уменьшалась. При перестройке частоты  $\omega_A$  в пределах  $\pm 5 \text{ см}^{-1}$  линия ВКР по-прежнему

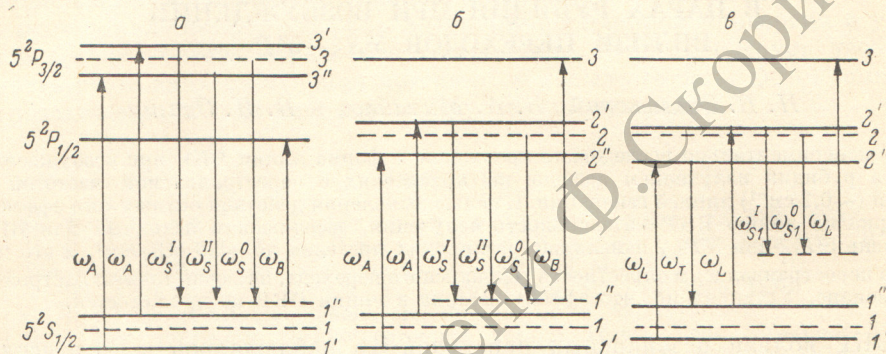


Рис. 1. Схема возбуждения ВКР вблизи резонансных переходов рубидия с учетом штарковского возмущения энергетических уровней.

1', 1'', 2', 2'', 3', 3'' — уровни квазиэнергии; 1, 2, 3 — невозмущенные энергетические уровни;  $\omega_T$  — частота вынужденного трехфотонного рассеяния света.

была смещена в коротковолновую сторону относительно «несмещенной» частоты  $\omega_S^0$  на величину  $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$ . Как и в случае точного резонанса, с уменьшением интенсивности  $I_A$  величина смещения линии ВКР уменьшалась.

При настройке частоты  $\omega_A$  на частоту перехода  $5^2S_{1/2} - 5^2P_{1/2}$  (рис. 1, б) при длинноволновых расстройках возбуждающего лазера  $B$   $\Delta\omega_B$  менее  $30 \text{ см}^{-1}$  наблюдалась узкая линия ВКР с шириной  $\Delta\omega_S \leq 0.5 \text{ см}^{-1}$ , не испытывавшая существенного смещения относительно частоты  $\omega_S^0$ . При расстройках  $\Delta\omega_B$  более  $30 \text{ см}^{-1}$  с длинноволновой стороны у линии ВКР появлялось слабое крыло. С увеличением интенсивностей лазеров  $A$  и  $B$  протяженность крыла возрастала и могла достигать  $\sim 4 \text{ см}^{-1}$ . При смещении частоты  $\omega_A$  с резонанса в ту или другую сторону положение и ширина линии ВКР не изменялись.

Сопоставим результаты наших экспериментальных исследований с имеющейся теорией проявления эффекта Штарка в спектре ВКР [7]. Согласно [7], при рассмотрении ВКР как двухфотонного процесса, начинающегося с возбужденного состояния  $5^2P_{3/2}$  или  $5^2P_{1/2}$ , при нулевой расстройке частоты лазера  $A$   $\Delta_A = 0$  следует ожидать штарковского расщепления линии ВКР на две компоненты с частотами  $\omega_S^I$  и  $\omega_S^{II}$ , определяемыми положением уровней квазиэнергии 2' и 2'' или 3' и 3'' (рис. 1, а, б). Расчет показывает, что при интенсивности заселяющего лазера  $I_A = 20 \text{ МВт/см}^2$  разность  $\omega_S^I - \omega_S^{II}$  должна составлять  $\sim 9.5 \text{ см}^{-1}$ , если исходным для ВКР является уровень  $5^2P_{1/2}$ , и  $\sim 13 \text{ см}^{-1}$ , если исходный уровень  $5^2P_{3/2}$ . Эксперименты же показали, что штарковское расщепление уровней под действием мощного поля заселяющего лазера  $A$  в спектре ВКР не проявляется. Наблюдавшееся небольшое коротковолновое смещение при перестройке частоты  $\omega_A$  вблизи перехода  $5^2S_{1/2} - 5^2P_{3/2}$  не может быть связано со штарковским, поскольку при коротковолновых

расстройках частоты лазера  $A$  штарковское смещение линии ВКР должно происходить в длинноволновую сторону. В экспериментах же наблюдалось только коротковолновое смещение линии ВКР, не говоря уже о том, что величина этого смещения была значительно меньше, чем это следует из теории. Уширение линии ВКР, наблюдавшееся при перестройке частоты  $\omega_A$  вблизи перехода  $5^2S_{1/2}-5^2P_{1/2}$ , также нельзя считать штарковским по аналогичным соображениям.

Таким образом, установлено существенное расхождение между теорией и экспериментальными результатами. Согласно последним, штарковское возмущение энергетических уровней в спектре ВКР не проявляется. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены две фотографии линии ВКР при различных интенсивностях и расстройках частоты заселяющего лазера  $A$ . Хорошо видно, что при изменении интенсивности заселяющего лазера  $A$   $I_A$  от 20 до 1 МВт/см<sup>2</sup> положение линии ВКР не изменяется.

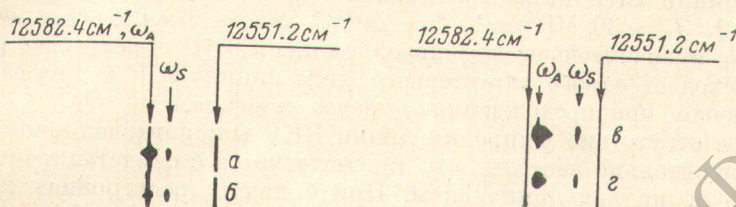


Рис. 2. Положение линии ВКР при различных интенсивностях  $I_A$  и расстройках  $\Delta_A$  заселяющего лазера  $A$ .

$a - I_A = 20$  МВт/см<sup>2</sup>,  $\Delta_A = 0$ ;  $б - I_A = 1$  МВт/см<sup>2</sup>,  $\Delta_A = 0$ ;  $в - I_A = 20$  МВт/см<sup>2</sup>,  $\Delta_A = -4$  см<sup>-1</sup>;  $г - I_A = 1$  МВт/см<sup>2</sup>,  $\Delta_A = -4$  см<sup>-1</sup>. Расстройка возбуждающего лазера  $B$   $\Delta_B = -8.8$  см<sup>-1</sup> ( $a, б$ ) и  $-21.8$  см<sup>-1</sup> ( $в, г$ ).

Были также проведены экспериментальные исследования проявления эффекта Штарка в спектре ВКР при его возбуждении излучением лишь одного лазера на красителях. Температура паров рубидия в этих экспериментах составляла 260°С. Заселение исходных для ВКР уровней  $5^2P_{1/2}$  или  $5^2P_{3/2}$  в случае достаточно больших расстрой  $\Delta_L$  частоты возбуждающего излучения  $\omega_L$  от частоты атомных переходов  $5^2S_{1/2}-5^2P_{1/2}$  или  $5^2S_{1/2}-5^2P_{3/2}$  осуществлялось с помощью процесса вынужденного трехфотонного рассеяния света [1, 6]. Исключение составляла область расстрой  $|\Delta_L| \leq 1$  см<sup>-1</sup>, в которой заселение исходных уровней  $5^2P_{1/2}$  или  $5^2P_{3/2}$  за счет прямого однофотонного поглощения преобладало над трехфотонным заселением.

При перестройке частоты возбуждающего излучения вблизи переходов  $5^2S_{1/2}-5^2P_{1/2, 3/2}$  возникают эффекты самовоздействия, которые могут оказывать существенное влияние на интенсивность возбуждающего пучка. Было установлено (см. подробнее [6]), что существует примыкающая к резонансу область длинноволновых расстрой  $\Delta_L$ , в которой достаточно интенсивное излучение накачки не претерпевает самодефокусировки. С уменьшением интенсивности возбуждающего лазера  $I_L$  протяженность этой области уменьшается. Например, для перехода  $5^2S_{1/2}-5^2P_{1/2}$  при  $I_L \sim 30$  МВт/см<sup>2</sup> самодефокусировка отсутствует при длинноволновых расстройках менее  $\sim 15$  см<sup>-1</sup> и наблюдается при больших значениях  $\Delta_L$ . Переход в область коротковолновых расстрой сопровождается скачкообразным переходом от случая отсутствия самовоздействия к случаю самофокусировки. Очевидно, что надежная интерпретация экспериментальных результатов и сопоставление их с теоретическими оценками возможны лишь в том случае, когда частота накачки расположена с длинноволновой стороны от резонанса в области, в которой эффекты самовоздействия отсутствуют.

При перестройке частоты  $\omega_L$  в окрестностях перехода  $5^2S_{1/2}-5^2P_{1/2}$  стоксова компонента ВКР  $\omega_{S1}$  обнаруживала значительное уширение, направленное независимо от знака расстройки  $\Delta_L$  в длинноволновую сто-

рону от «несмещенной» частоты  $\omega_{S1}^0$ . Однако величина этого смещения и форма линии существенно различались для разных знаков  $\Delta_L$ .

При длинноволновых расстройках ( $\Delta_L < 0$ ) контур линии ВКР имел резкий край с коротковолновой стороны и более или менее протяженное крыло с другой. Протяженность длинноволнового крыла и ширина линии на половине высоты  $\Delta\omega_{S1}$  возрастали при увеличении  $I_L$  и температуры паров и уменьшались при удалении  $\omega_L$  от резонанса. При  $I_L \approx 30$  МВт/см<sup>2</sup>,  $t^0 \approx 260^\circ\text{C}$   $\Delta\omega_{S1} \approx 1$  см<sup>-1</sup> в случае расстроек от 0 до  $-2$  см<sup>-1</sup>; при увеличении расстройки до  $\Delta_L = -5$  см<sup>-1</sup>  $\Delta\omega_{S1}$  уменьшалась до  $\sim 0.5$  см<sup>-1</sup>. При всех значениях  $I_L$  и  $\Delta_L < 0$  максимум линии ВКР всегда был смещен в длинноволновую сторону относительно «несмещенной» частоты  $\omega_{S1}^0$  на величину  $\leq 0.5$  см<sup>-1</sup>.

При коротковолновых расстройках ( $\Delta_L > 0$ ) линия ВКР имела резкий край с коротковолновой стороны, который располагался на частоте  $\omega_{S1}^0$ . Ширина линии ВКР была значительно больше, чем при  $\Delta_L < 0$ . Так, при  $\Delta_L \approx 4$  см<sup>-1</sup>,  $I_L \approx 30$  МВт/см<sup>2</sup>,  $t^0 \approx 260^\circ\text{C}$   $\Delta\omega_{S1} \approx 3$  см<sup>-1</sup>. Она мало зависела от  $\Delta_L$  и значительно медленнее, чем при  $\Delta_L < 0$ , возрастала с ростом  $I_L$  и  $t^0$ . Переход от одного характерного вида линии ВКР к другому происходил скачком при прохождении  $\omega_L$  через резонанс.

Полное отсутствие уширения линии ВКР в коротковолновом направлении относительно частоты  $\omega_{S1}^0$  не согласуется с представлением о расщеплении ее на две компоненты. При больших расстройках заселение уровня квазиэнергии  $2'$  (рис. 1, в) происходит путем трехфотонного рассеяния [6]. В этом случае можно было ожидать возникновения линии ВКР на частоте  $\omega_{S1}^I$ . Однако при  $\Delta_L < 0$  частота  $\omega_{S1}^I$  должна быть смещена в коротковолновую сторону относительно  $\omega_{S1}^0$ , что не согласуется с экспериментально наблюдаемым уширением линии ВКР только в длинноволновом направлении. При  $\Delta_L > 0$   $\omega_{S1}^I$  смещена, как и наблюдаемая линия, в длинноволновую сторону от  $\omega_{S1}^0$ . Однако какие-либо количественные оценки в этом случае затруднены вследствие самофокусировки возбуждающего излучения.

При настройке частоты  $\omega_L$  на частоту перехода  $5^2S_{1/2} - 5^2P_{3/2}^1$  линия ВКР, как и в экспериментах с двумя лазерами, имела малую ширину  $\sim 0.5$  см<sup>-1</sup>. Ее частота  $\omega_{AS1}$  обнаруживала лишь незначительный сдвиг ( $\leq 0.5$  см<sup>-1</sup>) в коротковолновую сторону относительно «несмещенной» частоты  $\omega_{AS1}^0$ , определяемой положением невозмущенных атомных уровней. Такая картина наблюдалась при различных значениях  $I_L$  вплоть до 30 МВт/см<sup>2</sup>. Положение линии ВКР относительно частоты  $\omega_{AS1}^0$  и ее ширина не менялись также при изменении  $\Delta_L$  в обе стороны от резонанса. В то же время, согласно [7], при  $\Delta_L = 0$  следовало ожидать расщепления и линии ВКР на две компоненты с частотами  $\omega_{AS1}^I$  и  $\omega_{AS1}^{II}$ . Если интенсивность накачки значительно превышала порог возбуждения ВКР, то импульс ВКР должен возникать в начале возбуждающего импульса. Поэтому, беря в качестве нижней границы штарковское расщепление при интенсивности  $I_L = 2$  МВт/см<sup>2</sup>, соответствующей экспериментальному порогу возбуждения ВКР при  $t = 260^\circ\text{C}$ , получим  $\omega_{AS1}^I - \omega_{AS1}^{II} \geq 4$  см<sup>-1</sup>, что опять-таки противоречит результатам эксперимента.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования проявления оптического эффекта Штарка в спектре ВКР показали, что линия ВКР не испытывает штарковского смещения или расщепления энергетических уровней. Этот вывод не согласуется с результатами теоретического расчета [7]. Возможной причиной несоответствия эксперимента и теории [7] является то, что в экспериментах излучение накачки нельзя считать строго монохроматическим. Между тем при определенных условиях немонохроматичность накачки может оказывать существенное влияние на штарковское возмущение энергетических уровней [8].

<sup>1</sup> Чтобы полностью исключить возникновение самофокусировки, частота  $\omega_L$  смещалась в длинноволновую сторону от резонанса на малую величину  $\sim 0.1 - 0.2$  см<sup>-1</sup>.

### Литература

- [1] Н. Н. Бадалян В. А. Ирадян, М. Е. Мовсесян. Письма ЖЭТФ, 8, 518, 1968.
- [2] Ф. А. Королев, С. А. Бахрамов, В. И. Одинцов. Письма ЖЭТФ, 12, 436, 1970.
- [3] В. А. Михайлов, В. И. Одинцов, Л. Ф. Рогачева. Письма ЖЭТФ, 25, 151, 1977.
- [4] В. М. Арутюнян, Н. Н. Бадалян, В. А. Ирадян, М. Е. Мовсесян. ЖЭТФ, 60, 62, 1971.
- [5] В. М. Арутюнян, Т. А. Папазян, Ю. С. Чилингарян, А. В. Карменян, С. М. Саркисян. ЖЭТФ, 66, 509, 1974.
- [6] В. А. Михайлов, В. И. Одинцов. Деп. ВИНТИ, № 4209-77, 1977.
- [7] М. А. Ковнер, С. К. Потапов, Ж. прикл. спектр., 13, 243, 1970.
- [8] А. М. Бонч-Бруевич, С. Г. Пржибельский, В. А. Ходовой, Н. А. Чигирь. ЖЭТФ, 70, 445, 1976.

Поступило в Редакцию 15 февраля 1979 г.

---