

**А.В. Еньшин**

## **РАСПРОСТРАНЕНИЕ БИГАРМОНИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, РЕЗОНАНСНОГО СПИНОВЫМ ЧАСТОТАМ, ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРНЫЕ И ИНЕРТНЫЕ ГАЗЫ. Ч. 2**

Представлены результаты исследований степени участия в процессе рассеянии азота и аргона.

Проведено их сопоставление с ранее полученными [1] результатами для воздуха и кислорода. Показано, что наиболее активным в наблюдаемом процессе является азот. Рассмотрен механизм образования поляритонов в атмосфере. Показано, что он включает в себя каскад трехфотонных процессов второго порядка, протекание которых обусловлено нарушением инверсионной симметрии среды. Столь резкое изменение макроскопических характеристик среды обусловлено возникновением в среде спиновых воли, т.е. макроскопическим квантовым эффектом, проявляющимся при создании в среде неравновесной заселенности спиновых состояний частиц. Вывод подтвержден результатами эксперимента для воздуха в диапазоне давлений  $760 \div 10^{-4}$  мм рт.ст. данные.

В данной статье продолжено обсуждение результатов эксперимента по рассеянию лазерной бигармоники (резонансной спиновым частотам) атмосферными газами [1]. Приведены результаты для азота и аргона. Поскольку молекула азота имеет ядерный спин  $I=2$  и комбинационный вращательный спектр, а аргон инертен, то сопоставление результатов для них с опубликованными ранее [1] позволяет оценить сечение рассеяния наблюдаемого процесса и его физический базис.

### **Постановка эксперимента**

Эксперимент проводился на специальном стенде, детально описанном в [2]. Рабочая камера заполнялась последовательно воздухом, азотом и аргоном. Регистрировались величины сигналов в стоксовой части регистрируемого спектра [2], удаленной от основной длины волны примерно на 500Å. Спектральная ширина регистрируемого участка составляла 10Å. Более подробно методика эксперимента описана в предыдущих статьях [1,2].

### **Результаты эксперимента**

1. При проведении экспериментов величины сигналов в опорной и рабочей ветвях установки при заполнении рабочей камеры воздухом равнялись 460 и 500 мВ соответственно, давление и температура в камере составляли 760 мм рт. ст. и 300°К. Воздух из камеры откачивался и постепенно заполнялся азотом, чистота которого согласно паспортным данным была не менее 99%. После заполнения камеры азотом до давления 760 мм рт.ст. зарегистрировано отклонение стрелки микроамперметра М-1400 на два деления вправо от нуля, что при заданных характеристиках измерительной схемы соответствовало увеличению входного сигнала в рабочей ветви установки на 22 мВ.

2. В экспериментах с аргоном величины сигналов в опорной и рабочей ветвях установки при заполнении ее воздухом составляли 320 и 640 мВ. При заполнении камеры аргоном, чистота которого согласно паспортным данным была не менее 99,9%, зарегистрировано отклонение стрелки микроамперметра на два деления влево от нуля, что соответствовало уменьшению входного сигнала в рабочей ветви на 30 мВ.

3. В проведенных ранее экспериментах с кислородом [1] относительное уменьшение входного сигнала составляло 15 мВ. При изменении давления в камере с воздухом от 760 до  $10^{-4}$  мм рт. ст. величина сигнала не изменялась.

## Обсуждение результатов

1. Приведенные результаты позволяют заключить, что наиболее активным газом в исследуемом процессе рассеяния является азот. Кислород, хотя и ведет себя активнее инертного аргона (уменьшение входного сигнала составляет 15 и 30 мВ соответственно), его относительный вклад в рабочий сигнал меньше, чем у азота, для которого наблюдалось увеличение входного сигнала на 22 мВ. Для понимания этого результата рассмотрим более детально структуру молекул азота и кислорода и возможный механизм их взаимодействия с бигармоникой, резонансной спиновым частотам. Поскольку наблюдаемый спектр, приведенный в [1], имеет ярко выраженный поляритонный характер [3], рассмотрим подробнее процесс образования поляритонов в среде.

Известно, что при обычной активной спектроскопии комбинационного рассеяния света (АСКР) генерация сигнала происходит через промежуточное состояние. Однако в средах без центра симметрии возможна также АСКР на поляритонах [3]. Собственные частоты этих составных квазичастиц зависят от величины и направления волнового вектора [3]. Интенсивность сигнала АСКР на поляритонах зависит не только от разности частот полей бигармоники  $\omega_1 - \omega_2$ , но и от разности волновых векторов  $\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2$ . Поэтому в нецентросимметричных средах в интенсивность сигнала АСКР дают вклад как прямые четырехфотонные процессы, обусловленные кубической нелинейной восприимчивостью среды  $\chi^{(3)}$ , так и каскадные трехфотонные процессы, идущие через поляритонные состояния, обусловленные квадратичной нелинейностью  $\chi^{(2)}$ . Каскадные трехфотонные процессы при АСКР света на поляритонах представляют собой два последовательных трехфотонных процесса, схема которых дана на рис 1, а: 1) возбуждение поляритонов частоты  $\omega_p = \omega_1 - \omega_2$  в поле двух лазерных лучей с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и 2) рассеяние пробной волны частоты  $\omega_1$  на возбужденных таким образом поляритонах.

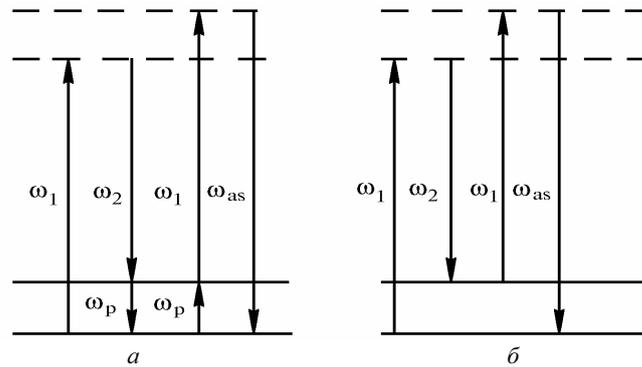


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая каскадные трехфотонные (а) и прямые четырехфотонные (б) процессы, возникающие при ЛСКР света на поляритонах

Каждый из указанных процессов обусловлен квадратичной нелинейностью среды  $\chi^{(2)}$ , а их наибольшая эффективность достигается при выполнении условий синхронизма [3]:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_p - (\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) &\equiv \Delta \mathbf{K}_p = 0 ; \\ \mathbf{K}_p - (\mathbf{K}_{as} - \mathbf{K}_1) &\equiv \Delta \mathbf{K} = 0 , \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_p, \mathbf{K}_{as}$  – соответствующие волновые векторы.

Прямой четырехфотонный процесс представляет собой смешение полей излучения трех лазеров  $\omega_{as} = 2\omega_1 - \omega_2$  (рис. 1, б). Максимальная эффективность этого процесса достигается при выполнении условия

$$\mathbf{K}_{as} - (2\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) \equiv \Delta \mathbf{K}_{as} = 0 . \quad (2)$$

Заметим, что процессы третьего порядка обычно во много раз слабее, чем разрешенные процессы второго порядка из-за убывания величины нелинейности с ростом порядка [4]:

$$\chi^{(3)} / \chi^{(2)} \sim 1 / E_{ат}, \quad (3)$$

где  $E_{ат}$  – внутриаомное поле, типичное значение которого для газов составляет  $\sim 3 \cdot 10^8$  В/см.

Именно поэтому обнаруженные нами нелинейные процессы второго порядка в атмосфере характеризуются восприимчивостью  $\chi^{(2)}$ , которая примерно в  $10^8$  раз больше, чем у ранее известных процессов третьего порядка. Очевидно [4], что протекание процессов второго порядка в центрально-симметричных средах, каковыми являются газы, запрещено правилами симметрии. При наложении на среду постоянного электрического (магнитного) поля инверсионная симметрия нарушается. Поскольку используемые в эксперименте электрические и магнитные поля составляли примерно 100 В/см, т.е. были несопоставимо малы по сравнению с внутриаомными полями газовых молекул, постольку они не могли прямым воздействием изменить симметрию среды. Объяснить нарушение инверсионной симметрии в эксперименте можно следующим образом. Бигармоника с разностной частотой 500 МГц может резонансным образом взаимодействовать с элементарными возбуждениями среды, обусловленными движением магнитных моментов ядер и электронов молекул азота и кислорода. В результате такого взаимодействия, как нами отмечалось ранее в [1], создается неравновесная заселенность спиновых состояний молекул азота, или поляризация (ориентация) их ядер и электронов по спине.

В пространстве, заполненном бигармоническим световым полем, движения всех ядерных (электронных) спинов молекул оказываются коррелированными между собой. Как показано в [6], в такой ситуации проявляются макроскопические квантовые эффекты, связанные со спиновой поляризацией частиц газа, в частности, такие как спиновые волны, и обусловленные этими эффектами резкие изменения макроскопических свойств системы. Спиновые волны возникают как результат коллективного взаимодействия частиц, приводящего к появлению своеобразного самосогласованного поля, действующего на каждую частицу газа со стороны всех остальных частиц.

Существование коллективных спиновых воли в поляризованных газах означает наличие в системе дополнительной ветви возбуждений, связанной со спином, – бозёвской. Существенно, что формирование такого поля происходит на расстояниях меньше длины свободного пробега.

В [5] теоретически показано, что в этом случае существует прямой обменный механизм неупругого рассеяния частиц на тепловых флуктуациях поперечной намагниченности, сопровождающийся переворотом спина рассеиваемой частицы и испусканием или поглощением коллективной спиновой волны – магиона. Сечение такого процесса оказывается порядка обычного газокинетического упругого рассеяния частиц друг на друге, а в некоторых случаях значительно превосходит его, что согласуется с нашими результатами.

Таким образом, на тепловое движение молекул накладывается упорядоченное движение, обусловленное обменом моментами количества движения поглощаемых фотонов и частиц среды. Явление переноса момента количества движения обычно характеризуется коэффициентом внутреннего трения  $\eta$ , который согласно элементарной кинетической теории выражается соотношением

$$\eta = \frac{1}{3} \bar{u} \rho \bar{\lambda}, \quad (4)$$

где  $\bar{u}$  – средняя скорость теплового движения;  $\rho$  – плотность частиц;  $\bar{\lambda}$  – средняя длина свободного пробега.

В (4) входят произведения  $\rho \bar{\lambda}$ , не зависящие от давления. Поэтому величины регистрируемых сигналов в этом процессе, пропорциональные коэффициенту  $\eta$ , также не должны зависеть от давления. Полученный результат для воздуха (в рабочей камере) в диапазоне давлений  $760 \div 10^{-4}$  мм рт.ст. также согласуется с этими представлениями кинетической теории.

## Заключение

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что результаты обсуждаемого эксперимента в принципе укладываются в рамки существующих представлений о комбинационном рассеянии света на магннных поляритонах, образованных смешиванием спиновых колебаний ядер с поляризационными колебаниями электронной оболочки при ее взаимодействии с резонансной бигармоникой.

Обнаруженный процесс рассеяния характеризуется восприимчивостью второго порядка и обусловлен коллективными взаимодействиями частиц – спиновыми волнами, имеющими квантовую природу. Необычайно высокое сечение процесса при низком пороге открывает, на нашему мнению, перспективу его применения в дистанционном зондировании атмосферы методами АСКР.

Естественно, что лишь дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования могут привести к возможности достаточно полно описать динамику образования поляритонных состояний, сформулировать условия нарушения инверсионной симметрии среды, а также определить круг макроскопических квантовых эффектов, сопровождающих наблюдаемый процесс.

1. Еньшин А. В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 4. С. 532–539.
2. Еньшин А. В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 10. С. 1415–1419.
3. Поливанов Ю. И., Суходольский А. Т. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25. Вып. 5. С. 240–244.
4. Шен И. Р. Принципы нелинейной оптики. Пер. с англ. / Под ред. С.А. Ахманова. М.: Наука, 1989. 560 с.
5. Башкин Е. П. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. Вып. 6. С. 320–322.
6. Башкин Е. П. // УФН. 1986. Т. 148. Вып. 3. С. 433–471.

Томский государственный университет им. В.В. Куйбышева

Поступила в редакцию  
5 марта 1994 г.

### **A. V. En'shin. Propagation of Biharmonic Laser Radiation Resonant with the Spin Frequencies in Atmospheric and Rare Gases. P. 2.**

The extent to which the nitrogen and argon participate in the process of scattering of the resonance biharmonic is investigated. The results are compared to those for the case of the oxygen and the air. It is shown that the nitrogen is most active in the process under study. The way of construction of polaritons in the atmosphere is considered. They arc demonstrated to involve the cascade of three-photon processes of the second order, the development of which is conditioned by breaking down of the inversion symmetry of the medium. Such a sharp altering of the macroscopic characteristics of the medium is interpreted as a result of appearance, of spin waves in the medium. This macroscopic quantum effect manifests itself when the non-equilibrium population of spin states of the particles is generated in the medium. This conclusion is supported by the measurements in the air over the range of pressures of  $760-10^{-4}$  mm Hg.