

- [1] А. С. Виноградов, Т. М. Зимкина, В. Н. Акимов, Б. Шларбаум. Изв. АН СССР, сер. физ., 38, 508, 1974.
- [2] K. Siegbahn, C. Nordling, G. Johansson, J. Hedman, P. F. Hedden, K. Hamrin, V. Gelius, T. Bergmark, L. O. Werme, R. Manne, Y. Baer. ESCA Applied to Free Molecules, North-Holland Publ. Co, Amsterdam, 1969.
- [3] Л. Н. Мазалов, В. М. Бертенев, А. П. Садовский, Т. И. Гужавина. ЖСХ, 13, 855, 1972.
- [4] А. С. Виноградов, Т. М. Зимкина. Опт. и спектр., 31, 685, 1971.
- [5] А. С. Виноградов. Автореф. канд. дис., Л., 1971.
- [6] S. Rotenberg, H. F. Schaeffer. J. Chem. Phys., 53, 3014, 1970.
- [7] I. H. Hillier, V. R. Saunders. Trans. Faraday Soc., 66, 1544, 1970.
- [8] R. Ross, P. Siegbahn. Theor. Chim. Acta, 21, 368, 1971.
- [9] С. П. Долин, М. Е. Дяткина. ЖСХ, 13, 901, 1972.
- [10] В. И. Барановский, Н. С. Нахмансон. Изв. АН СССР, сер. физ., 36, 282, 1972.
- [11] Л. Н. Мазалов, В. Д. Юматов, В. В. Мурахтанов, Ф. Х. Гельмуханов, Г. Н. Доленко, Е. С. Глушкин, А. В. Кондратенко. Рентгеновские спектры молекул, 56. Наука, Новосибирск, 1977.
- [12] А. В. Кондратенко, Л. Н. Мазалов, К. М. Нейман. Опт. и спектр., 49, 488, 1980.
- [13] А. А. Красноперова, Е. С. Глушкин, В. А. Кочубей. ЖСХ, 17, 1113, 1976.

Поступило в Редакцию 17 июля 1981 г.

УДК 621.373 : 535+535.36

## ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НЕКОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ РАССЕЯНИИ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА

*Е. Л. Бубис, М. В. Васильев, А. А. Леуцёв, Г. А. Пасманик,  
В. Г. Сидорович и А. А. Шилов*

Обращение волнового фронта (ОВФ) пространственно-когерентного (в том числе немонахроматического) оптического излучения при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) в настоящее время детально изучено [1, 2]. Однако вопрос о возможности ОВФ некогерентного оптического излучения, т. е. излучения с изменяющейся во времени формой волнового фронта, экспериментально не исследовался. Этот вопрос представляет интерес в общефизическом плане, так как его решение позволяет установить, в какой мере обратимы процессы вынужденного рассеяния света. Является важным и решение практических задач ОВФ некогерентного излучения, например для компенсации искажений волнового фронта световой волны, распространяющейся в среде с нестационарными во времени неоднородностями показателя преломления [3].

В данной работе экспериментально исследовано явление ОВФ некогерентного оптического излучения при ВРМБ. Для регистрации этого явления исходный одномодовый одночастотный лазерный пучок искажался путем отражения от зеркала, состоявшего из четырех секторов, независимо перемещающихся в продольном направлении. Затем искаженный, ставший некогерентным, пучок направлялся в исследуемую ВРМБ-кювету. После вынужденного рассеяния в этой кювете пучок вновь возвращался на четырехсекторное зеркало. Компенсация нестационарных искажений волнового фронта пучка в результате вторичного отражения от этого зеркала позволяла судить о том, что в исследуемой ВРМБ-кювете происходило ОВФ.

В наших экспериментах указанное четырехсекторное зеркало создавалось во вспомогательной кювете самим лазерным пучком за счет его ВРМБ. Для этого перед вспомогательной кюветой был установлен четырехсекторный линзовый растр, который формировал из излучения лазера четыре сфокусирован-

ных световых пучка с непересекающимися каустиками. Поскольку излучение ВРМБ возбуждалось в этих каустиках независимо, то образовавшаяся во вспомогательной кювете гиперзвуковая волна имела четыре независимо смещающихся друг относительно друга участка волнового фронта. Роль отражательных поверхностей четырехсекторного зеркала играли поверхности пучности этой гиперзвуковой волны.

Характерное время взаимной расфазировки секторов гиперзвукового зеркала определяется временем затухания гиперзвука во вспомогательной нелинейной среде [3, 4, 7]. Коэффициент вторичного отражения гиперзвукового зеркала для световой волны, возвратившейся из исследуемой ВРМБ-кюветы, зависит от частотного смещения этой волны относительно лазерного пучка, от интенсивности лазерного излучения на входе во вспомогательную кювету и от величины нелинейности вспомогательной среды [5]. Параметры вспомогательной нели-

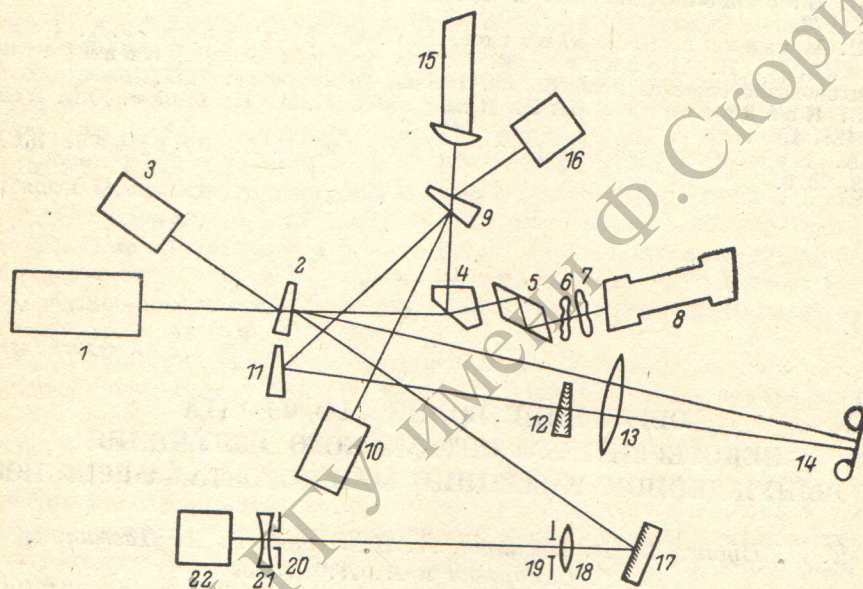


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

нейной среды должны выбираться так, чтобы время расфазировки гиперзвукового зеркала было короче импульса излучения, вторично отраженного от него, а коэффициент вторичного отражения был достаточен для регистрации на фотопленку углового спектра этого излучения. Обоим условиям удовлетворяет ацетон. В соответствии с результатами [3, 4] время, за которое разность фаз двух стоксовых волн, независимо возбужденных в ацетоне, изменяется на  $\pi$ , в среднем примерно равно 20 нс. Длительность импульса излучения, вторично отраженного от гиперзвукового зеркала составляла на уровне половинной интенсивности около 20 нс. Следовательно, нестационарность гиперзвукового зеркала успевала проявиться. Коэффициент усиления  $g$  стоксовой волны в ацетоне равен  $2 \cdot 10^{-2}$  см/МВт. Поэтому при интенсивности излучения на входе во вспомогательную кювету, достигавшей  $200 \div 300$  МВт/см<sup>2</sup>, спектральная селективность почти не снижала коэффициент вторичного отражения.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Одномодовый одночастотный пучок неодимового лазера 1 (энергия  $1 \div 2$  Дж, длительность импульса 35 нс, диаметр на уровне половинной интенсивности  $6 \div 7$  мм, вектор электрического поля параллелен плоскости рисунка) проходил через стеклянный клин 2, который отражал часть излучения в измеритель энергии 3. Затем пучок пропусклся через двулучепреломляющую призму из исландского шпата 4 с оптической осью, лежащей в плоскости рисунка ортогонально к оси пучка в призме. После ромба Френеля 5 пучок проходил через травленную в плавиковой кислоте стеклянную пластинку 6, увеличивавшую его расходимость до  $5 \cdot 10^{-3}$  рад. Далее излучение лазера разбивалось на четыре сходящихся пучка

растром 7, изготовленным из четырех линз с фокусными расстояниями  $F=8$  см. Эти пучки фокусировались во вспомогательную кювету 8 с ацетоном и независимо друг от друга возбуждали в этой кювете ВРМБ.

В каждом секторе фокусирующего растра вынужденно рассеянное в ацетоне излучение воспроизводило с комплексным сопряжением поле лазерного пучка, прошедшего через этот растр в прямом направлении. Однако фаза излучения в различных секторах растра независимо изменялась во времени. После прохождения в обратном направлении рассеивающей пластинки 6 волновой фронт каждого отдельного сектора пучка исправлялся. После ромба Френеля вектор электрического поля пучка становился ортогональным к оптической оси призмы 4. В результате излучение испытывало в призме полное внутреннее отражение и проходило через стеклянный клин 9. Клин 9 частично отражал излучение на калориметр 10 и на клин 11, который направлял пучок в систему регистрации углового спектра. Эта система состояла из автокалибровочного клина 12 [6], линзы 13 с  $F=160$  см и фотокамеры 14 с пленкой И-1030, перед которой были установлены светофильтры.

Пройдя клин 9, излучение фокусировалось линзой с  $F=15$  см в кювету 15 с ацетоном или  $CCl_4$ . В кювете 15 пространственно-некогерентное излучение, возникшее во вспомогательной кювете 8, возбуждало исследовавшееся ВРМБ. Мощность излучения, вынужденно рассеянного в кювете 15, регистрировалась коаксиальным фотоэлементом 16, подключенным к осциллографу С8-12. Затем это излучение отражалось в двулучепреломляющей призме, проходило ромб Френеля, рассеивающую пластинку, линзовый растр и вторично отражалось от гиперзвука, возбужденного во вспомогательной кювете (рассеивающая пластинка была подобрана таким образом, что указанное излучение не могло самостоятельно возбуждать ВРМБ во вспомогательной кювете). Вторично отраженное излучение, пройдя снова через растр, рассеивающую пластинку и ромб Френеля, проходило через призму 4 и отражалось клином 2 в систему регистрации углового спектра и в систему измерения мощности. Последняя состояла из зеркала 17, линзы 18 с  $F=100$  см, диафрагмы 19 диаметром 15 мм, установленной непосредственно за линзой, диафрагмы 20 диаметром 8 мм, помещенной в фокальной плоскости линзы 18, рассеивающей линзы 21 и коаксиального фотоэлемента 22, подключенного к осциллографу С8-12.

Основным источником фона, накладывавшегося на сигнал (излучение, вторично отраженное от гиперзвукового зеркала в кювете 8), было лазерное излучение, вынужденно рассеянное в кювете 8 и не испытывавшее полное внутреннее отражение в призме 4. Энергия этого излучения составляла  $1.5 \div 2\%$  от энергии излучения, отражавшегося в призме 4. Причиной проникновения через призму значительной части света, вынужденно рассеянного во вспомогательной кювете, по-видимому являлось двулучепреломление в окне кюветы. Это окно имело толщину 7 мм и было зажато во фторопластовой оправе для обеспечения герметичности кюветы.

При установке линзового растра вплотную к окну вспомогательной кюветы энергия регистрируемого сигнала была меньше энергии фона. Это объясняется проявлением спектральной селективности гиперзвукового зеркала во вспомогательной кювете [5]. Действительно, так как интенсивность лазерного излучения на входе в кювету составляла около  $120$  МВт/см<sup>2</sup>, то амплитудный инкремент усиления обращенной стоксовой волны был около  $2$  см<sup>-1</sup>. В соответствии с расчетами [5] при этом коэффициент вторичного отражения гиперзвукового зеркала оказался примерно в 3 раза меньше коэффициента отражения исходного лазерного излучения. При удалении растра на 3 см от вспомогательной кюветы возросла интенсивность излучения, что привело к увеличению коэффициента вторичного отражения примерно в три раза. При этом он достиг величины  $15 \div 20\%$ . В результате энергия сигнала превысила энергию фона в 1.5 раза, что обеспечило возможность наблюдения на фотоплёнке углового спектра сигнала.

На рис. 2, вверху представлены фотографии угловых спектров лазерного излучения, вынужденно рассеянного во вспомогательной кювете. Наличие нескольких угловых компонент в этих спектрах обусловлено искажающим действием четырехсекторного гиперзвукового зеркала. Протяженность спектров, определенная на уровне 0.5 по внешним краям их компонент, составляла

во взаимно перпендикулярных направлениях  $(2 \div 2.5) \cdot 10^{-4}$  и  $(4 \div 4.5) \cdot 10^{-4}$  рад. В случае, когда энергии угловых компонент отличались менее, чем в 1.7 раза, в угловом спектре вторично отраженного от вспомогательной кюветы излучения наблюдалась единственная составляющая с осесимметричной расходимостью  $(1.5 \div 1.8) \cdot 10^{-4}$  рад на уровне 0.5 (рис. 2, внизу). Это наблюдалось и в случае, когда в исследуемой кювете находился  $\text{CCl}_4$ , и когда там был ацетон. Следовательно, происходило ОВФ некогерентного оптического излучения при ВРМБ в обоих исследованных веществах. При различии энергий угловых компонент излучения, рассеянного во вспомогательной кювете, более чем в два раза, трактовка экспериментальных результатов становилась затруднительной, так как фон, налагавшийся на сигнал, имел выраженный максимум экспозиции, который можно было ошибочно принять за проявление ОВФ.

Таким образом, нами экспериментально доказано, что разности фаз отдельных, некогерентных между собой, плоских компонент оптического излучения с шириной спектра 15 МГц воспроизводятся с комплексным сопряжением в разностях фаз плоских компонент стоксовой волны, возбуждаемой при ВРМБ в веществах с шириной линии спонтанного манделъштам-бриллюэновского рассеяния 420 МГц ( $\text{CCl}_4$ ) и около 80 МГц (ацетон). Для оценки ошибки, возникающей при таком воспроизведении, был поставлен следующий

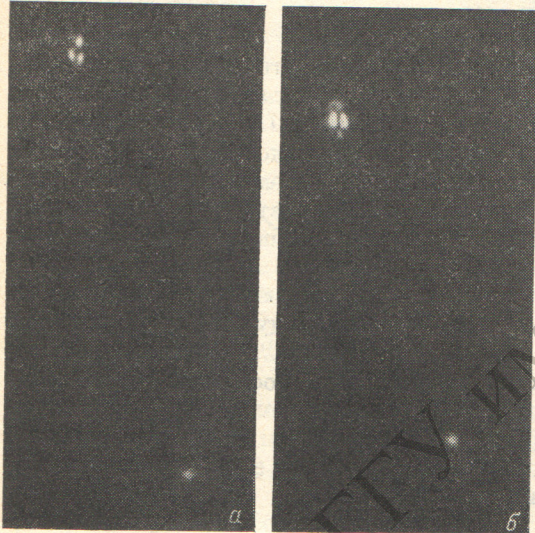


Рис. 2.

Вверху — угловые спектры излучения, отраженного от искажающего гиперзвукового зеркала в двух разных опытах. Различие структур *a* и *б* обусловлено изменением от опыта к опыту временной зависимости флуктуаций фазы по сечению искаженного пучка. Внизу — соответствующие угловые спектры излучения после обращения волнового фронта и вторичного отражения от гиперзвукового зеркала.

щий опыт. Перед вспомогательной кюветой растр заменили одиночной линзой с  $F=12$  см. При этом расходимость излучения, направлявшегося в исследуемую кювету, составила во взаимно перпендикулярных плоскостях  $0.75 \cdot 10^{-4}$  и  $1.5 \cdot 10^{-4}$  рад. Между двулучепреломляющей призмой и исследуемой ВРМБ-кюветой поместили растр из четырех плоскопараллельных стеклянных пластинок с толщинами, различавшимися на  $0.3 \div 0.5$  мм. В результате волновой фронт светового пучка, возбуждавшего ВРМБ в исследуемой кювете, разделился на четыре сектора, имевших разные фазы. Эти фазы не изменялись во времени, т. е. пучок в данном опыте не утрачивал пространственную когерентность. Расходимость вторично отраженного от вспомогательной кюветы излучения при этом была  $1.4 \cdot 10^{-4}$  рад, что в 1.1–1.3 раза меньше, чем в случае, когда перед вспомогательной кюветой стоял четырехлинзовый растр. После изъятия из установки растра, составленного из плоских стеклянных пластинок, расходимость вторично отраженного излучения не изменилась. Эти результаты позволяют найти верхнюю оценку  $\tilde{\Delta\varphi}$  для ошибки  $\Delta\varphi$  в восстановлении фаз некогерентных составляющих возбуждавшего ВРМБ излучения. Если  $\Delta\varphi$  мало зависит от времени в течение вторично отраженного импульса, то  $\tilde{\Delta\varphi} \approx 2 \arccos(q)$ , где  $q$  — уменьшение осевой амплитуды вторично отраженного обращенного излучения, обусловленное отклонением его волнового фронта от плоского. Так как предполагаемое наличие фазовых ошибок уширяло огибающую углового спектра без существенных искажений ее формы, то  $1/q$  было равно коэффициенту уширения огибающей, который изменялся от опыта к опыту в пределах 1.1–1.3. Следовательно, ошибка  $\Delta\varphi$  в отслеживании фазы по сечению обращаемого пучка не могла превышать  $60 \div 80^\circ$ .

Если  $\Delta\varphi$  изменяется за время регистрации вторично отраженного импульса, то экспозиция, наблюдаемая в центре углового спектра вторично отраженного пучка, есть результат усреднения. Осциллограммы показали, что в течение времени ( $t_0 - 10$  нс,  $t_0 + 10$  нс) на фотопленку направлялось около 90% всей энергии вторично отраженного пучка ( $t_0$  — момент, соответствующий максимуму импульса вторично отраженного излучения). Следовательно, усреднение экспозиции в угловом спектре происходило на этом интервале времени. Предположим, что на указанном интервале  $\Delta\varphi$  линейно уменьшается от некоторой максимальной величины  $\psi$  до нуля, т. е. происходит подстройка волнового фронта стоксовой волны под волновой фронт обрабатываемой волны. В этом случае среднюю экспозицию на оси углового спектра можно оценить по формуле

$$\sigma \approx f \int_{t_0 - \alpha}^{t_0 + \alpha} \cos^2 \left[ \frac{\Delta\varphi(t)}{2} \right] P(t) dt,$$

где  $f$  — коэффициент пропорциональности,  $\Delta\varphi(t) = \frac{\psi}{2\alpha}(t_0 + \alpha - t)$ ,  $\alpha = 10$  нс,  $P(t)$  — мощность вторично отраженного пучка. Расчет по этой формуле показывает, что в проведенных опытах верхняя оценка для  $\psi$  должна составлять  $120 \div 150^\circ$ , чтобы уширение углового спектра в 1.1–1.3 раза можно было приписать ошибкам в восстановлении фазы.

Таким образом, наряду с непрерывным отслеживанием изменений волнового фронта обрабатываемой волны проведенные эксперименты не исключают возможности постепенной подстройки волнового фронта стоксовой волны под обрабатываемый волновой фронт. Для того чтобы сделать выбор между двумя указанными возможностями, необходимо провести эксперименты в условиях, когда каждый сектор обрабатываемого волнового фронта изменяет фазу более, чем на  $2\pi$  за время регистрации углового спектра вторично отраженного излучения.

Авторы благодарны Ю. А. Ананьеву и В. Д. Волосову за ценные советы, участникам семинаров, руководимых В. И. Беспаловым, Ю. Н. Денисюком, Б. Я. Зельдовичем и В. В. Рагульским — за обсуждение результатов работы.

#### Литература

- [1] Б. Я. Зельдович, В. И. Поповичев, В. В. Рагульский, Ф. С. Файзуллов. Письма ЖЭТФ, 15, 160, 1972.
- [2] В. И. Поповичев, В. В. Рагульский, Ф. С. Файзуллов. Письма ЖЭТФ, 19, 350, 1974.
- [3] М. В. Васильев, А. П. Гюламирян, А. В. Мамаев, В. В. Рагульский, П. М. Семенов, В. Г. Сидорович. Письма ЖЭТФ, 31, 673, 1980.
- [4] В. И. Беспалов, А. А. Бетин, Г. А. Пасманик, А. А. Шилов. Письма ЖЭТФ, 31, 668, 1980.
- [5] М. В. Васильев, П. М. Семенов, В. Г. Сидорович. Опт. и спектр., 50, 1021, 1981.
- [6] В. В. Рагульский, Ф. С. Файзуллов. Опт. и спектр., 27, 707, 1969.
- [7] Н. Г. Басов, И. Г. Зубарев, А. Б. Миронов, С. И. Михайлов, А. Ю. Окулов. Письма ЖЭТФ, 31, 685, 1980.
- [8] Ю. В. Долгополов, В. А. Комаревский, С. Б. Кормер, Г. Г. Коchemasов, С. М. Куликов, В. М. Муругов, В. Д. Николаев, С. А. Сухарев. ЖЭТФ, 76, 908 1979.

Поступило в Редакцию 5 ноября 1981 г.