

ЭФФЕКТ САМОФОКУСИРОВКИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВКР В НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЯХ

Ф. А. Королев, З. А. Баскакова и Б. В. Смирнов

Выполнено одновременное исследование самофокусировки света и пространственных характеристик ВКР в четыреххлористом углероде и бензоле. Исследования проводились при фокусировке излучения рубинового лазера с модулированной добротностью внутрь кюветы с жидкостью. Изучен режим неустойчивого возбуждения ВКР и показано, что этот режим связан с образованием диэлектрического пробоя в жидкости.

Несмотря на обилие экспериментальных и теоретических работ по исследованию самофокусировки и вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР)¹, не существует ясности в вопросе взаимного влияния этих двух нелинейных явлений.

Мы попытались одновременно изучить самофокусировку и ВКР в жидкостях, обладающих существенно различными постоянными Керра (CCl_4 и C_6H_6), с целью выяснения связи между этими явлениями и характера каждого в отдельности.

1. Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве источника света использовался рубиновый лазер с модулированной добротностью. Максимальная мощность составляла ~ 50 Мвт при длительности импульса на полувысоте ~ 25 нсек. и с расходимостью луча $\sim 18'$. Свет фокусировался в кювету с исследуемой жидкостью ($l=40$ см) линзой $f=15$ см.

В установке была использована кювета специальной конструкции, что позволило ответвлять из любого ее места излучение, идущее как в прямом, так и в обратном направлении. Для ответвления излучения использовались слюдяные пластинки толщиной ~ 5 мкм, устанавливавшиеся под углом 45° по отношению к падающему излучению, причем ориентация пластинок производилась с учетом поляризации падающего излучения.

Общая схема установки приведена на рис. 1.

Спектральный состав ответвляемого излучения исследовался по спектрограммам, получаемым в фокальной плоскости спектрографов ИСП-51 (на рис. 1 — 12 с $F=800$ мм и 15 с $F=270$ мм). Относительная интенсивность спектральных компонент определялась с помощью фотометрирования с учетом спектральной чувствительности фотопластинки. Излучение, выходящее из кюветы, ослаблялось нейтральными фильтрами для того, чтобы все почернения попадали в область нормальных. Для учета различной площади почернений пятно на фотопластинке разбивалось на равные части, каждая из которых фотометрировалась отдельно. Полученное распределение интенсивности по площади интегрировалось. Эти интегральные данные проверялись с помощью непосредственного измерения энергии каждой компоненты термобатарей, откалиброванной по ИМО-1.

¹ См. библиографию [1].

Было отмечено удовлетворительное соответствие в измерении относительных интенсивностей компонент ВКР двумя этими методами. Далее мы укажем на трудности фотометрирования, возникавшие вследствие наличия эффекта самофокусировки. Следует отметить также, что мы исполь-

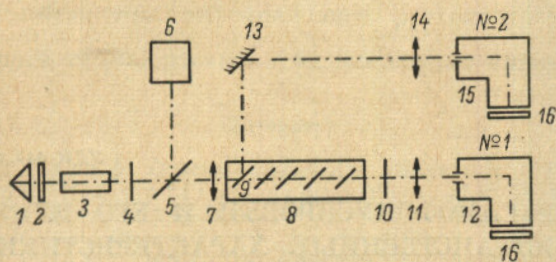


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — Призма полного внутреннего отражения, 2 — пассивный модулятор добротности, 3 — кристалл рубина ($l=116$ мм, $\varnothing=11.5$ мм), 5 — стеклянная пластина, ответвляющая излучение, 6 — термобатарея, 7, 11, 14 — фокусирующие линзы, 8 — кювета с исследуемой жидкостью, 9 — сплюснутые пластинки, 10, 11 — нейтральные фильтры, 13 — зеркало, 12, 15 — спектрографы ИПС-51, 16 — фотопластинки «Инфра-840».

зовали данные фотометрирования лишь для построения качественных кривых интенсивностей в относительных единицах. Каких-либо расчетов, связанных с определением абсолютных интенсивностей компонент ВКР этим методом, не проводилось.

2. Результаты эксперимента

Как уже указывалось, в качестве исследуемых жидкостей нами были выбраны CCl_4 и C_6H_6 , значительно отличающиеся постоянными Керра, а следовательно, и способностью к самофокусировке. C_6H_6 относится к классу сильнофокусирующих веществ, а CCl_4 — к классу слабофокусирующих. Более того, до последнего времени оставался открытым вопрос о возможности возникновения самофокусировки в CCl_4 .

Использованная нами установка позволила нам провести прямое наблюдение за поведением лазерного пучка, сфокусированного в кювету с жидкостью.

Структура пучка хорошо прослеживалась на спектрограммах излучения, ответвляемого из разных мест кюветы. Приводимая ниже спектрограмма (рис. 2, а) показывает, что в CCl_4 на расстоянии 10 см от входного торца кюветы при полной падающей мощности $P_{\text{пад.}}=10$ Мвт происходила канализация центральной части пучка. Наличие широкого канала самофокусировки легко определялось по прожиганию эмульсионного слоя фотоэмульсии. (Напомним, что излучение, падающее на входную диафрагму спектрографа, ослаблялось в 10^4 раз). Характерным для CCl_4 оказалось, что подобное прожигание фотоэмульсии происходило только на частоте возбуждающего лазерного излучения и при таких расстояниях от входного торца кюветы, на которых ВКР либо вообще не наблюдалось (рис. 2, а), либо было слабым (рис. 2, б). На спектрограммах же, снятых из центра кюветы и дальше, прожигания фотоэмульсии ни на одной из частот не происходило, хотя в них явно были видны очень яркие области, часто обладающие пятнистой структурой. Мы интерпретировали это как появление более мелких нитей самофокусировки, каждая из которых в отдельности не могла прожечь фотоэмульсию, а все вместе они давали почернение, доступное обработке (фотометрированию).

О том, что это были именно нити самофокусировки, можно судить по перекачке мощности из предыдущих компонент ВКР в последующие. Из рис. 2, в, например, видно, что наиболее сильные в четвертой стоксовой компоненте ВКР нити полностью истощены на частоте лазера. И на

оборот, нити, довольно сильные на частоте лазера или на частотах первых компонент ВКР, как правило, не проявляются в высших компонентах ВКР. Последнее свидетельствует о слабой перекачке мощности в нитях в последующие компоненты, что, по-видимому, происходит вследствие невысоких значений плотности мощности в них.

Изложенные результаты позволяют нам сделать вывод о том, что даже в таком слабофокусирующем веществе, как CCl_4 , порог самофокусировки ниже наблюдаемого порога ВКР ($P_{\text{пад.}} = 15$ Мвт). Этот же вывод справедлив и для бензола — сильнофокусирующего вещества — с той лишь разницей, что в нем эффекты разыгрываются на гораздо более коротких расстояниях, что в какой-то степени затрудняет изучение его пространственных характеристик.

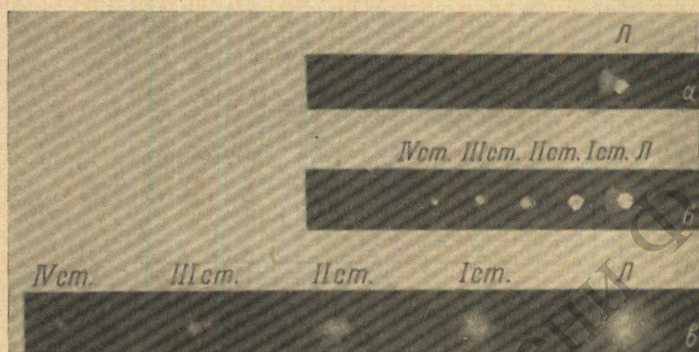


Рис. 2. Спектрограммы излучения CCl_4 .

а — самофокусировка ($l = 10$ см, $P_{\text{пад.}} = 10$ Мвт), б — самофокусировка и ВКР ($l = 12$ см, $P_{\text{пад.}} = 30$ Мвт), в — разбиение на нити ($l = 21$ см, $P_{\text{пад.}} = 30$ Мвт).

Пространственные характеристики ВКР в C_6H_6 и CCl_4 представлены на рис. 3 и 4. По оси абсцисс отложена длина пути луча вдоль кюветы, по оси ординат — интенсивность лазерного излучения и первых трех стоксовых компонент ВКР, измеренная в относительных единицах.

Из сопоставления пространственных характеристик ВКР, построенных для C_6H_6 и CCl_4 , видно, что характер поведения кривых примерно одинаков для обеих жидкостей. Кривые, относящиеся к первым стоксовым компонентам ВКР, интенсивно нарастают с расстоянием, достигают своего максимума и начинают убывать. Интенсивность высших стоксовых компонент монотонно возрастает. Кривая, соответствующая вышедшему из кюветы лазерному излучению, в случае C_6H_6 сильно истощается, а в случае CCl_4 , убывая по интенсивности, остается сильнее всех стоксовых компонент. Существенное различие кривых, построенных для CCl_4 и C_6H_6 , состоит в том, что возбуждение ВКР в CCl_4 происходит на больших расстояниях от входного торца кюветы (по сравнению со случаем C_6H_6) при одинаковых значениях мощности падающего излучения. Это говорит о том, что характерная длина развития неустойчивости канала самофокусировки $L_{\text{н}}$ (см. разд. 3) в CCl_4 на порядок превышает характерную длину в C_6H_6 . При повышении $P_{\text{пад.}}$ характерные длины уменьшаются, о чем свидетельствует наступление насыщения компонент ВКР на более коротких расстояниях (рис. 3, а и б).

При проведении эксперимента было замечено, что в CCl_4 от выстрела к выстрелу резко менялся порог ВКР. Даже когда мощность падающего на кювету излучения намного превышала наименьшую пороговую мощность возбуждения ВКР $P_{\text{пад.}} = 15$ Мвт, могла не появиться ни одна из компонент ВКР. Хорошая повторяемость наблюдалась лишь после превышения $P_{\text{пад.}} = 30$ Мвт. Таким образом, область неустойчивого возбуждения ВКР в CCl_4 занимала довольно широкий диапазон: от $P_{\text{пад.}} = 15$ Мвт

до $P_{\text{пад.}} = 30$ Мвт. Вероятно, неустойчивый режим возбуждения ВКР связан с невозможностью разбиения широкого канала самофокусировки на нити, плотность излучения в которых была бы достаточно для возникновения ВКР. Для C_6H_6 также имелась область значений $P_{\text{пад.}}$, в пределах которой проявлялся подобный режим. Однако эта область была значительно уже и составляла всего 2 Мвт.

Изучение режима неустойчивости возбуждения ВКР показало, что он тесно связан с образованием диэлектрического пробоя в жидкости.

В наших экспериментах ВКР появлялось только в том случае, когда имел место диэлектрический пробой.

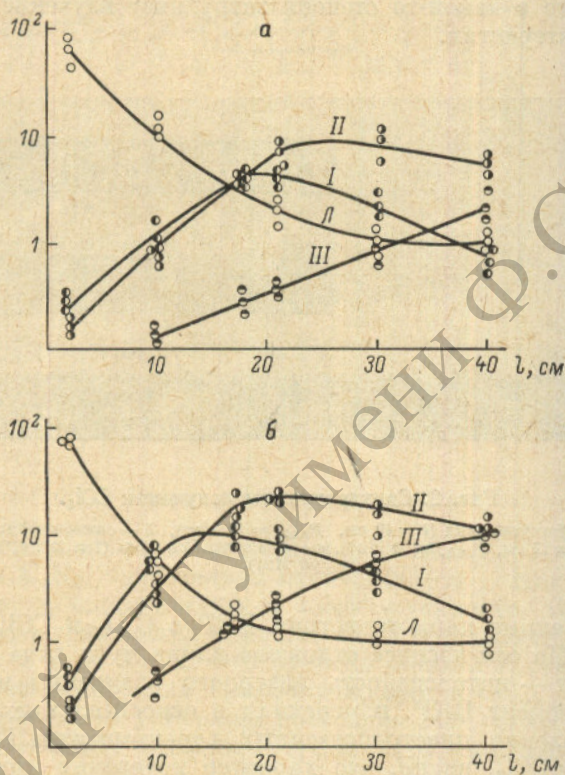


Рис. 3. Пространственные характеристики ВКР в C_6H_6 при $P_{\text{пад.}} = 14$ Мвт (а) и при $P_{\text{пад.}} = 40$ Мвт (б).

В работе [2] указывалось на повышение порога пробоя от выстрела к выстрелу в жидкостях, содержащих растворенные газы (таких, как CCl_4 и C_6H_6). Рассматривались также эффекты, сопутствующие диэлектрическому пробоям: характерное свечение, кавитация, формирование ударной волны и т. д. Наличие растворенных газов в жидкости способствовало понижению порога диэлектрического пробоя. От выстрела к выстрелу жидкость дегазировалась, от чего порог пробоя повышался, пока не достигал некоторой максимальной величины. При увеличении интервала времени между выстрелами порог пробоя вновь снижался до первоначального.

Диэлектрический пробой, наблюдавшийся нами визуально и фотографически, обладал всеми указанными особенностями.

В работе [3] показано, что ударная волна, сопровождающая диэлектрический пробой, вполне может повлиять на развитие самофокусировки, разбивая широкий канал на нити самофокусировки. Механизм разбиения на нити широкого канала за счет существования в нем избыточного давления рассматривался также в [4].

Таким образом, странное на первый взгляд поведение порога ВКР хорошо объясняется, если предположить его прямую зависимость от порога диэлектрического пробоя. Последний зависит от чистоты исследуемой жидкости и максимален для наиболее чистых жидкостей. Возникновение диэлектрического пробоя нарушает плавный, постепенный ход канализации излучения. При этом широкий канал самофокусировки может разбиться на нити меньшего диаметра, обладающие высокой плотностью мощности, в которых и происходит возбуждение ВКР. Такой механизм возбуждения ВКР особенно важен для случаев, когда вещества

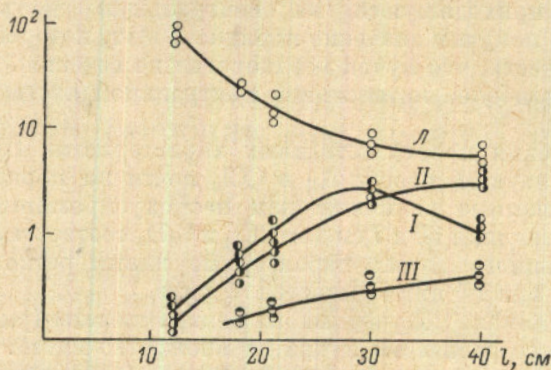


Рис. 4. Пространственные характеристики ВКР в CCl_4 при $P_{\text{пад.}} = 30$ Мвт.

находятся вне резонатора. В подобных случаях приходится пользоваться кюветами достаточной длины, чтобы в них могла возникать самофокусировка. К тому же, как мы показали выше, не всякая самофокусировка может привести к возбуждению ВКР. Фокусировка излучения с помощью линзы внутрь кюветы облегчает задачу получения мощного ВКР. Линза не только компенсирует расходимость лазерного пучка, но создает также диэлектрический пробой, роль которого велика. Важно отметить, что следует подбирать разумные длины фокусных расстояний линз. Если фокусное расстояние линзы меньше характерной длины, на которой может в данных условиях развиваться канализация пучка, то, естественно, никакого разбиения на нити не произойдет, и ВКР не возникнет.

Такой эксперимент был нами проделан. При использовании линзы с $f = 5$ см, несмотря на наличие диэлектрического пробоя в обеих исследуемых жидкостях, ВКР возбуждалось только в C_6H_6 .

3. Сравнение с теоретическими данными

Из теории следует [5, 6], что в интенсивном световом пучке существуют наиболее быстро фокусирующиеся поперечные Λ_{\perp} и продольные Λ_{\parallel} масштабы, определяемые выражениями

$$\Lambda_{\perp} = \lambda_0 c^{1/2} (32\pi n \varepsilon' W)^{-1/2},$$

$$\Lambda_{\parallel} = 4n \Lambda_{\perp} (\pi \lambda_0)^{-1}.$$

Здесь W — плотность мощности лазерного пучка, ε' определяет нелинейную добавку к диэлектрической проницаемости среды

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = 1 + \varepsilon' |E_0|^2.$$

Оценки, произведенные для длин возникновения неустойчивости (Λ_{\parallel}), поперечных размеров нитей самофокусировки и критических мощностей

захвата ($P_{кр.}$), довольно хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными. $P_{кр.}$ вычислялось по формуле [6]

$$P_{кр.} = \frac{5.76\lambda^2 c}{32\pi^3 n_0^2},$$

справедливой, вообще говоря, для нефокусированного пучка. Для CSl_4 получилось значение критической мощности $P_{кр.} = 1$ Мвт, а для C_6H_6 $P_{кр.} = 120$ квт. Это намного ниже тех полных значений $P_{пад.}$, при которых мы наблюдали самофокусировку. Однако если оценить, например, для CSl_4 мощность, приходящуюся на центральную часть пучка при $P_{пад.} = 10$ Мвт, то получим значение порядка 2 Мвт, которое ближе к расчетному. Если учесть, что пучок неоднороден по сечению, то эти оценки, сделанные для наиболее интенсивной центральной части пучка, можно считать верными.

Из сопоставления пространственных характеристик ВКР видно, что длина развития неустойчивости $\Delta_{||}$ в CSl_4 почти на порядок превышает $\Delta_{||}$ в C_6H_6 . Расчетные величины для нефокусированного пучка при $P_{пад.} = 20$ Мвт составляют 60 и 7 см для CSl_4 и C_6H_6 соответственно. Для случая сфокусированного пучка характерные длины резко сокращаются, по соотношению между ними остается в силе.

На спектрограммах, полученных из центра кюветы (рис. 2, в) в CSl_4 , наблюдается четкое разбиение пучка на множество нитей. Теоретические оценки диаметров нитей дают для CSl_4 $\Lambda_{\perp} = 500$ мкм при $P_{пад.} = 20$ Мвт. Еще меньшие диаметры получаются для C_6H_6 : $\Lambda_{\perp} = 100$ мкм при $P_{пад.} = 20$ Мвт. Пользуясь этими значениями, можно оценить плотность мощности в каждой нити самофокусировки по формуле [5]

$$W_{н} = c\lambda_0^2 (128n_0^2)^{-1}.$$

При $P_{пад.} = 20$ Мвт плотность мощности в нити для CSl_4 и C_6H_6 составляет ~ 100 Мвт/см².

На основании сказанного можно попытаться представить процессы, происходящие в жидкости при облучении ее гигантским импульсом лазера, следующим образом. При определенных значениях $P_{пад.}$ в жидкости может образоваться широкий канал самофокусировки. Если в кювету производится фокусировка, то в зависимости от величины $P_{пад.}$ канал может возникнуть либо вблизи места фокуса, либо (при больших $P_{пад.}$) ближе к переднему торцу кюветы. Этот канал формируется из наиболее интенсивной центральной части лазерного пучка. Плотности мощности в нем недостаточно, чтобы возбудилось ВКР. Когда $P_{пад.}$ настолько велико, что превышает порог диэлектрического пробоя в жидкости, происходит разбиение канала на нити меньшего диаметра. Хотя мощность в нитях невысока, в них возбуждается ВКР за счет большой плотности мощности. При дальнейшем увеличении $P_{пад.}$ наблюдается возрастание интегральной интенсивности компонент ВКР в данном месте кюветы, что можно объяснить увеличением количества образованных нитей.

Литература

- [1] С. А. Ахманов, А. Н. Сухоруков, Р. В. Хохлов. Усп. физ. наук., 93, 19, 1967.
- [2] E. F. Sagome, C. E. Moeller, N. A. Clark. J. Acoust. Soc. Am., 40, 1462, 1966.
- [3] A. Nordvik, R. I. Collins. IEEE J. Quant. Electron., QE-6, 254, 1970.
- [4] А. В. Бутенин, В. В. Коробкин, А. А. Малютин, М. Я. Щелев. Письма в ЖЭТФ, 6, 687, 1967.
- [5] В. И. Беспалов, В. И. Таланов. Письма в ЖЭТФ, 3, 471, 1966.
- [6] C. S. Wang. Phys. Rev., 173, 908, 1968.

Поступило в Редакцию 18 декабря 1970 г.