

Простой демонстрационный эксперимент по нелинейной оптике (Тепловая дефокусировка лазерного излучения)

Введение

Нелинейная оптика до сих пор рассматривается как новый, перспективный раздел физики. На самом деле она уже намного старше молодых специалистов-физиков, которые закончив обучение, так и не видели ни одного нелинейного оптического эффекта. О том, что эта проблема существует, свидетельствует, например, одна из публикаций в журнале "Успехи физических наук" [1]. Мощные лазеры, применяющиеся для возбуждения нелинейных оптических явлений, довольно дороги и используются чаще всего в стационарных установках, не предназначенных для выполнения лабораторных работ большими потоками студентов или для лекционных демонстраций.

Однако существуют беспороговые нелинейные оптические явления. К ним относится тепловая дефокусировка интенсивного излучения в поглощающих растворах [2]. Это явление приходится учитывать как побочный эффект, обычно нежелательный, при работе с интенсивным излучением. Специально тепловая дефокусировка изучалась в большом числе работ, например в [3,4]. Элементарная теория явления изложена в работе [5].

Теория тепловой дефокусировки

Эффект тепловой дефокусировки или самофокусировки [5] наблюдается в нелинейных средах с кубической поляризацией. В области прозрачности нелинейных изотропных сред имеет место следующая зависимость показателя преломления от интенсивности I падающего излучения:

$$n = n_0 + n_{\text{нл}} \cdot I \quad (1)$$

где коэффициент $n_{\text{нл}}$ определяет связь между кубической поляризацией и полем световой волны. При воздействии на нелинейную среду ограниченного лазерного пучка, в среде возникает самофокусировка при $n_{\text{нл}} > 0$ и самодефокусировка при $n_{\text{нл}} < 0$. Самодефокусировка является беспороговым эффектом и может наблюдаться с помощью непрерывного излучения газовых лазеров с мощностью около 10 мВт.

Пусть сфокусированный лазерный пучок имеет гауссову форму, т.е. $I = I_0 \cdot \exp(-r^2 \cdot w^{-2})$, где w — радиус сфокусированного пучка внутри тонкой нелинейной плоскопараллельной среды. Как следует из (1), показатель преломления становится функцией r и световые пучки, проходящие через тонкий слой толщины l , приобретают фазу на выходе, зависящую от r :

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_{\text{нл}} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_0 l + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_{\text{нл}} l \cdot I_0 \cdot \exp(-r^2 \cdot w^{-2}) \quad (2)$$

т.е. поверхность постоянной фазы $\varphi = \text{const}$ становится выпуклой и среда приобретает свойства отрицательной линзы (рис. 1).

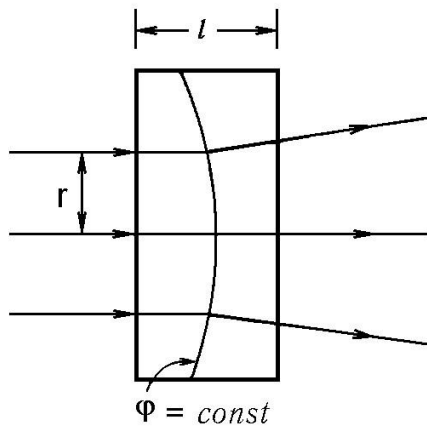


Рис. 1. Преобразование гауссового пучка в слое нелинейной среды как в отрицательной линзе.

На рис. 2а дано радиальное распределение $\varphi_{\text{нл}}$. Так как расходящиеся лучи нормальны к поверхности $\varphi = \text{const}$, они выходят из наведенной в среде линзы под углом θ равным:

$$\theta = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi_{\text{нл}}}{dw} \quad (3)$$

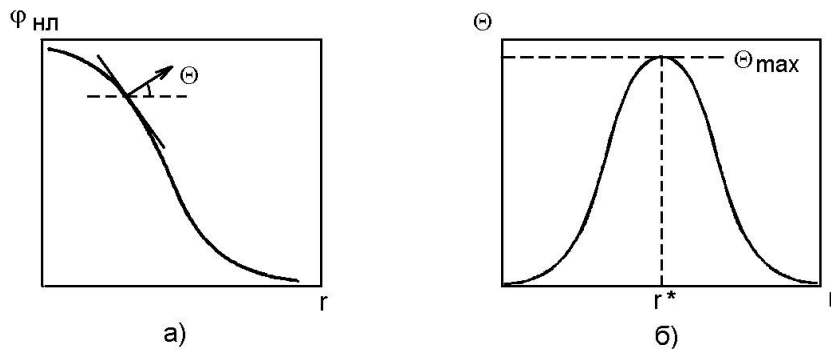


Рис. 2. Зависимость нелинейной добавки к фазе (а) и угла расходимости (б) от радиуса гауссового пучка.

Из (2) и (3) следует, что максимальный угол отклонения достигается для луча, отстоящего от оси пучка на расстоянии $r^* = 2^{-1/2} \cdot w$ (рис. 2б), и:

$$\theta_{\text{max}} = \frac{2^{1/2} n_{\text{нл}} \cdot I_0 l}{w} \cdot \exp(-1/2) \quad (4)$$

т.е. θ_{max} тем больше, чем больше I_0 , l , $n_{\text{нл}}$ и чем меньше радиус сфокусированного пучка w .

Эффект тепловой дефокусировки можно наблюдать по увеличению светового пятна, создаваемого на удаленном экране непрерывным излучением

лазера, прошедшим через плоскопараллельную кювету с слабопоглощающим раствором. В стационарном режиме в растворе устанавливается радиальный градиент температуры и плотности и, как следствие, градиент показателя преломления n . Жидкость становится оптически неоднородной. На экране будет наблюдаться кольцо, диаметр которого равен $D = 2\theta_{\max} \cdot L$, где L — расстояние от кюветы до экрана.

Для большинства жидкостей тепловой градиент показателя преломления при постоянном давлении $(dn/dT)_p < 0$ и зависимость n от координаты r вдоль радиуса светового пучка имеет минимум на его оси. При заметном тепловом самовоздействии пучок преобразуется плоскопараллельным слоем поглощающей жидкости как отрицательной линзой. При низких плотностях мощности изменение угловой расходимости пучка зависит от его мощности P и радиуса w при входе в поглощающий слой:

$$\theta - \theta_0 = \frac{(dn/dT)_p \cdot P}{\pi w k} \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot l)] \quad (5)$$

где θ_0 — начальная расходимость пучка, l — толщина поглощающего слоя жидкости, α — коэффициент поглощения, k — коэффициент теплопроводности жидкости. В этом случае тепловую линзу можно считать тонкой, т.е. учитывать только изменение волнового фронта и пренебрегать расширением пучка внутри кюветы.

При гауссовом распределении интенсивности по сечению пучка, на входе в поглощающий слой лучи с начальной координатой $r \approx r^*$ испытывают в нем максимальное отклонение и фокусное расстояние тепловой линзы оказывается зависящим от r [4], т.е. $F = r^* \cdot \theta_{\max}^{-1}$.

Для получения правильного представления о характере распределения плотности излучения по сечению пучка на выходе необходимо учесть когерентность лазерного излучения [6,7]. Взаимно пересекаясь, лучи испытывают в поглощающем растворе разное отклонение, на выходе из кюветы интерферируют и образуют на экране систему концентрических темных и светлых колец. Изменение фазы лучей внутри кюветы в приближении тонкой линзы следует за ходом $grad(n)$, имея максимум на оси пучка $\varphi(0)$ и приближаясь к постоянному значению $\varphi(\infty)$ при $r \rightarrow \infty$. Этим определяется максимальное число колец в абберрационной картине, которое не превосходит $N = -[\varphi(\infty) - \varphi(0)]/2\pi$ и увеличивается с ростом мощности излучения.

Из формулы (5) следует, что увеличение мощности приводит к пропорциональному возрастанию расходимости пучка. Однако, было обнаружено [4], что и при постоянной мощности излучения можно существенно усилить эффект, сфокусировав излучение на входе в поглощающую среду собирающей линзой, т.е. уменьшив w . Тем не менее и в более поздних работах для изучения эффекта тепловой дефокусировки использовались лазеры с выходной мощностью от 0,1 Вт и более — по-видимому сказывалась инерция, заставлявшая нелинейные

эффекты искать при возможно больших мощностях излучения. При этом не использовались в достаточной мере дополнительные возможности усиления эффекта за счет рационального выбора параметров поглощающего слоя.

Выполнение эксперимента

Нам удалось подобрать условия, при которых сильный эффект дефокусировки, с увеличением угловой расходимости излучения приблизительно на 5° , может быть получен с гелий-неоновым лазером мощностью всего 5 мВт [8]. Такие условия позволяют использовать эффект для лекционной демонстрации, доступной для любой вузовской и даже школьной аудитории. Особенностью предлагаемой постановки демонстрационного эксперимента является фокусировка излучения на вход кюветы относительно короткофокусной линзой и использование тонких кювет высокой оптической плотности с целесообразно выбранным поглощающим раствором.

Фокусировка, повышая плотность мощности излучения, позволяет за счет уменьшения размеров интенсивно нагреваемого объема раствора существенно ослабить искажающее влияние конвекции, приводящее к дополнительному оттоку выделившегося тепла и уменьшению вертикального диаметра светового пятна [4]. Влияние конвекции уменьшается и в тонких кюветах. При этом, как ясно из (5), коэффициент поглощения раствора a должен быть достаточно большим, чтобы выполнялось условие $\exp(-a'l) \ll 1$. Практически, верхний предел оптической плотности раствора определяется необходимостью обеспечить на экране освещенность, достаточную для демонстрации эффекта в большой аудитории. Отметим, что при $\theta \gg \theta_0$ применение лазеров большей мощности при прочих равных условиях только снижает освещенность E экрана дефокусированным пучком, так как с учетом (5) $E \sim P^{-1}$.

При малой концентрации поглощающего вещества его влияние на теплофизические свойства раствора пренебрежимо мало; необходимо лишь, чтобы оно имело хорошую растворимость в выбранном растворителе, не разлагалось и не люминесцировало под действием излучения лазера. Более серьезные требования предъявляются к растворителю. Как ясно из физики явления и из выражения (5), для получения сильной дефокусировки необходимо выбирать жидкость с низкой теплопроводностью и сильной температурной зависимостью показателя преломления. Из справочных данных следует, что вода, использованная во многих работах для изучения тепловой дефокусировки, наименее удачный растворитель; далеко не оптимален и спирт, с которым выполнено большинство исследований этого эффекта. При учете требований доступности и малой токсичности для лекционных демонстраций можно рекомендовать растворы на основе хлороформа или ацетона.

Для демонстрации эффекта тепловой линзы используют одномодовый гелий-неоновый лазер мощностью 5–10 мВт, излучающий длину волны $\lambda = 633$ нм. Пучок пропускают через собирающую линзу с фокусным расстоянием 45 мм. После линзы помещают плоскопараллельную кювету толщиной 1–4 мм с поглощающим раствором. После кюветы свет попадает на удаленный экран. Используется раствор бриллиантовой зелени в хлороформе. При демонстрации

явления в аудитории-амфитеатре вместимостью 200 человек применялась кювета с оптической плотностью $a'l = 0,6$; на экране, установленном за линзой на расстоянии 4 м картина имела диаметр около 50 см и достаточную для наблюдения при зашторенных окнах яркость. В аудитории на 25–30 человек имеет смысл повысить оптическую плотность до 0.8 и сократить расстояние до экрана, чтобы, не уменьшая существенно размеров картины на экране, получить более контрастную картину аберраций.

На рис. 3 показаны фотографии светового пятна, образованного пучком с мощностью 6 мВт на экране, установленном на расстоянии 2 м от фокусирующей линзы, при использовании кюветы с указанным раствором толщиной 1 мм и оптической плотностью 0,6 (что соответствует концентрации около 10^{-3} вес. %). Фотографии а и б соответствуют расположению кюветы вблизи перетяжки гауссового пучка, созданного фокусирующей линзой: а) — в кювету входит расходящийся пучок лучей (для оценки масштаба картины на фотографии показан спичечный коробок); б) — в кювету входит сходящийся пучок и наблюдается эффект кажущейся "фокусировки"; фотография с) соответствует установке кюветы на значительном удалении от линзы, когда нелинейный эффект не проявляется (такое же пятно на экране наблюдается и без кюветы). Демонстрация теплового самовоздействия излучения состоит в последовательном получении на экране картин, отвечающих случаям с, а, б при перемещении кюветы с раствором вдоль оси лазерного пучка.

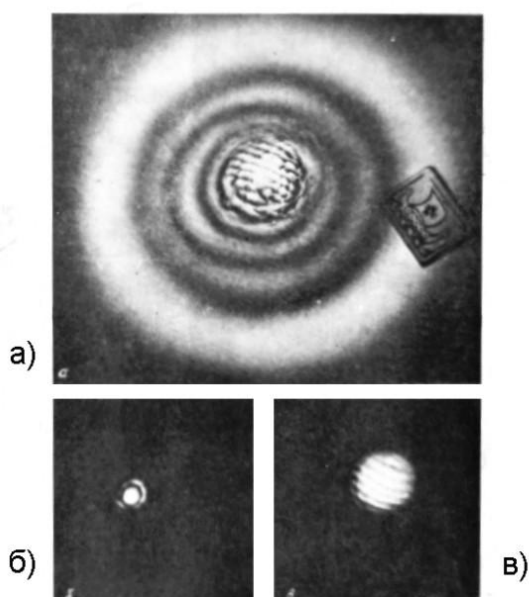


Рис. 3. Фотографии расходящегося (а), «фокусированного» (б) и необработанного лазерного пучка (с).

Заключение

Рассмотренный демонстрационный эксперимент очень просто реализуется при использовании доступных и недорогих газовых лазеров непрерывного действия (сравни, например, с описанием аналогичной демонстрации в работе

[5]). Эксперимент нагляден и несложен для объяснения, его подготовка и демонстрация требуют немного времени.

Литература

1. Марков Г.А. Демонстрация самофокусировки плазменных волн // УФН. — 1983. —141, вып.2. —С.382–383.
2. Riecknoff К.Е. Self-induced divergence of CW-laser beams in liquids — a new nonlinear effect in the propagation of light // Appl. Phys. Lett. —1966. —9, №2. —Р.87–88.
3. Ахманов С.А., Криндач Д.П., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. Нелинейная дефокусировка лазерных пучков // Письма ЖЭТФ. —1967. —62, вып.2. —С.509–513.
4. Алешкевич В.А., Мигулин А.В., Сухоруков А.П., Шумилов Э.Н. Аберрации и предельные расходимости непрерывного лазерного излучения в дефокусирующих средах // ЖЭТФ. —1972. —62, вып.2. —С.551–561.
5. Алешкевич В. А., Киселев Д.Ф., Коржачкин В.В. Лазеры в лекционном эксперименте. —М.: Изд-во Моск. ун-та., 1985.
6. Слюсарев Г.Г. Геометрическая оптика. —М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1946.
7. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Соболев Н.Н., Сухоруков А.П. Самофокусировка лазерного излучения при переходе Фредерикса в нелинейной фазе жидкого кристалла // ЖЭТФ. —1981. —81, вып.3(9). —С.933–94.
8. Агеев Л.А., Кулева М.Г., Яровая Р.Г. Простой демонстрационный эксперимент по нелинейной оптике (Тепловая дефокусировка лазерного излучения) // УФН. —1987. —151, вып.3. —С.537–540.