

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

[535:530.182+621,378.325].05

**ПРОСТОЙ ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
ПО НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКЕ
(Тепловая дефокусировка лазерного излучения)***Л. А. Агеев, М. Г. Кулева, Р. Г. Яровая*

Нелинейная оптика, о которой и поныне принято говорить как о новом перспективном разделе физики, на самом деле уже старше молодых специалистов-физиков, заканчивающих вуз, нередко так и не увидев ни одного нелинейного оптического эффекта. О том, что эта проблема существует, свидетельствует, например, одна из недавних публикаций в УФН¹. Мощные лазеры, как правило, применяющиеся для возбуждения нелинейных оптических явлений, все еще дефицитны, дороги и используются в стационарных установках, не предназначенных ни для выполнения на них лабораторных работ большими потоками студентов, ни для лекционных демонстраций.

Вместе с тем существуют и беспороговые нелинейные оптические явления; в частности, к ним относится тепловая дефокусировка интенсивного излучения в поглощающих растворах². Явление это приходится учитывать как побочный эффект, обычно нежелательный, во многих случаях работы с интенсивным излучением, а специально оно изучалось в большом числе исследований (см., например, ^{3,4}). Элементарная теория тепловой дефокусировки изложена в ⁵.

Эффект тепловой дефокусировки можно наблюдать по увеличению светового пятна, создаваемого на удаленном экране непрерывным излучением лазера, прошедшим через плоскопараллельную кювету с поглощающим раствором. В стационарном режиме в растворе устанавливается радиальный градиент температуры и плотности и, как следствие, градиент показателя преломления. Жидкость становится оптически неоднородной.

Известно, что в неоднородной среде прямолинейность распространения света нарушается. Простой расчет показывает ⁶, что радиус кривизны луча R связан с градиентом показателя преломления выражением

$$R^{-1} = \frac{\sin i \cdot \text{grad } n}{n}, \quad (1)$$

где i — угол между лучом и нормалью к поверхностям $n = \text{const}$. Так как в большинстве жидкостей $(\partial n / \partial T)_p < 0$, функция $n(r)$ имеет минимум на оси светового пучка. Согласно (1) такое распределение $n(r)$ приводит к дефокусировке света; в условиях заметного теплового самовоздействия пучок света преобразуется плоскопараллельной кюветой с поглощающей жидкостью как отрицательной линзой. При относительно низких плотностях мощности изменение угловой расходимости пучка зависит от его мощности P и радиуса при входе в поглощающий слой a_0 как

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{(\partial n / \partial T)_p P}{\pi n a_0 k} (1 - e^{-\alpha l}); \quad (2)$$

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

Наведенная излучением тепловая линза обладает сферическими аберрациями. Действительно, $\text{grad } n = 0$ как на оси пучка, так и при $r \rightarrow \infty$, проходя через максимум на некотором расстоянии r_m от оси. При произвольном, в частности, гауссовом распределении интенсивности по сечению пучка на входе в поглощающий слой с начальной координатой $r_0 \approx r_m$ испытывают в нем максимальное отклонение, фокусное расстояние тепловой линзы оказывается зависящим от r_0 ⁴.

Для получения правильного представления о характере распределения плотности излучения по сечению пучка на выходе необходимо учесть когерентность лазерного излучения^{6,7}. Взаимно пересекаясь, лучи, испытывавшие в поглощающем растворе различное отклонение, по выходе из кюветы интерферируют, образуя на экране систему концентрических темных и светлых колец. Изменение фазы лучей внутри кюветы в приближении тонкой линзы следует за ходом $\text{grad } n$, имея минимум на оси пучка S_0 и приближаясь к постоянному значению S_∞ при $r_0 \approx a_0$. Этим определяется максимальное число колец в аберрационной картине, которое не превосходит $N = (S_\infty - S_0)/2\pi$ и увеличивается с ростом мощности излучения.

Как следует из выражения (2), увеличение мощности приводит и к пропорциональному возрастанию расходимости пучка. Было, однако, обнаружено⁴, что и при постоянной мощности излучения можно существенно усилить эффект, сфокусировав излучение на входе в поглощающую среду собирающей линзой, т. е. уменьшив a_0 . Тем не менее и в более поздних работах для изучения эффекта тепловой дефокусировки использовались лазеры с выходной мощностью от 0,1 Вт и более — сказывалась инерция, заставлявшая нелинейные эффекты искать при возможно больших мощностях излучения. При этом недостаточно использовались дополнительные возможности усиления эффекта за счет рационального выбора параметров поглощающего слоя.

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 6 мВт, что позволяет рекомендовать его для лекционной демонстрации, доступной 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 пятна⁴. Влияние конвекции уменьшается и в тонких кюветках. При этом, как ясно из (2), коэффициент поглощения раствора α должен быть достаточно большим, чтобы выполнялось $\exp(-\alpha l) \ll 1$. На практике верхний предел оптической плотности кюветы определяется необходимостью обеспечить на экране освещенность, достаточную для демонстрации эффекта в большой аудитории. Отметим, что при $\vartheta \gg \vartheta_0$ применение лазеров большей мощности при прочих равных условиях только снижает освещенность E экрана дефокусированным пучком, так как с учетом (2) $E \sim P^{-1}$.

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 (2), для получения сильной дефокусировки необходимо выбрать жидкость с низкой теплоемкостью и 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

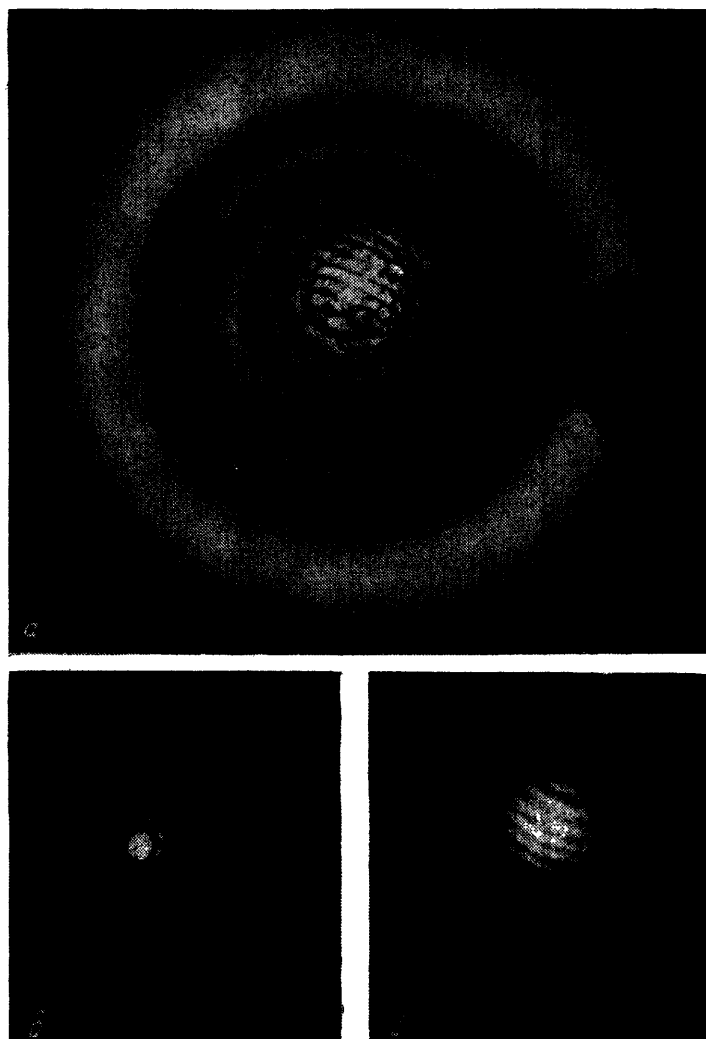


Рис. 1. Картина, создаваемая на экране излучением гелий-неонового лазера мощностью 6 мВт: при дефокусировке тепловой линзой расходящегося оверового пучка (а), сходящегося пучка (б), в отсутствие дефокусировки (в)

учете естественных требований доступности и малой токсичности для лекционных демонстраций можно рекомендовать растворы на основе хлороформа или ацетона.

Установка для демонстрации эффекта тепловой линзы состоит из гелий-неонового лазера мощностью 5–10 мВт, собирающей линзы с фокусным расстоянием 45 мм, плоскопараллельной кюветы толщиной 1–4 мм с поглощающим раствором, установленных последовательно на оптической скамье, и удаленного экрана. Используется раствор бриллиантовой зелени в хлороформе. При демонстрации явления в аудитории — амфитеатре вместимостью

200 человек — применялась кювета с оптической плотностью $\alpha l = 0,6$; на экране, установленном за линзой на расстоянии 4 м, картина имеет 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 рисунке приведены фотографии светового пятна, образованного излучением лазера ЛГ-79-2 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. %). Рис. *a* и *б* соответствуют расположению кюветы вблизи перетяжки гауссова пучка, созданной фокусирующей линзой: *a* — в кювету входит расходящийся пучок лучей, *б* — сходящийся пучок (кажушаяся фокусировка); рис. *в* соответствует установке кюветы на значительном удалении от линзы, когда нелинейные эффекты не проявляются. Демонстрация теплового самовоздействия излучения состоит в последовательном получении на экране картин, отвечающих случаям *в*, *a*, *б* при перемещении кюветы с раствором вдоль оптической скамьи.

Предлагаемый демонстрационный эксперимент предельно прост в техническом отношении, выполняется с доступными газовыми лазерами непрерывного действия (ср. с описанием аналогичной демонстрации в⁵), нагляден и несложен для объяснения, его подготовка и демонстрация требуют немного времени.

Харьковский государственный университет
им. А. М. Горького

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Г. А. // УФН. 1983. Т. 141. С. 382.
2. Riesknoff K. E. // Appl. Phys. Lett. 1966. V. 9. P. 87.
3. Ахманов С. А., Криндач Д. П., Сухоруков А. П., Хохлов Р. В. // Письма ЖЭТФ. 1967. Т. 6. С. 509.
4. Алешкевич В. А., Мигулин А. В., Сухоруков А. П., Шумилов Э. Н. // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. С. 551.
5. Алешкевич В. А., Киселев Д. Ф., Корчажкин 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. // ЖЭТФ. 1981. Т. 81. С. 933.