

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

535

АВТОКАНАЛИЗАЦИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

В октябре 1964 г. в журнале «Physical Review Letters» была опубликована заметка одного из основателей квантовой радиофизики, лауреата нобелевской премии Ч. Таунса с сотрудниками Р. Чао и Э. Гармайр¹, посвященная обсуждению весьма заманчивой возможности — распространению света в виде очень тонкого пучка (толщиной порядка нескольких длин волны) без существенного расхождения. Приоритет в этом вопросе принадлежит Г. А. Аскарьяну²; это специально отметили авторы¹ в своем последующем письме^{1а}. Для многих экспериментальных задач, которые стало возможным решать с помощью когерентных световых колебаний, генерируемых лазерами, весьма желательно иметь тонкий пучок света (имеющий благодаря этому большую амплитуду колебаний при заданной полной мощности) со строго постоянным направлением распространения. В качестве примера можно назвать задачу о генерации оптических гармоник, где нужны одновременно большие амплитуды поля и точное равенство фазовых скоростей луча лазера и гармоники, выполнимое лишь в очень узком интервале углов (см., например,²).

Однако по общим теоремам оптики сужение сечения пучка всегда приводит к увеличению угловой расходимости. Если пучок имеет отличную от нуля угловую ширину уже в пределах геометрической оптики, т. е. имеет конечную яркость, указанный факт следует из сохранения яркости оптическими системами; если же угловая расходимость α пучка равна идеальному дифракционному минимуму, то и она определяется диаметром пучка D : $\alpha \approx \lambda/D$. Угловая расходимость приводит к тому, что пучок расширяется, и поле в нем тем самым ослабевает. Преодолеть расходимость в линейной оптике можно, лишь создав волновод. Этот способ хорошо известен: канализировать свет практически без потерь на расхождение с помощью тонких прозрачных нитей (так называемая волоконная оптика). При этом лучи, идущие по волокну под не слишком большими углами к его оси, испытывают полное внутреннее отражение на границе вещества — воздух, и поэтому энергия из волокна не утекает. В связи с дальнейшим уместно подчеркнуть, что явление полного внутреннего отражения (в отличие от обычного френелевского) отнюдь не связано с предположением о резкой границе двух сред или о справедливости геометрической оптики. Это явление существует тогда, когда решение волнового уравнения в области с показателем преломления n_1 (внутренность нити) имеет волновой характер, а в окружающей среде с показателем преломления n_0 , $n_0 < n_1$, — экспоненциально затухает; при этом от вида границы зависит только коэффициент при экспоненте, а не ее показатель.

Впервые в 1962 г. Г. А. Аскарьяном³ была высказана идея о том, что неоднородность показателя преломления, необходимая для рассмотренного способа канализации света, может быть создана в первоначально однородной среде действием самого света на вещество. По Аскарьяну³, и вслед за ним В. И. Таланову⁴ и Л. В. Келдышу⁵, возможный механизм явления состоит в перемещении атомов, а в плазме — электронов и ионов в область с большим или соответственно меньшим значением амплитуды светового поля — электрострикция, в данном случае вызываемая высокочастотным полем световой волны. При этом эффект автоматически имеет нужный для самофокусировки знак.

Наконец, в упомянутой выше работе¹ Р. Чао, Э. Гармайр и Ч. Таунс четко ставят вопрос о том, можно ли реально осуществить автоканализацию, и для светового диапазона дают положительный ответ. В¹ описание автоканализации света производится с помощью понятия нелинейной поляризуемости среды (кубичный член). Последний, в частности, описывает случай, когда при распространении сильной электромагнитной (световой) волны с амплитудой поля E в веществе эффективная диэлектрическая постоянная и показатель преломления на частоте света изменяются по закону

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 E^2, \quad n = n_0 + n_2 E^2.$$

Согласно ¹ коэффициент n_2 может быть обусловлен: 1) высокочастотным керр-эффектом, включая переориентацию молекул, 2) электрострикцией и, наконец, 3) нелинейностью электронной поляризуемости; последняя ответственна также и за генерацию третьей гармоники света. При этом, по ¹, для жидкостей существенны только первые два механизма, а для твердых тел — только второй, электрострикция.

Для первого механизма эффект возникает за счет того, что анизотропные молекулы выстраиваются по направлениям так, чтобы сильнее взаимодействовать с внешним полем. В этом случае n_2 зависит от типа поляризации волны: плоской, круговой или эллиптической. Время установления нелинейного члена в показателе преломления $\tau \sim 10^{-11} - 10^{-12}$ сек есть порядок величины времени, необходимого для поворота молекул; сама же константа n_2 , аналогично случаю статического керр-эффекта, должна падать с ростом температуры, так как тепловое движение расстраивает ориентированность молекул. Для электрострикции τ есть время распространения звука поперек пучка, для размеров порядка нескольких световых длин волн оно составляет $\tau \sim 10^{-9} - 10^{-10}$ сек. Процессы электронной нелинейной поляризуемости почти точно следуют по фазе за колебаниями самой волны, и поэтому времена установления для этого механизма $\tau \sim 1/\omega_{\text{св}} = 10^{-15}$ сек и, как и для керр-эффекта, не зависят от размера пучка. Эти времена следует сравнивать с длительностью импульса современных мощных лазеров $\tau_{\text{л}} \sim 2 \cdot 10^{-8}$ сек.

При небольшом различии между n и n_0 максимальный угол, составляемый с осью лучом, еще испытывающим полное внутреннее отражение, равен $\alpha_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2(n-n_0)}{n_0}}$.

Приравняв его минимальному углу дифракционного расхождения, авторы ¹ получают, что для автоканализации необходимо, чтобы мощность пучка с идеальным дифракционным расхождением превышала пороговое значение:

$$P = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{n_0 E^2 c}{8\pi} \geq (1,22\lambda)^2 \frac{c}{64n_2}.$$

Интересно отметить, что получившееся значение не содержит размера пучка D и пропорционально λ^2 . Приведем из ¹ значения P в мегаваттах, вычисленные в предположении электрострикционного механизма для ряда веществ: сероуглерод — 0,2; бензол — 0,25; вода — 1; воздух (1 атм) — 80; воздух (100 атм) — 0,8; стекло (тяжелый силикатный флинт) — 4; кальцит — 4; сапфир — 20.

Авторы ¹ записывают и решают нелинейное волновое уравнение для аксиально-симметричного случая. Это решение подтверждает правильность простых оценок для мощностей, близких к пороговым; при повышении же мощности над порогом диаметр пучка уменьшается до размеров порядка длины волны. При таких больших плотностях энергии уже становится существенным нелинейное (двухфотонное) поглощение света, и первоначально прозрачная среда может стать сильнопоглощающей.

В настоящее время уже, по-видимому, можно утверждать, что автоканализация света наблюдается экспериментально. Это работа Херчера ⁶ (на нее ссылаются авторы ¹), где были обнаружены длинные тонкие трещинки в стекле, образовавшиеся после фокусировки внутрь стекла мощного лазерного импульса, и работа Пилипецкого и Рустамова (МГУ) ⁷, в которой весьма тонкий пучок света, также возникающий при фокусировке лазерного импульса в жидкость, был сфотографирован сбоку и с торца.

От эксперимента сейчас нужно ждать количественных данных о явлении, выяснения механизма для члена $n_2 E^2$, исследования условий типа фокусировки, необходимых для возникновения автоканализации. Этот же вопрос должен быть исследован и теоретически: ведь до сих пор рассмотрено только стационарное решение типа установившегося волновода; неясны и вопросы об устойчивости решения, о роли поглощения. Добавим в заключение, что явление автоканализации света, вызвавшее большой интерес в широких научных кругах, несомненно найдет себе большое количество научных и технических приложений.

Б. 3.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. Y. Chiao, E. Garmire and C. H. Townes, Phys. Rev Letts 13, 479 (1964).
- 1a. R. Y. Chiao, E. Garmire and C. H. Townes, Phys. Rev. Zetts. 14, 1056 (1965).—Erratum.
2. С. А. А х м а н о в, Р. В. Х о х л о в, Проблемы нелинейной оптики (Итоги науки), М., Изд. ВИНТИ, 1964.
3. Г. А. А с к а р ь я н, ЖЭТФ 42, 1567 (1962).
4. В. И. Т а л а н о в, Изв. вузов (Радиофизика) 7, 564 (1964).
5. Л. В. К е л д ы ш, Доклад на сессии Отд. общ. и прикл. физики АН СССР, 1964 г.
6. M. H e r c h e r, J. Opt. Soc. Amer. 54, 563 (1964).
7. Н. Ф. П и л и п е ц к и й, А. Р. Р у с т а м о в, Письма ЖЭТФ 2, 88 (1965).