

УДК 535.375

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОГО БЕССЕЛЕВОГО ПУЧКА В КРИСТАЛЛЕ ЙОДАТА ЛИТИЯ

К. З. ГРИГОРЯН

Институт физических исследований НАН Армении

(Поступила в редакцию 10 марта 1998г.)

Обнаружено явление восстановления Бесселевого пучка в кристалле  $\text{LiIO}_3$ , суть которого заключается в том, что если перекрыть на входе в кристалл некоторую часть кольца, образующего Бесселевский пучок, то на выходе наблюдается восстановление обрезанной части кольца. Явление восстановления интерпретировано дифракцией пучка на нитевидном повреждении, возникающем в кристалле при прохождении интенсивного пучка. Интерпретация дана в рамках геометрической теории дифракции.

Бесселевы пучки (БП) являются новым классом решений скалярного волнового уравнения [1,2]. Распределение поля Бесселевого пучка нулевого порядка, распространяющегося вдоль оси  $z$ , определяется выражением

$$E(x, y, z, t) = \exp[i(\beta z - \alpha t)] \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[i\alpha(x \cos \varphi + y \sin \varphi)] d\varphi = \exp[i(\beta z - \alpha t)] J_0(\alpha \rho), \quad (1)$$

где  $\alpha = k \sin \gamma$ ,  $\beta = k \cos \gamma$  – поперечная и продольная компоненты волнового вектора, соответственно,  $\rho^2 = x^2 + y^2$ ,  $J_0(\alpha \rho)$  – функция Бесселя нулевого порядка, первого класса [1]. Бесселевский пучок нулевого порядка можно представить как суперпозицию плоских волн одинаковой амплитуды, волновые векторы которых расположены на поверхности конуса и образуют угол  $\gamma$  с осью распространения. Интерференция этих плоских волн приводит к формированию узкого максимума по оси распространения. Ширина максимума идеального Бесселевого пучка определяется выражением  $d = 0.766\lambda/\sin \gamma$  [1,2]. Поперечное распределение поля остается одним и тем же в любой плоскости, перпендикулярной к оси распространения. В эксперименте БП формируют различными методами, например, применением кольцевой щели, помещенной в фокальной плоскости собирающей линзы [2], с помощью зонной пластинки [3,4], аксикона [5]. Физически реализуемый БП сохраняет основные свойства идеального пучка только на определенной длине

$Z_{\max} = R/\operatorname{tg} \gamma$ , где  $Z_{\max}$  – длина области существования БП,  $R$  – радиус апертуры элемента, используемого для формирования пучка,  $\gamma$  – угол конуса БП [1,2]. В последнее время появилось много работ, посвященных изучению нелинейных явлений в поле Бесселевых пучков [4-10]. Интерес к использованию БП в нелинейной оптике обусловлен рядом характерных особенностей, являющихся следствием неколлинеарного взаимодействия бесконечно большого числа плоских волн в узкой и протяженной области. К числу их относятся: подавление фазовой самомодуляции в поле БП [6,7], угловое разделение накачки и рассеянного излучения, возможность перестройки частоты вынужденного комбинационного рассеяния на поляритонах [5]. Недавно было обнаружено явление самовосстановления БП в органических жидкостях [8]. Целью настоящей работы была попытка обнаружить это явление в кристалле  $\text{LiIO}_3$ .

В качестве возбуждающего излучения использовался пуг импульсов лазера АИГ:Nd с пассивной синхронизацией мод. Пуг состоял из 5-6 импульсов длительностью 30 пс каждый, с интервалом между ними 6,7 нс. Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Излучение лазера преобразовывалось во вторую гармонику с помощью кристалла КДП. Длина волны второй гармоники  $\lambda = 532$  нм, энергия излучения была порядка 1 мДж, мощность 6-8 МВт. Для формирования Бесселевого пучка применялся аксикон с углом при основании  $\delta = 15^\circ$ , который обеспечивал угол конуса БП  $\gamma = 7,4^\circ$  (в воздухе). Это следует из соотношения между углом при основании аксикона  $\delta$  и углом конуса  $\gamma$  [5]

$$\sin \gamma = (n-1) \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

где  $n$  – показатель преломления аксикона ( $n = 1,48$ ). Мы использовали у-срез кристалла  $\text{LiIO}_3$  длиной 3,5 см. Пространственное распределение регистрировалось фотографически.

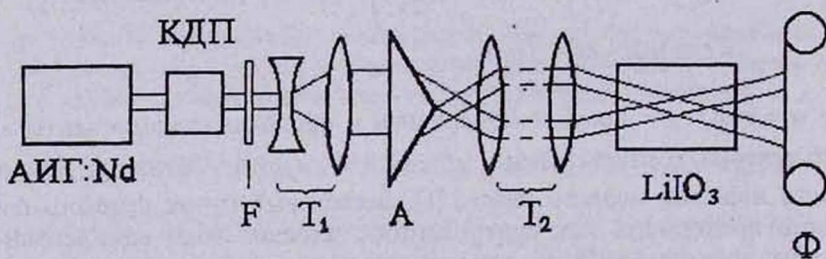


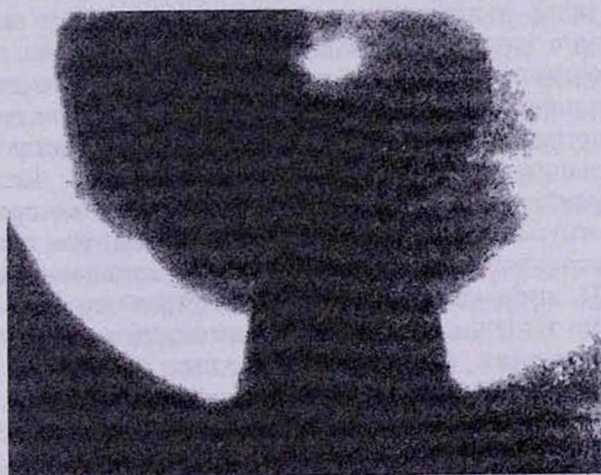
Рис.1. Экспериментальная установка. F – фильтр, отсекающий излучение основной частоты,  $T_1$  – расширяющий телескоп, A – аксикон,  $T_2$  – проецирующий телескоп, Ф – фотоаппарат.

В кристалле  $\text{LiIO}_3$  явления самовосстановления, подобного обнаруженному в жидкостях, не наблюдалось вплоть до интенсивности пучка, равной порогу ВКР (близкой к порогу оптического разрушения) (рис.2а). Однако был обнаружен другой тип восстановления. Суть этого явления заключается в следующем. При прохождении интенсивного БП, близкого к порогу оптического разрушения, в кристалле наблюдается

вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) на поляритонах, связанных с полносимметричным колебанием  $795\text{ см}^{-1}$  [5]. По оси конуса БП генерировалось интенсивное стоксовое излучение ВКР на длине волны  $\lambda_s = 554\text{ нм}$  [5]. По истечении 10-20 лазерных вспышек интенсивность стоксового излучения ВКР начинает ослабевать, качество стоксового пучка ухудшается и в кристалле появляются повреждения. Если на этой стадии перекрыть на входе в кристалл некоторую часть кольца, образующего БП, то на выходе наблюдается восстановление обрезанной части кольца (рис.26). Восстановление не зависит от интенсивности освещающего пучка. При уменьшении интенсивности освещающего пучка



а



б

Рис.2. Распределение интенсивности БП в дальней зоне, с блокированным азимутальным участком. а) Интенсивность пучка ниже порога ВКР: восстановление отсутствует. б) Интенсивность выше порога ВКР: обрезанная часть кольца восстанавливается после прохождения через кристалл.

в 10-20 раз восстановление можно было наблюдать в течение неограниченного времени. Восстановление кольца очень чувствительно и к разъюстировке оптической системы: небольшое смещение кристалла относительно первоначального положения приводит к исчезновению восстановления части кольца. Явление восстановления удается наблюдать при блокировании лишь ограниченной части кольца, примерно  $50^{\circ}$ - $70^{\circ}$  азимутального угла.

Явление восстановления кольца БП качественно можно интерпретировать дифракцией обрезанного пучка на нитевидном повреждении на оси конуса, возникающем в кристалле при прохождении интенсивного БП. Наиболее наглядным является объяснение в рамках геометрической теории дифракции, разработанной Келлером и основанной на обобщенном принципе Ферма [11]. Согласно этой теории, когда луч падает на край препятствия, то возникают дополнительные лучи, которые называют дифрагировавшими лучами. Эти лучи удовлетворяют закону красовой дифракции, согласно которому дифрагировавший луч и соответствующий падающий луч образуют равные углы с краем и лежат в противоположных сторонах от плоскости, нормальной к краю в точке дифракции. Таким образом, один падающий луч создает бесконечное множество дифрагировавших лучей, которые будут лежать на поверхности конуса, осью которого является касательная к краю в точке дифракции (рис.3). Половинный угол конуса  $\gamma$  равен углу между падающим лучом и краем препятствия. Положения геометрической теории дифракции экспериментально были проверены и подтверждены в работах [12,13]. В нашем случае плоские волны, составляющие БП, дифрагируют на нитевидном повреждении и порождают дифрагировавшие волны вдоль поверхности конуса БП и тем самым приводят к восстановлению заблокированного азимутального участка кольца. Отметим, что вклад в интенсивность дифрагировавшего света для любого азимутального направления вдоль поверхности конуса дают все составляющие волны необрезанной части БП. Резкая чувствительность процесса восстановления относительно разъюстировки оптической системы обусловлено тем, что при небольшом смещении кристалла относительно первоначального положения, обрезанный пучок уже не пересекает узкую поврежденную область кристалла, ширина которой порядка ширины максимума БП, не дифрагирует на нем и, как следствие, восстановление исчезает. Отсутствие в кристалле самовосстановления интенсивного БП, наблюдавшегося в органических жидкостях [8], обусловлено, на наш взгляд, следующим обстоятельством. Согласно [8], явление самовосстановления БП в исследованных жидкостях есть результат самодифракции БП, вызванной нелинейным изменением показателя преломления в узкой и протяженной области на оси конуса, где интенсивность излучения имеет острый максимум. Физическим механизмом, ответственным за индуцированное светом изменение показателя преломления в исследованных жидкостях, является ориентация анизотропных молекул в электрическом поле световой волны. В пользу этого механизма свидетельствует тот факт, что самовосстановлению БП в жидкостях предшествует (по порогу интенсивности) генерация вдоль оси конуса излучения на практически несмещенной частоте (на частоте возбуждающего излучения). Это излучение было интерпретировано

авторами [8] как вынужденное рассеяние в крыле линии Релея. Как известно [14], этот вид вынужденного рассеяния обусловлен ориентацией молекул, вызванной интенсивной световой волной, и поэтому легко наблюдается в жидкостях, но не в кристаллах.

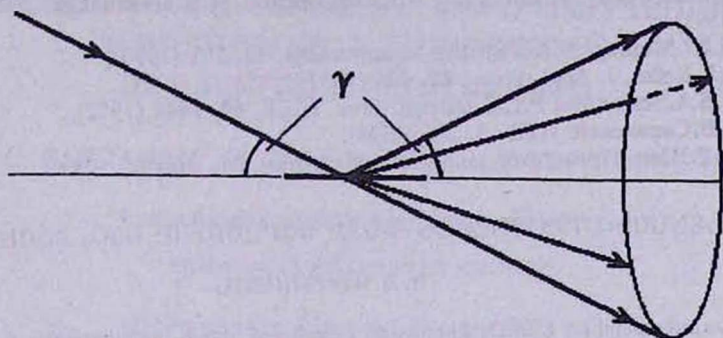


Рис.3. Образование конуса дифрагировавших лучей при падении плоской волны на нитевидное препятствие.

Отметим также, что в наших экспериментах с кристаллом  $\text{LiIO}_3$  единственным явлением, предшествующим оптическому разрушению, было поляритонное ВКР. Какого-либо излучения на несмещенной частоте вдоль оси конуса БП не наблюдалось. Для проверки утверждения о том, что явление восстановления происходит из-за дифракции пучка на нитевидном повреждении, был проведен контрольный эксперимент. В качестве нитевидного препятствия в эксперименте использовались тонкая металлическая проволока или кварцевое волокно. Луч от He-Ne лазера направлялся на препятствие под различными углами. Диаметры препятствия и освещающего пучка были почти одинакового размера. После падения луча на препятствие возникало множество дифрагировавших лучей, которые лежали на поверхности конуса, осью которого являлась ось препятствия. На экране, который ставился перпендикулярно плоскости препятствия и пучка, наблюдалось кольцо. При изменении угла падения луча на препятствие, диаметр кольца также изменялся.

В заключение отметим, что в кристалле  $\text{LiIO}_3$  был обнаружен другой тип восстановления БП, отличающийся от явления самовосстановления в органических жидкостях. Это явление объясняется дифракцией пучка на повреждении, возникающем в кристалле при прохождении интенсивного БП. Такая интерпретация удовлетворительно согласуется с геометрической теорией дифракции.

Выражаю благодарность С.Б.Согомоняну за помощь, оказанную при проведении этой работы, и за полезные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J.Durnin. JOSA, A4, 651 (1987).
2. J.Durnin, J.J.Miceli Jr., and J.H.Eberly. Phys. Rev. Lett., 58, 1499 (1987).
3. J.Turunen, A.Vasara, and A.T.Friberg. Applied Optics, 27, 3959 (1988).

4. T.Wulle and S.Herminghaus. Phys. Rev. Lett., 70, 1401 (1993).
5. S.Klewitz, P.Leiderer, S.Herminghaus, and S.Sogomonian. Optics Letters, 21, 248 (1996).
6. I.Golub. Optics Letters, 20, 1847 (1995).
7. S.Klewitz, S.Herminghaus, S.Sogomonian, T.Jentzsch, and M.Woerner. CLEO - 97, Baltimore, May 1997, Technical Digest, CTh 05, p.410.
8. S.Sogomonian, S.Klewitz, S.Herminghaus. Opt. Comm., 139, 313 (1997).
9. Н.Е.Андреев, Ю.А.Аристов, Л.Ю.Полонский, Л.Н.Пятницкий. ЖЭТФ, 73, 969 (1991).
10. Л.Ю.Марголин. Квантовая электроника, 23, 281 (1996).
11. J.B.Keller. J. Appl. Phys., 28, 426 (1957).
12. T.B.A.Senior and P.L.E.Usleng. Proc. IEEE, 60, 1448 (1972).
13. А.В.Сивяевский. ПТЭ, 5, 216 (1993).
14. И.Р.Шен. Принципы нелинейной оптики. М., Наука, 1989.

## ԻՆՏԵՆՍԻՎ ԲԵՍՍԵԼՅԱՆ ՓՆՋԻ ՏԱՐԱԾՈՒՄԸ $\text{LiIO}_3$ ԲՅՈՒՐԵՂՈՒՄ

Կ. Զ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

Հայտնաբերված է  $\text{LiIO}_3$  բյուրեղում Բեսսելյան փնջի վերականգնման երևույթը, որի էությունը կայանում է նրանում, որ բյուրեղի մուտքում Բեսսելյան փունջ կազմող օղակի մի մասը փակելիս, ելքում դիտվում է ամբողջովին վերականգնված օղակ: Վերականգնման երևույթը բացատրվում է ինտենսիվ փնջի տարածման ընթացքում բյուրեղում առաջացած գծաձև վնասվածքի վրա փնջի դիֆրակցիայով: Բացատրությունը բերվում է դիֆրակցիայի երկրաչափական տեսության շրջանակներում:

## PROPAGATION OF INTENSE BESSEL BEAM IN A $\text{LiIO}_3$ CRYSTAL

K. Z. GRIGORIAN

The regeneration of Bessel beam in a  $\text{LiIO}_3$  crystal has been observed. The essence of this phenomenon is the following: if one blocks an azimuthal part of the Bessel beam ring, a full ring is reconstructed after the beam passes through the crystal. The regeneration phenomenon is interpreted as being due to the diffraction from a filament-shaped damage region, caused by the intense beam. The regeneration is given in terms of the geometrical theory of diffraction.