

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ ЭКРАННЫМИ РЕГИСТРАТОРАМИ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

*В.В. Лях, А.И. Малышев\*, В.Ф. Пиндюрин, А.Г. Полецук\*, А.Г. Седухин\**

*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, e-mail: [lyakh@inp.nsk.su](mailto:lyakh@inp.nsk.su)*

*\*Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск, e-mail: [sedukhin@iae.nsk.su](mailto:sedukhin@iae.nsk.su)*

Для диапазона длин волн 0.200 – 0.486 мкм предложен высокоразрешающий метод визуализации когерентных световых полей с помощью экранных регистраторов рентгеновского излучения на основе щелочно-галлоидных кристаллов (LiF и NaCl). Данный метод позволяют осуществлять визуализацию в произвольных, в том числе и в продольных, срезах (сечениях) световых полей с предельным разрешением до долей микрона.

## **Введение**

В практике анализа и синтеза световых полей часто возникают задачи экспериментальной пространственной визуализации их тонкой структуры. Это касается, например, полей интенсивности исследуемых световых пучков, а также областей фокусировки разнообразных оптических элементов. Для визуализации таких полей наибольшее применение получили два метода. Это метод поточечного или непрерывного пространственного сканирования картин интенсивности световых полей с помощью анализирующей диафрагмы малого размера, сопрягаемой с одиночным фотодетектором, и метод непосредственной двумерной регистрации таких картин с помощью светочувствительных материалов или элементов, наносимых, как правило, на плоскую поверхность. В последнем случае, в качестве светочувствительных материалов или элементов применяются различные фотоэмульсии, порошковые люминофоры, а также многоэлементные фотодетекторы.

Наиболее просто регистрируются поперечные срезы световых полей, когда направления анализируемых световых потоков близки к нормали поверхности светочувствительных материалов (элементов) либо анализирующей диафрагмы. Картины же продольных срезов световых полей, как правило, удастся визуализировать только первым из названных методов. Однако его использование требует относительно длительного и сложного в реализации сбора информации при сканировании световых полей, а также имеет невысокую разрешающую способность. Неприменимость второго метода вызвана тем, что при скользящем падении света на регистрирующие материалы, наряду с резким снижением чувствительности фотоэмульсий (или световой эффективности фотодетекторов), могут возникать существенные нелинейные искажения при передаче градаций интенсивности, даже при незначительной вариации углов падения световых лучей. Кроме того, сама структура световых полей может искажаться вносимыми непрозрачными элементами, используемыми для визуализации. В качестве одного из альтернативных подходов к осуществлению визуализации продольных срезов световых полей иногда используют высвечивание световых полей в аэрозолях типа дыма. Но такой подход является слишком грубым и позволяет получать лишь приближенные

картины с большими искажениями, из-за неравномерности светового рассеяния на частицах дыма. В настоящей работе рассмотрен и экспериментально исследован новый высокоразрешающий метод визуализации трехмерных когерентных световых полей с помощью экранных регистраторов рентгеновского излучения на основе прозрачных щелочно-галлоидных кристаллов (LiF и NaCl), модифицированных введением дополнительных примесей [1].

## **1. Трехмерная визуализация когерентных световых полей**

Суть предлагаемого метода по высокоразрешающей визуализации картин в произвольных срезах световых полей, включая в первую очередь продольные срезы, состоит в регистрации картин фотолюминесценции, возбуждаемых исследуемыми световыми пучками в названных щелочно-галлоидных кристаллах. В качестве светочувствительного слоя таких кристаллов, в простейшем случае, может быть использована их любая полированная грань, предварительно облученная рентгеновским излучением. Известно, что под действием рентгеновского излучения в названных кристаллах образуются стабильные радиационно-наведенные дефекты (скрытые центры радиофотолюминесценции), способные при их возбуждении световым полем в диапазоне длин волн от 0.200 до 0.486 мкм испускать на другой длине волны вторичные световые волны (для LiF – в желто-зеленой области, для NaCl – в красной области) [2,3]. При этом центры люминесценции не разрушаются при их высвечивании, но могут быть полностью разрушены при нагреве кристаллов до 400 °С. Данный эффект фотолюминесценции по существу обеспечивает световую развязку между первичным возбуждающим излучением исследуемых световых полей и вторичным (переизлучаемым) люминесцентным излучением. Так как регистрация люминесцентного отклика осуществляется обычными оптическими методами, то такая развязка обеспечивает возможность регистрации продольных картин интенсивности световых полей при ортогональном (по отношению к оси пучка) расположении оси проекционного объектива, используемого для регистрации. Регистрация картин световых полей может быть проведена с микронным пространственным разрешением при отсутствии зернистости изображения. В спектральном диапазоне рентгеновского

излучения от  $10^\circ \text{A}$  до долей  $^\circ \text{A}$  глубина формирования радиационно-наведенных дефектов в данном типе рентгеночувствительных материалов заключена в диапазоне от десятков микрон до нескольких миллиметров. Это, в свою очередь, позволяет легко регулировать толщину люминесцирующего слоя и, тем самым, обеспечивать различные условия высвечивания исследуемых световых полей. Так высвечивание световых полей близкое к тому, что наблюдается в аэрозолях типа дыма, можно обеспечить в толстых люминесцентных слоях (порядка нескольких миллиметров), которые формируются при нормальной засветке плоскости кристаллов жестким синхротронным излучением. При таком варианте регистрируется усредненная картина, являющаяся суперпозицией плоских некогерентных картин интенсивности в различных по глубине кристалла тонких срезах. Формирование в кристалле тонкого и плоского люминесцентного слоя (порядка 1 - 3 мкм), служащего более высококачественным и высоко разрешающим регистрирующим экраном, может быть осуществлено предварительным облучением кристалла жестким коллимированным синхротронным излучением через узкую щелевую маску. При этом толщина формируемого люминесцентного слоя практически не уширяется до глубины просвечивания кристалла (расстоянии от щели) порядка  $D \sim n\Delta^2/2\lambda_{\text{СИ}}$ , где  $n$  - показатель преломления кристалла на длине волны возбуждения кристалла  $\lambda_{\text{ВОЗБ}}$ ,  $\Delta$  - ширина щели,  $\lambda_{\text{СИ}}$  - средняя длина волны используемого синхротронного излучения. Так при  $\Delta = 1$  мкм,  $n = 1.396$  (кристалл LiF при  $\lambda_{\text{ВОЗБ}} \sim 0.456$  мкм) и вариации  $\lambda_{\text{СИ}}$  от  $10$  до  $0.5^\circ \text{A}$  глубина формируемого слоя  $D$  будет варьировать в пределах от  $0.7$  до  $14$  мм. При этом визуализацию продольной картины интенсивности светового пучка (в тонком слое) удобно осуществлять при совмещении плоскости сформированного люминесцентного слоя с осью пучка и ориентации размера  $D$  ортогонально оси пучка. Для трехмерной визуализации картин исследуемых световых полей в различных продольных срезах необходимо также обеспечить точное совмещение плоскости сформированного люминесцентного слоя с осью пучка и, перемещая кристалл ортогонально оси пучка, регистрировать плоские картины фотолюминесценции.

## 2. Экспериментальное исследование

С целью экспериментальной демонстрации, нами была проведена визуализация продольных картин интенсивности световых полей, образуемых в области фокусировки стандартных микрообъективов и дифракционного аксикона с кольцевой апертурой. В качестве люминесцентных экранов были применены

кристаллы LiF (площадью  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup> и толщиной 2 мм), поверхностно активированные добавками Са и облученные при нормальном падении синхротронным излучением. Источником синхротронного излучения служило накопительное кольцо ВЭПП-3 ( $E_\ell = 1.2$  ГэВ). Института ядерной физики СО РАН им. Будкера [4], а источником возбуждающего люминесценцию когерентного излучения - аргоновый лазер с длиной волны  $\lambda_{\text{ВОЗБ}} = 0.456$  мкм. Средняя длина волны вторичного некогерентного излучения, испускаемого образованными в кристалле центрами радиофотолюминесценции, составляла  $\lambda_{\text{ЛЮМ}} \sim 0.580$  мкм. Дифракционный аксикон представлял собой бинарно-фазовую кольцевую решетку с периодом штрихов 2 мкм, сформированную на кварцевой подложке и имеющую внутренний и наружный радиусы кольцевой апертуры равные соответственно 1.38 и 1.84 мм. Синтез топологии решетки был выполнен с использованием кругового лазерного фотопостроителя и термохимической технологии прямой записи, разработанных в Институте автоматики и электрометрии СО РАН [5,6]. В качестве регистрирующего материала при записи первичной амплитудной маски решетки служили пленки хрома толщиной порядка 0.1 мкм. Фазовая структура аксикона изготавливалась методом контактной фотолитографии с последующим сухим плазмо-химическим травлением кварца, а глубина травления выбиралась из расчета получения предельно высокой световой интенсивности решетки в первом порядке дифракции (при подавлении всех четных паразитных порядков). На рис.1 (а) представлена экспериментально зарегистрированная в толстом слое кристалла LiF (с помощью CCD-камеры) двумерная картина распределения интенсивности в продольном сечении области фокусировки стандартного микрообъектива с числовой апертурой 0.65. На рис.1 (б) показан одномерный профиль интенсивности в поперечном сечении этого распределения, проходящим через фокус. Видоизмененные рис. 2 (а) и (б) аналогичны рис. 1 (а) и (б), но соответствуют микрообъективу с числовой апертурой 0.40. На рис. 3 (а) и (б) показаны картины распределения интенсивности в продольном сечении области фокусировки кольцевого дифракционного аксикона (для средней его части) и профиль интенсивности для поперечного сечения этой картитны. Как можно видеть, полученные картины интенсивности и соответствующие им профили поперечных сечений имеют относительно плавный характер, что можно объяснить усреднением излучения по значительной толщине сформированных люминесцирующих слоев в кристаллах LiF. Для разрешения более тонкой структуры можно приготовить кристаллы по вышеописанной методике, при засветке через тонкую щелевую маску.

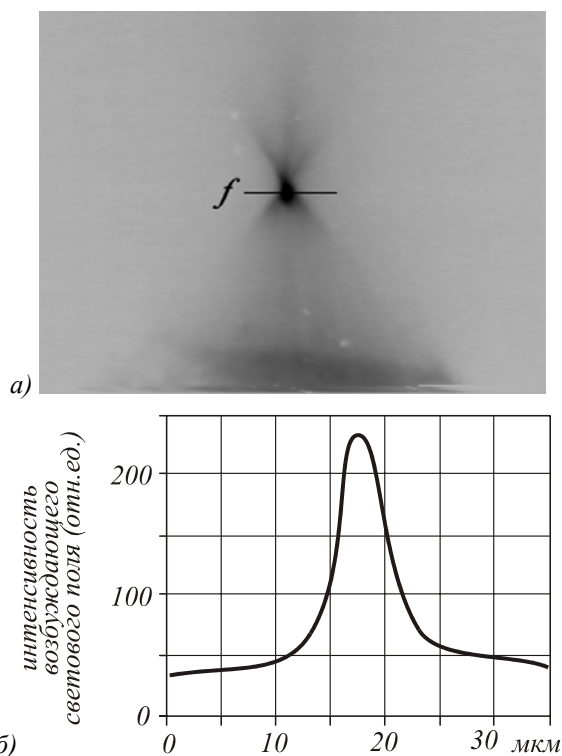


Рис. 1. (а) Люминесцентная картина интенсивности в продольном сечении области фокусировки стандартного микробъектива с числовой апертурой 0.65 и (б) профиль интенсивности в поперечном сечении микробъектива, проходящим через фокус. Картина регистрировалась в толстом слое кристалла LiF и проецировалась на площадку CCD-камеры с числом элементов 512 x 494.

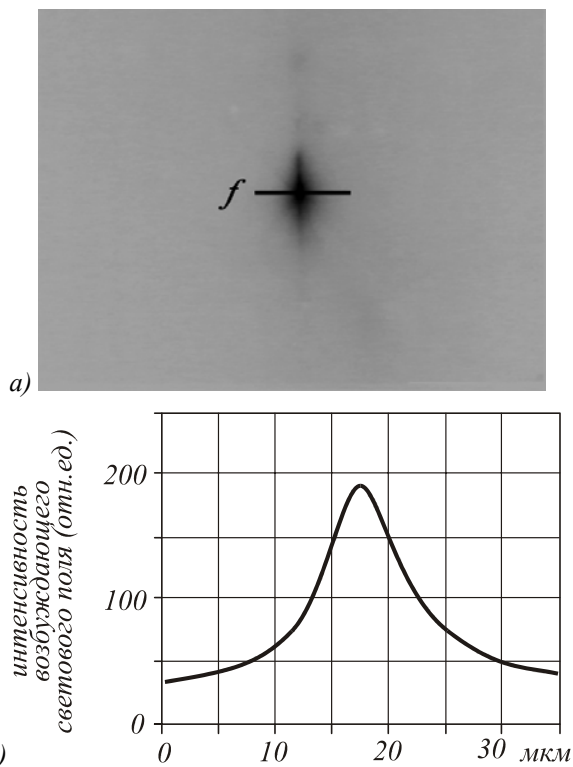


Рис. 2. (а) То же, что и на рис. 1 (а), но для микробъектива с числовой апертурой 0.40, (б) профиль интенсивности в поперечном сечении микробъектива, проходящим через фокус.

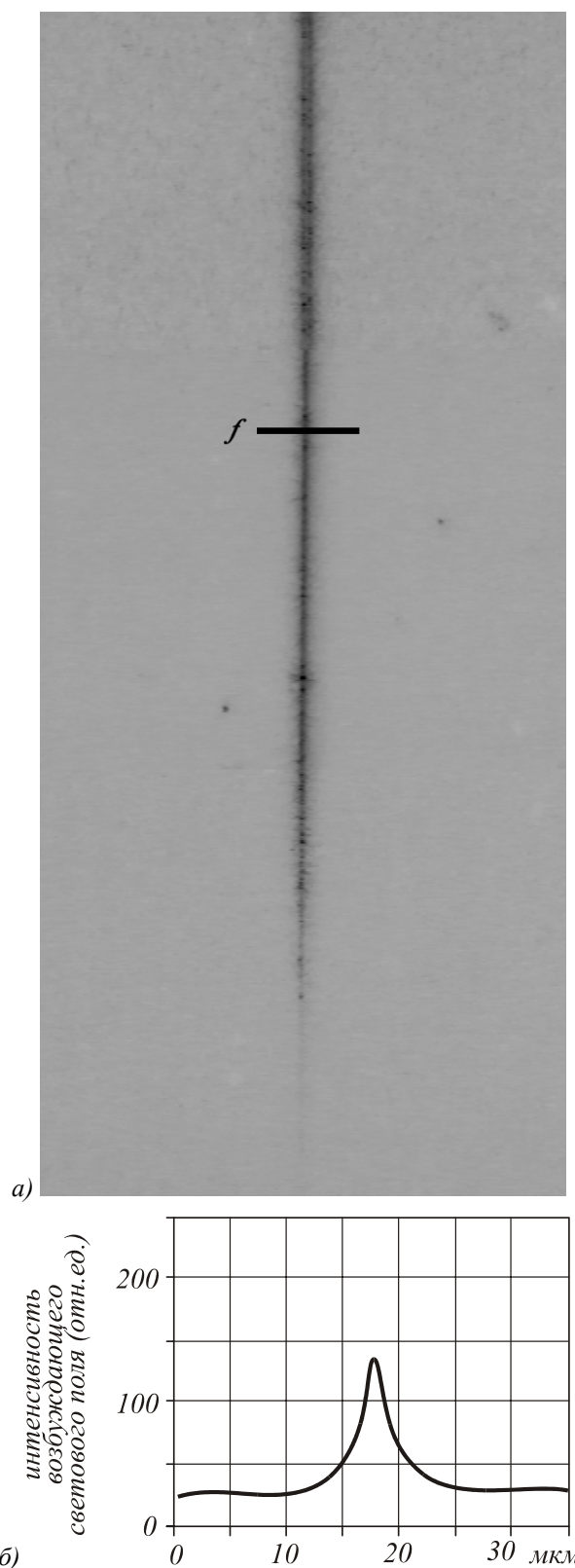


Рис. 3. (а) Люминесцентная картина интенсивности (регистрируемая в толстом слое кристалла LiF) в продольном сечении области фокусировки кольцевого дифракционного аксикона с числовой апертурой равной  $\lambda_{\text{ВОЗБ}}/d = 0.23$  и (б) профиль интенсивности в среднем поперечном сечении этой картины

### **Заключение**

Предложенный метод визуализации световых полей являются качественно новым дополнением известных традиционных методов. В зависимости от варианта технической реализации и желаемых требований к виду регистрируемой информации (с усреднением, без усреднения), визуализация продольных картин интенсивности световых полей может быть осуществлена как в толстых, так и в тонких активированных люминесцентных слоях кристаллов. Разрешение исследованного метода составляет порядка одного микрона.

Работа выполнена в рамках программы гранта Российского Фонда Фундаментальных исследований (97-2-18578).

### **Литература**

1. P.Dolbnya, G.N.Kulipanov, V.V.Lyakh, O.A.Makarov, V.F.Pindyurin, D.I.Kochubey, G.B.Gorin, K.E.Gyunsburg, N.P.Zvezdova, V.I.Kochubey. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, A359, p.376-378 (1993).
2. Н.В.Карлов, Лекции по квантовой электронике, М.: Наука, 1983, 246-257.
3. I.P.Dolbnya, G.N.Kulipanov, K.E.Kuper, V.V.Lyakh, O.A.Makarov, V.F.Pindyurin, D.I.Kochubey, G.V.Gorin, K.E.Gyunsburg, N.P.Zvezdova, V.I.Kochubey, X-ray image detectors with a micron spatial resolution, 4th International conference on synchrotron radiation sources and 2th Asian forum on synchrotron radiation, Kyongju, Korea, October 25-27 1995, p. 592-599.
4. В.П.Коронкевич, А.Г. Полещук, Е.Г.Чурин, Ю.И. Юрлов. Лазерная термохимическая технология для синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома. *Квантовая электроника*, 1985, т.12, N 4, стр. 755.
5. G.Poleshchuk, E.G.Churin, V.P.Koronkevich, V.P.Korolkov, A.A.Kharissov, V.V.Cherkashin, V.P.Kiryanov, A.V.Kiryanov, S.A.Kokarev, A.G.Verhoglyad. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure// *Appl. Optics*, 1999, Vol.38, No.8, pp.1295-1301.