

**О.М. Вохник**

## **РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ОВФ-ЗЕРКАЛЕ С ПЕТЛЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

Экспериментально измерена разрешающая способность ОВФ-зеркала на основе вырожденного четырехволнового взаимодействия (ВЧВВ) с петлей обратной связи в фоторефрактивном кристалле. Полученные для различных условий в петле значения 30 – 45 штр/мм хорошо согласуются с известными данными и теоретическими расчетами для классической схемы ВЧВВ. Показано, что подавление возбуждения в петле обратной связи необращенных волн приводит к увеличению разрешающей способности. Экспериментально исследовано влияние фазовых искажений в падающем пучке на величину разрешающей способности, получено хорошее согласие с известными из литературы теоретическими оценками.

Возможность использования ОВФ-зеркал, то есть устройств, обращающих волновой фронт оптического излучения, для передачи изображения и компенсации фазовых искажений в оптических пучках делает их исследование весьма перспективным с практической точки зрения. Большой интерес в связи с этим представляет схема обращения волнового фронта (ОВФ) на основе вырожденного четырехволнового взаимодействия (ВЧВВ) с петлей обратной связи [1], которая удачно сочетает беспороговый по мощности сигнальной волны характер обращения и простоту настройки. Исследование этой схемы в различных нелинейных средах показало, что одной из наиболее перспективных сред для ВЧВВ с петлей обратной связи являются фоторефрактивные кристаллы [2]. Однако основное внимание в большинстве работ, посвященных этой проблеме, уделялось энергетическим и временным характеристикам ОВФ-зеркала. В то же время большой интерес представляют вопросы, связанные с исследованием ОВФ-зеркала как оптической системы, то есть с определением его разрешающей способности, поскольку с ее величиной тесно связаны вопросы о возможности компенсации фазовых искажений, вносимых в пучок, и о предельно допустимом размере неоднородностей, которые могут быть скомпенсированы такой системой. В отношении ОВФ-зеркал на основе классической схемы ВЧВВ такие исследования были предприняты в [3, 4]. Что касается разрешающей способности схемы с петлей обратной связи, то этот вопрос почти не исследовался ни экспериментально, ни теоретически, хотя в [1, 5] обсуждалось возможное ухудшение точности ОВФ в петлевой схеме из-за шумового характера возбуждения второго опорного пучка.

В данной статье представлено экспериментальное исследование разрешающей способности и восстановления изображения ОВФ-зеркалом на основе ВЧВВ с петлей обратной связи.

Схемы экспериментальной установки и волновых векторов взаимодействующих волн приведены на рис. 1. Одномодовый параллельный пучок  $L1$  диаметром 6 мм ( $\lambda = 440$  нм) освещал транспарант  $1$  и с помощью телескопической системы  $4$  направлялся на ОВФ-зеркало. Нелинейной средой, в которой осуществлялось ВЧВВ, служил фоторефрактивный кристалл  $5$  стронция – бария ниобата  $Sr_{(1-x)}Ba_xNb_2O_6$  (СБН). Пучок  $L1$ , прошедший кристалл, зеркалами  $6$  и  $7$  снова направлялся на него в виде пучка  $L3$ . Всегда имеющееся в среде шумовое рассеянное излучение в направлениях  $L2$  ( $k_{L2} = -k_{L1}$ ) и  $L4$  ( $k_{L4} = -k_{L3}$ ) совместно с волнами соответственно  $L3$  и  $L1$  наводят в среде решетку показателя преломления. Дифракция на этой решетке волн  $L3$  и  $L1$  дает пучки  $L2$  и  $L4$ , обращенные по отношению к  $L1$  и  $L3$ . Волна  $L4$ , отражаясь от зеркал  $7$  и  $6$ , переходит в волну  $L2$ , замыкая петлю обратной связи. На рис. 1,  $6$  направления волновых векторов заданных пучков  $L1$ ,  $L3$  показаны сплошными линиями, а пучков  $L2$ ,  $L4$ , возбуждающихся в процессе ВЧВВ, – штриховыми.

Для регистрации обращенного пучка  $L2$ , несущего изображение транспаранта, часть его ответвлялась пластинкой  $2$  на фотографическую систему  $9$ , разрешающая способность на фотографическую систему  $9$ , разрешающая способность которой 80 штр/мм заведомо превышала разрешающую способность исследуемой схемы. При количественных измерениях в качестве

транспаранта использовалась стандартная мира с плотностью штрихов от 25 до 100 штр/мм, для качественных иллюстраций применялись фотопозитивы со штриховым изображением. Восстановленное в обратном пучке изображение транспаранта 1 локализовалось в плоскости, сопряженной плоскости транспаранта. Фазовые искажения в падающий на ОВФ-зеркало пучок вносились с помощью фазовой пластинки 3, а в петлю обратной связи – с помощью 8.

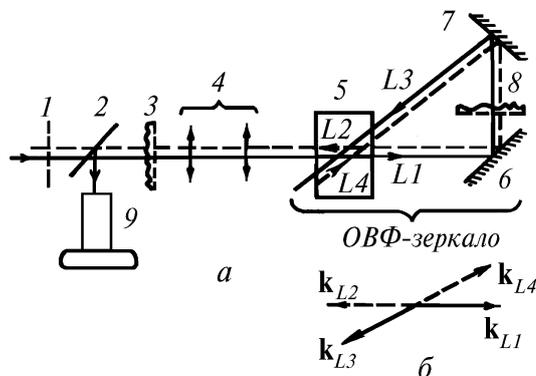


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и волновых векторов взаимодействующих волн (б)

Разрешающая способность ОВФ-зеркала измерялась в зависимости от 1) параметров петлевой схемы таких, как длина петли обратной связи и присутствие на пути пучка в петле фазовых искажений; 2) наличия случайных фазовых неоднородностей в падающем на ОВФ-зеркале пучке. По изменению разрешающей способности во втором случае можно было делать вывод о возможности компенсации фазовых искажений ОВФ-зеркалом.

Вначале целесообразно привести основные энергетические и временные характеристики исследуемого ОВФ-зеркала. Коэффициент отражения ОВФ-зеркала  $R$  составлял 35 – 37%. Это значение  $R$  достигалось не мгновенно, а в течение некоторого временного интервала, длительность которого зависела от мощности  $P$  падающего на схему пучка: при  $P = 3$  мВт время формирования обратного отклика составляло 12–15 с, при уменьшении  $P$  до 0,5 мВт оно увеличивалось до 40 – 50 с.

Разрешающая способность ОВФ-зеркала  $F$  измерялась при трех значениях длины петли обратной связи  $l$ : 32, 45, 65 см. Соответствующие значения  $F$  оказались равными 30, 35, 40 штр/мм. Несмотря на небольшой диапазон изменения  $l$  (ее дальнейший рост ограничивался тем, что схема становилась очень чувствительной к вибрациям), эти данные показывают, что с ростом  $l$  величина  $F$  также растет.

Для тех же значений  $l$  величина  $F$  измерялась при наличии в петле случайных фазовых неоднородностей, вносившихся на пути пучка с помощью фазовой пластинки 8. При всех трех значениях  $l$  разрешающая способность  $F$  увеличивалась с внесением фазовой пластинки на 5 штр/мм и составила 35, 40, 45 штр/мм при  $l = 32, 45$  и 65 см соответственно.

Приведенные выше данные относятся к случаю, когда падающий на ОВФ-зеркало пучок близок к однододовому. При внесении в него с помощью фазовой пластинки 3 случайных фазовых неоднородностей с характерным размером 0,3 мм разрешающая способность ОВФ-зеркала несколько снижалась и становилась равной 25 штр/мм. При уменьшении характерного размера неоднородностей до 0,07 мм восстановления изображения мира в обратном пучке не наблюдалось. Аналогичным образом, при наблюдении восстановления в обратном пучке штрихового изображения фотопозитива оказалось, что внесение неоднородностей с характерным размером 0,3 мм незначительно ухудшало качество картины. Уменьшение размера неоднородностей до 0,07 мм приводило к резкому ухудшению изображения.

Из полученных данных следует, что в отсутствие фазовых искажений в падающем пучке разрешающая способность ОВФ-зеркала с петлей обратной связи составляет не менее 30 штр/мм. Представляет интерес сравнить это значение с разрешающей способностью ОВФ-зеркала на основе классической схемы ВЧВВ, поскольку схема взаимодействия в обоих случаях одинакова, а основное отличие сводится к способу образования опорных пучков. Полученные другими авторами экспериментальные значения разрешающей способности ОВФ-зеркал, использующих ВЧВВ, составляют 40 [6] и 30 штр/мм [4]. Близость этих значений и представ-

ленных в данной статье свидетельствует о том, что величина разрешающей способности обеих схем в значительной степени определяется общими для них факторами, к которым следует в первую очередь отнести апертурные эффекты. Теоретическая оценка разрешающей способности классической схемы ВЧВВ 30 штр/мм, полученная в [4] с учетом апертурных эффектов, хорошо согласуется с экспериментальными значениями, полученными нами и авторами [6].

Наряду с общими для обеих схем чертами схема с петлей обратной связи имеет особенности, оказывающие влияние на точность обращения и обусловленные самовозбуждением второго опорного пучка. В [1,5] отмечалось, что возбуждение в петле обратной связи наряду с фазовосопреженной волной необращенных компонент может приводить к <зашумлению> решетки показателя преломления и, как следствие, ухудшению точности обращения. В связи с этим условия, способствующие возбуждению в петле гауссова пучка, являющегося фазовосопреженной волной, и подавлению необращенных компонент, должны приводить к увеличению разрешающей способности. Полученные нами экспериментальные результаты хорошо согласуются с этими представлениями. Так, увеличение длины петли обратной связи, что, как известно, облегчает селекцию основной поперечной моды, приводило к заметному росту  $F$  от 30 до 40 штр/мм. Способствует выделению фазовосопреженной компоненты и помещение в петлю фазовой пластинки, что, как показывают выполненные нами измерения, увеличивало  $F$  примерно на 5 штр/мм при фиксированной длине петли. Максимальная в наших экспериментальных условиях разрешающая способность 45 штр/мм достигалась при длине петли обратной связи 65 см с одновременной установкой в ней фазовой пластинки.

Для интерпретации результатов по компенсации фазовых искажений в падающем пучке целесообразно привлечь расчеты, проведенные в [3]. В этой статье показано, что возможность компенсации неоднородностей определяется соотношением  $\gamma = F^2 a^2 / 4\pi^2$  между разрешающей способностью ОВФ-зеркала  $F$  и характерным размером неоднородностей среды  $a$ . В частности, до тех пор, пока  $\gamma \gtrsim 1$ , внесенные неоднородности должны компенсироваться, при  $\gamma \ll 1$  эффективность системы компенсации резко снижается. Приведенные в настоящей статье экспериментальные данные хорошо согласуются с этими расчетами: при  $a = 0,3$  мм ( $F = 30$  штр/мм) значение  $\gamma$  приблизительно равнялось 2 и неоднородности в падающем пучке практически компенсировались, при  $a = 0,07$  мм  $\gamma$  равнялось  $\sim 0,1$  и компенсации внесенных искажений не наблюдалось.

1. Бельдюгин И.М., Галушкин М.Г., Земсков Е.М. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. №5. С. 887–892.
2. Cronin-Golomb M., Fisher B., White J., Yariv A. // IEEE. V. QE-20. 1984. N 1. P. 12–30.
3. Ивахник В.В., Петникова В.М., Шувалов В.В. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. Т 4. С. 774–777.
4. Воронин Э.С., Ивахник В.В., Петникова В.М. // Квантовая электроника. 1979. Т. 6 №9. С. 2009–2015.
5. Бельдюгин И.М., Галушкин М.Г., Золотарев М.В., Каменец Ф.Ф. // Известия АН СССР. Серия физическая. 1987. Т. 11. №2. С. 358–361.
6. Bloom D.M., Bjoklund G.C. // Appl. Phys. Lett. 1977. V.31. N 9. P.592–595.

Московский госуниверситет  
им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
26 июня 1993 г.

**O. M. Vokhnik. Resolving Power and Reconstruction of Images in a WFR Mirror with the Feedback Loop.**

In this paper we present experimental results on measuring the resolving power of a WFR mirror built up based on a degenerate four-photon interaction with a feedback loop in a photorefractive crystal. Experimentally obtained values of the resolving power of 30 to 45 grooves/mm, under different conditions in the feedback loop well agree with independent data and theoretical calculations for a classical arrangement of the degenerate four-photon interaction. It is shown in the paper that a suppression of the generation of irreversed waves in the feedback loop provides for an increase of the resolving power. Influence of phase distortions of the incident beam on the resolving power is studied experimentally and good agreement with the theoretical estimates known from literature is obtained.