

Формирование высококачественных полос интерференции в измерительном объеме лазерного доплеровского анемометра с обеих сторон надлежащим образом спроектированной гололинзы*

А.Гош, А.К.Нирала

Впервые, насколько известно авторам настоящей работы, описывается формирование высококачественных равноотстоящих неискаженных полос в измерительном объеме лазерного доплеровского анемометра с обеих сторон надлежащим образом спроектированной гололинзы. Проведены эксперименты по анализу полос, сформированных в измерительном объеме, посредством регистрации в реальном времени и анализа фактической картины полос при помощи атомно-силового микроскопа. Результаты демонстрируют количественное и качественное улучшение картины интерференционных полос, сформированных с помощью предлагаемой имиджинговой конфигурации, по сравнению с обычно используемой. Нормированное стандартное отклонение ширины полос уменьшилось на 68.3%.

Ключевые слова: голографический оптический элемент, лазерная доплеровская анемометрия, измерительный объем, анализ полос.

1. Введение

Изобретение лазера оживило «древнюю» науку оптику, сделало практически значимым изучение когерентного света и придало новое звучание старым идеям. С развитием лазеров стали практически возможными невозмущающие измерения потоков различных частиц и сред. Невозмущающие оптические измерения позволили исследователям увидеть детали динамики жидкостей и газов, недоступные для наблюдения с помощью любых других методов. Лазерный анемометр основан на эффекте доплеровского сдвига частоты: частота излучения, рассеянного частицей, внесенной в поток и движущейся вместе с ним относительно источника излучения, изменяется на величину, зависящую от скорости потока и геометрии рассеяния. Однако доплеровский сдвиг составляет весьма малую часть частоты падающего света, в результате чего точность измерения скорости невысока. Для увеличения точности определения доплеровского сдвига была разработана двухпучковая схема с использованием интерференционных полос. В этой схеме два пучка генерируются одним лазерным источником и пересекаются в одной точке с помощью собирающих линз, создавая картину интерференционных полос в области, где производится измерение скорости потока. Эта область называется измерительным объемом. Когда волны с одинаковыми амплитудами и с примерно равными частотами складываются, амплитуда результирующей волны периодически

изменяется – возникают биения. Частота биений равна удвоенной частоте модуляции, или половине разности двух исходных частот, а также абсолютной величине доплеровского сдвига. В соответствии с терминологией лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) частота биений называется доплеровской частотой [1]. Доплеровская частота света, рассеянного проходящей через измерительный объем частицей, может быть также рассчитана по интерференции пучков лазерного света в измерительном объеме, которая создает в нем набор равноотстоящих друг от друга полос, параллельных биссектрисе угла между осями пучков. Расстояние Λ между чередующимися темными и светлыми полосами зависит от длины волны λ и угла между осями падающих пучков θ : $\Lambda = \lambda / [2\sin(\theta/2)]$ [2]. Предполагается, что взвешенная в потоке частица, проходя через измерительный объем, дает вспышку (импульс) рассеянного света при прохождении каждой светлой интерференционной полосы и не рассеивает свет при прохождении темной полосы. Частота f следования импульсов рассеянного света при пересечении интерференционных полос частицей может быть измерена с помощью фотоприемника и блока обработки сигнала. Компоненту скорости потока V , перпендикулярную интерференционным полосам, можно рассчитать из соотношения $V = \Lambda f$ [3].

Технологический прогресс способствовал развитию систем ЛДА, а разработка новых оптоэлектронных устройств дала возможность пользователям ЛДА существенно увеличить точность измерений, получать выходные данные, свободные от ошибок, автоматизировать процесс измерения и т. д. [4–8]. По этим причинам методы ЛДА во всем мире стали стандартным инструментом измерения скорости жидкости или газа [9–13]. Вся система ЛДА может быть разделена на три части: на оптическую систему, систему обработки сигнала и систему обработки данных. В настоящей статье главное внимание уделено оптической системе. Необходимым условием для точного ЛДА-измерения является неискаженная картина

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

A.Ghosh, A.K.Nirala. Biomedical Optics Lab, Department of Applied Physics, Indian Institute of Technology (Indian School of Mines), Dhanbad 826004, Jharkhand, India; e-mail: abhi.photonics@gmail.com, aknirala@gmail.com

Поступила в редакцию 24 марта 2017 г., после доработки – 6 июня 2017 г.

на равноотстоящих интерференционных полос в измерительном объеме [14]. Искажения полос и неоднородности их расположения в рабочем объеме возникают по ряду причин: 1) неправильно выбранная оптическая схема [15]; 2) астигматизм из-за преломлений лазерного пучка [16, 17]; 3) локальное искажение полос, обусловленное дифракцией лазерного света на частицах на пути распространения лазерных пучков [18]; 4) влияние кривизны волновых фронтов [19]; 5) оптические aberrации передающей оптики [1]; 6) другие факторы [20]. Если два пучка пересекаются в области их перетяжек, то волновые фронты пучков приблизительно плоские и, следовательно, в результате интерференции образуются параллельные плоскости, содержащие светлые и темные полосы. Если же лазерные пучки пересекаются не в области перетяжек, то волновые фронты будут не плоскими, а искривленными, и в результате расстояние между полосами будет не постоянным, а зависящим от их положения внутри области пересечения. Вследствие этого измеренная доплеровская частота и пропорциональная ей скорость частицы также будут зависеть от положения частицы внутри измерительного объема, что приведет к неточности измерения [21]. Для получения неискаженной интерференционной картины в измерительном объеме изображающие линзы должны обладать дифракционным качеством и почти не иметь монохроматических aberrаций в пределах апертуры двух небольших отверстий в масках на линзе, через которые проходят два пучка. Полосы, формируемые в измерительном объеме обычными (линзовыми) изображающими системами оказываются искаженными вследствие их aberrаций [22].

Ряд авторов [23–28] использовали в оптической системе ЛДА вместо дорогих и громоздких обычных оптических элементов легкие, дешевые и свободные от монохроматических aberrаций голографические оптические элементы [29–31]. В предыдущих публикациях мы сообщали об оптических системах ЛДА, состоящих из двух компактных голографических линз (гололинз) [31] и из одной гололинзы [28], предназначенных для улучшения качества интерференционных полос в измерительном объеме.

В настоящей работе предложена и использована в оптической установке для ЛДА специальная конструкция гололинзы, которую можно использовать с обеих сторон (со стороны эмульсии и с противоположной стороны), что обеспечивает большую гибкость изображающей системы. В ранее предложенных гололинзовых изображающих системах имелось ограничение: чтобы выполнялось условие синхронизма волновых фронтов, гололинзу можно было использовать только с одной стороны. Кроме того, предлагаемая здесь гололинзовая изображающая система имеет более высокую дифракционную эффективность, чем ранее описанные системы с двумя и с одной гололинзами, т. к. для формирования измерительного объема ЛДА используются фокальные точки первого порядка. Отметим, что эффективность предыдущих систем ниже либо из-за применения двух гололинз, либо из-за использования фокуса второго порядка для формирования измерительного объема в системе с одной гололинзой. Чтобы полностью охарактеризовать интерференционные полосы, формируемые в измерительном объеме, использовались мониторинг в реальном времени и методика измерения фактического поля полос с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ).

2. Эксперимент

2.1. Разработка гололинзы

Хорошо известная методика создания гололинзы, используемая многими авторами, состоит в записи интерферограммы наложения двух взаимно когерентных волн со сферическим расходящимся и плоским волновыми фронтами [32, 33]. Ряд публикаций посвящен также компьютерным голографическим изображениям и некоторым фокусирующим свойствам голограмм [34, 35]. В настоящей работе мы экспериментально исследовали и реализовали геометрию записи гололинзы в виде интерферограммы, возникающей в результате наложения двух сферических волн – расходящейся и сходящейся.

Гололинза, использованная для получения рассматриваемых ниже интерференционных картин, была записана с помощью двух когерентных волн от одного лазерного источника. Одна из них имела расходящийся сферический волновой фронт и создавалась точечным отверстием, расположенным в 20 см от фоточувствительной пластины, а другая была сходящейся и создавалась собирающей линзой, фокус которой находился в 19.5 см от пластины (за ней), как показано на рис.1. Интерферограмма наложения сходящейся и расходящейся сферических волн записывалась на фоточувствительной пластине. Угол θ между фронтами сходящейся и расходящейся сферических волн, в момент записи составлял 17° и, следовательно, соответствующее расстояние Λ между полосами на гололинзе равнялось 2.14 мкм. Диаметр записанной гололинзы составлял 1.5 см.

Высокой дифракционной эффективностью, низким уровнем шумов, долговечностью и значительной способностью к модуляции показателя преломления обладает бихромированная желатина [36, 37]. Однако, по соображениям доступности и стоимости источника и записывающих материалов, мы записывали гололинзу на серийной пленке высокого разрешения на основе галоидного серебра PFG-01 [38] (толщина пленки $d = 7$ мкм, средний показатель преломления $n = 1.61$) с помощью He-Ne-лазера ($\lambda = 632.8$ нм) мощностью 17 мВт. Для предотвращения формирования ложной решетки картину интерфе-

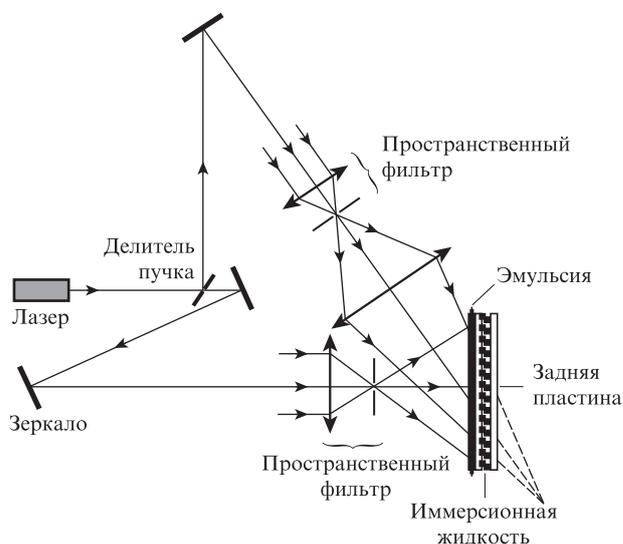


Рис.1. Схема записи гололинзы.

ренции двух волн необходимо записывать при выполнении условия синхронизма [39, 40]. Экспонированная пленка обрабатывалась по стандартной процедуре [41, 42].

2.2. Оптическая установка ЛДА с предложенной схемой использования гололинзы

2.2.1. *Схема для мониторинга в реальном времени интерференционной дифракционной картины, создаваемой в измерительном объеме ЛДА.* В нашей экспериментальной установке, схема которой приведена на рис.2, лазерный пучок расширяется с использованием схемы пространственной фильтрации и освещает маску с двумя одинаковыми круглыми отверстиями на расстоянии 6.7 мм друг от друга. Маска предназначена для создания двух одинаковых тонких пучков света перед оптически записанной гололинзой, которые

затем пересекаются в ее фокальной точке и формируют картину интерференционных полос в измерительном объеме. Для характеристики полос используется линейка ПЗС, расположенная в 40 см от микрообъектива (увеличение 20^x). В процессе регистрации ПЗС-датчик движется, шаг за шагом прописывая весь измерительный объем.

2.2.2. *Установка для регистрации фактической картины интерференционных полос, формируемых в измерительном объеме ЛДА.* Для анализа фактической картины полос, формируемых в измерительном объеме, был проведен эксперимент, схема которого приведена на рис.3. Фоточувствительная пластина на основе галоидного серебра устанавливалась в области пересечения двух пучков для записи картины полос в измерительном объеме. После соответствующей экспозиции пластина обрабатывалась и исследовалась на АСМ (Dimension Icon, Bruker).

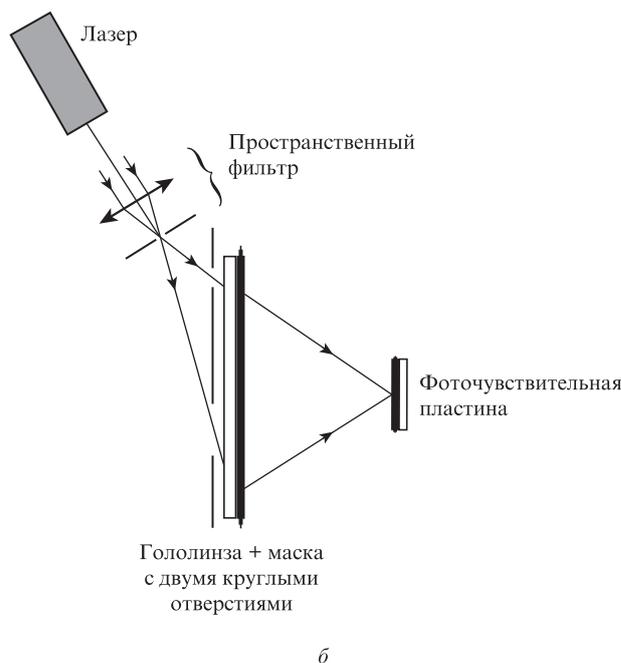
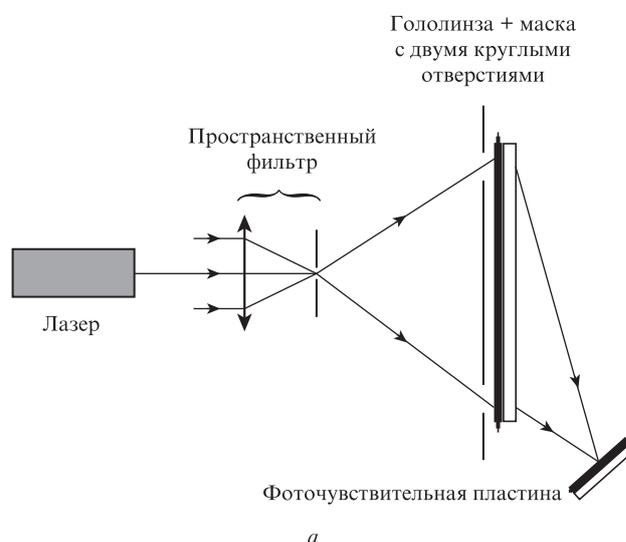
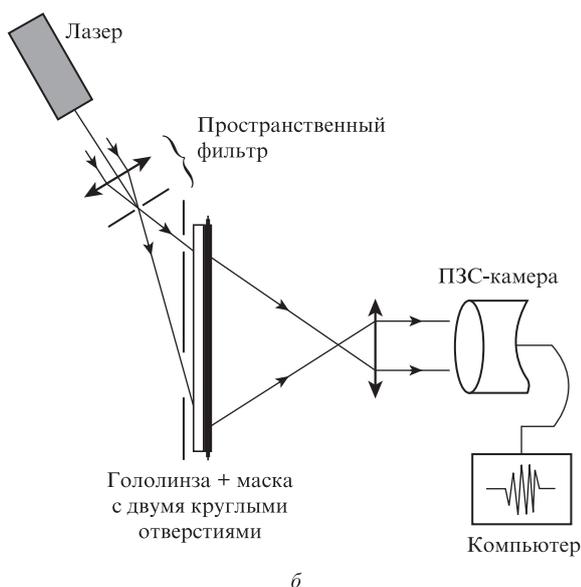
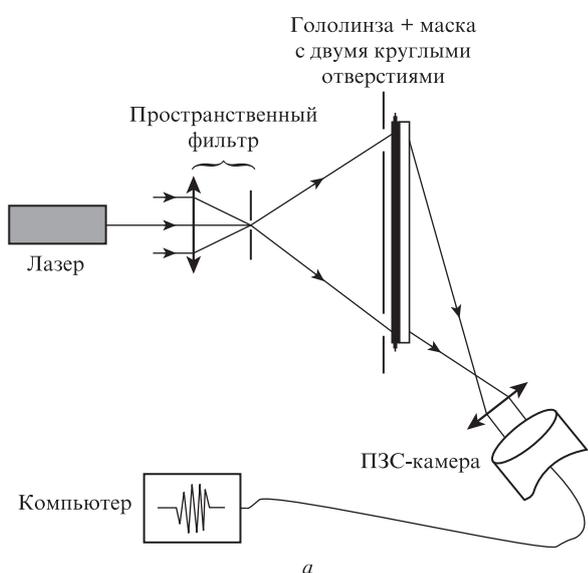


Рис.2. Схема ЛДА-установки для мониторинга в реальном времени картины полос, сформированных в измерительном объеме предлагаемой гололинзой, освещаемой со стороны эмульсии (а) и с противоположной стороны (б).

Рис.3. Схема ЛДА-установки для анализа фактической картины полос, формируемых в измерительном объеме предлагаемой гололинзой, освещаемой со стороны эмульсии (а) и с противоположной стороны (б).

3. Результаты экспериментов

3.1. Регистрация в реальном времени картины сформированных в измерительном объеме ЛДА интерференционных полос

Увеличенные фотографии интерференционных картин в измерительном объеме ЛДА, состоящих из полос высших порядков, представлены на рис.4. Профили интенсивности в направлении, перпендикулярном полосам, при различных положениях систем полос нулевого порядка детально показаны на рис.5, а результаты их количественного анализа даны в табл.1 и 2.

Очевидно, что качество интерференционных полос, полученных с помощью изображающей системы с предлагаемой гололинзой и показанных на рис.5, лучше, чем у полос, получаемых в обычных схемах [28,31]. Количественный анализ разброса ширин полос, представленный в табл.1 и 2, подтверждает формирование картины равноотстоящих неискаженных интерференционных полос в измерительном объеме при использовании системы регистрации с предложенной гололинзой.

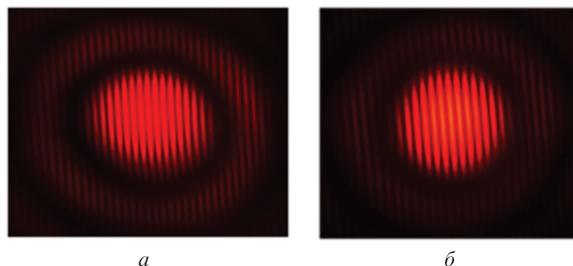


Рис.4. Увеличенные фотографии полос в измерительном объеме ЛДА, полученные с помощью предложенной гололинзы, освещаемой со стороны эмульсии (а) и с противоположной стороны (б).

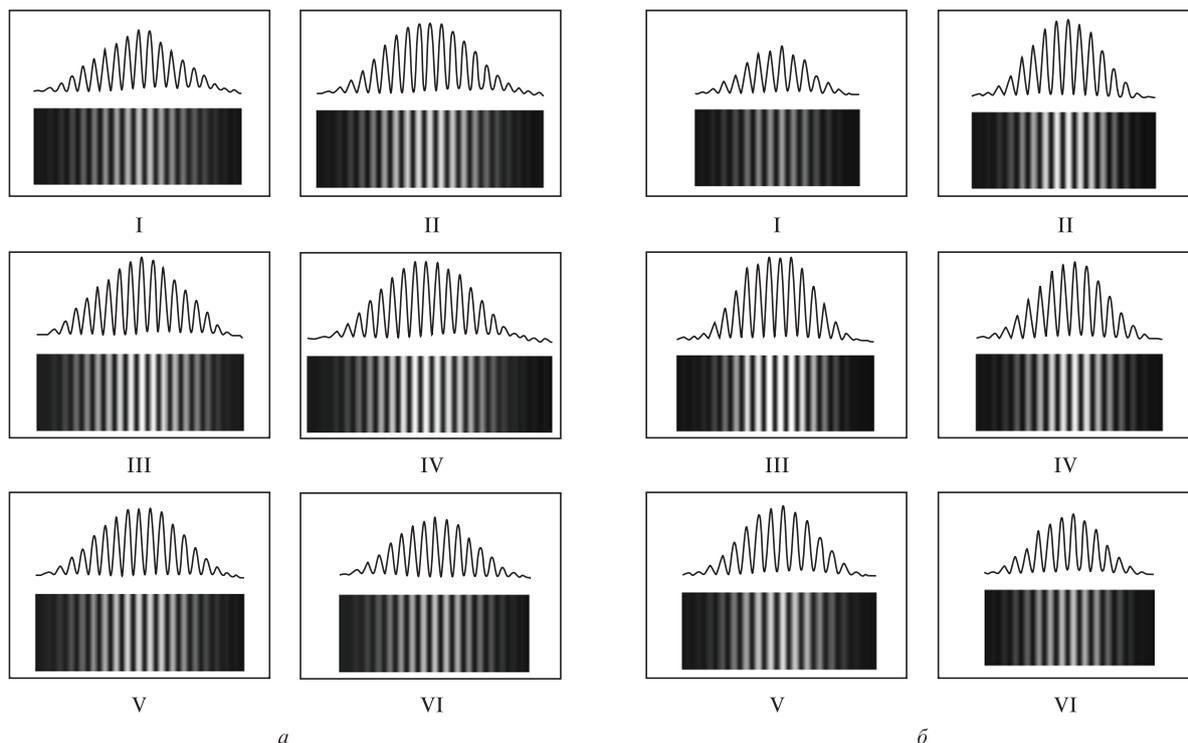


Рис.5. Профили интенсивности в направлении, перпендикулярном направлению полос, при различных положениях систем полос нулевого порядка, соответствующие рис.4,а (а) и 4,б (б).

Табл.1. Полные ширины (на уровне половины максимума) интерференционных полос в измерительном объеме ЛДА, показанных на рис.5,а. Нормированное стандартное отклонение 0.0090 мкм.

Номер полосы	Ширина полосы (мкм)					
	I	II	III	IV	V	VI
1	462	462	462	462	462	462
2	462	462	462	462	462	462
3	462	462	462	462	462	462
4	462	462	462	462	462	462
5	462	462	462	462	462	462
6	462	462	462	462	462	462
7	462	462	462	476	462	462
8	462	462	462	462	462	462
9	462	462	462	462	462	462
10	462	462	462	462	462	462
11	462	462	462	448	448	448
12	462	462	462	448	448	448

Табл.2. Полные ширины (на уровне половины максимума) интерференционных полос в измерительном объеме ЛДА, показанных на рис.5,б. Нормированное стандартное отклонение 0.0138 мкм.

Номер полосы	Ширина полосы (мкм)					
	I	II	III	IV	V	VI
1	476	476	476	476	476	476
2	476	448	448	462	476	476
3	476	476	476	476	476	476
4	476	476	490	476	476	476
5	476	476	476	476	476	476
6	476	490	476	476	490	476
7	476	476	476	476	476	476
8	476	476	476	476	476	476
9	476	476	476	476	490	476
10		476	476	476		

3.2. Измерения фактического поля полос, образованных внутри измерительного объема ЛДА

Изображения картин полос в пластине галоидного серебра, полученные с помощью АСМ, представлены на рис.6, а увеличенные фрагменты АСМ-изображений рис.6 для шести различных произвольных положений центральной системы полос – на рис.7. По результатам анализа сечений полос, показанных на рис.8, были рассчитаны ширины полос в пластине галоидного серебра (табл.3 и 4). Из двумерных АСМ-изображений, показанных на рис.7, и данных табл.3 и 4 ясно, что с помощью предложенной конфигурации оптической системы с го-

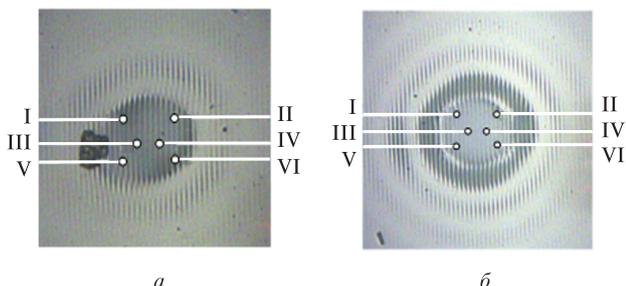


Рис.6. АСМ-изображения картин интерференционных полос нулевого и более высоких порядков в пластине галоидного серебра, сформированных в измерительной области ЛДА с использованием предлагаемой гололинзы, освещаемой со стороны эмульсии (а) и с противоположной стороны (б).

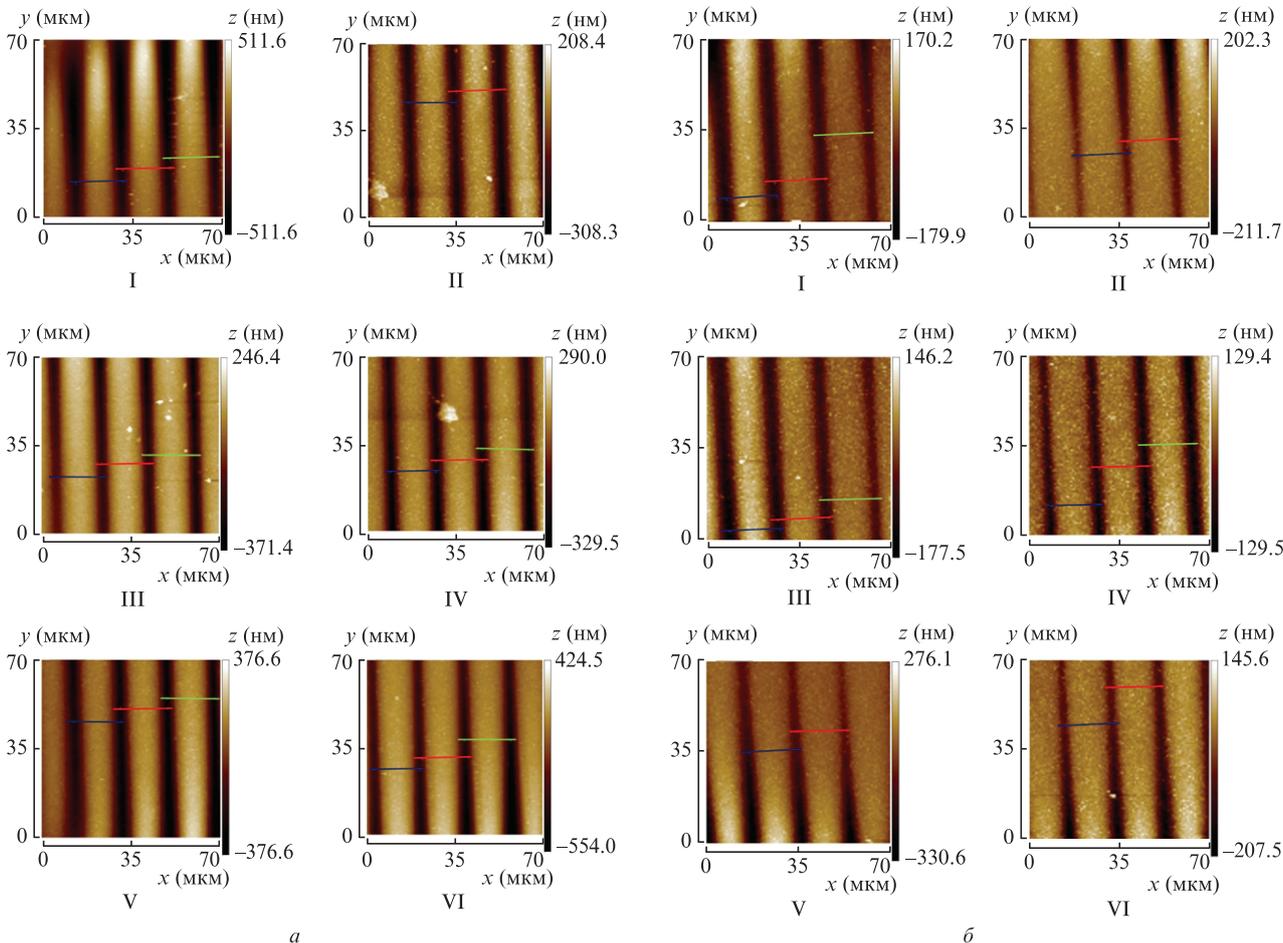


Рис.7. Двумерные АСМ-изображения размером 70 × 70 мкм полос нулевого порядка, показанных на рис.6,а (а) и на рис.6,б (б).

Табл.3. Ширины полос в различных точках интерференционной картины в измерительном объеме ЛДА (получены в результате анализа поперечных сечений двумерных АСМ-изображений на рис.7,а). Нормированное стандартное отклонение 0.0133 мкм.

Номер полосы	Ширина полосы (мкм)					
	I	II	III	IV	V	VI
1	18.431	17.684	18.194	18.421	18.421	18.421
2	18.431	17.693	18.189	18.421	18.421	18.431
3	18.431		18.194	18.421	18.421	18.421

Табл.4. Ширины полос в различных точках интерференционной картины в измерительном объеме ЛДА (получены в результате анализа поперечных сечений двумерных АСМ-изображений на рис.7,б). Нормированное стандартное отклонение 0.0133 мкм.

Номер полосы	Ширина полосы (мкм)					
	I	II	III	IV	V	VI
1	19.193	19.195	19.167	18.431	19.195	19.167
2	19.195	19.167	19.167	18.431	19.167	19.168
3	19.168		19.167	18.431		

лолинзой легко получают равноотстоящие неискаженные интерференционные полосы.

Полное среднее нормированное стандартное отклонение ширины полос, сформированных с использованием предложенной схемы с гололинзой, равно 0.0123 мкм, тогда как для обычной оптической конфигурации оно составляет 0.0389 мкм.

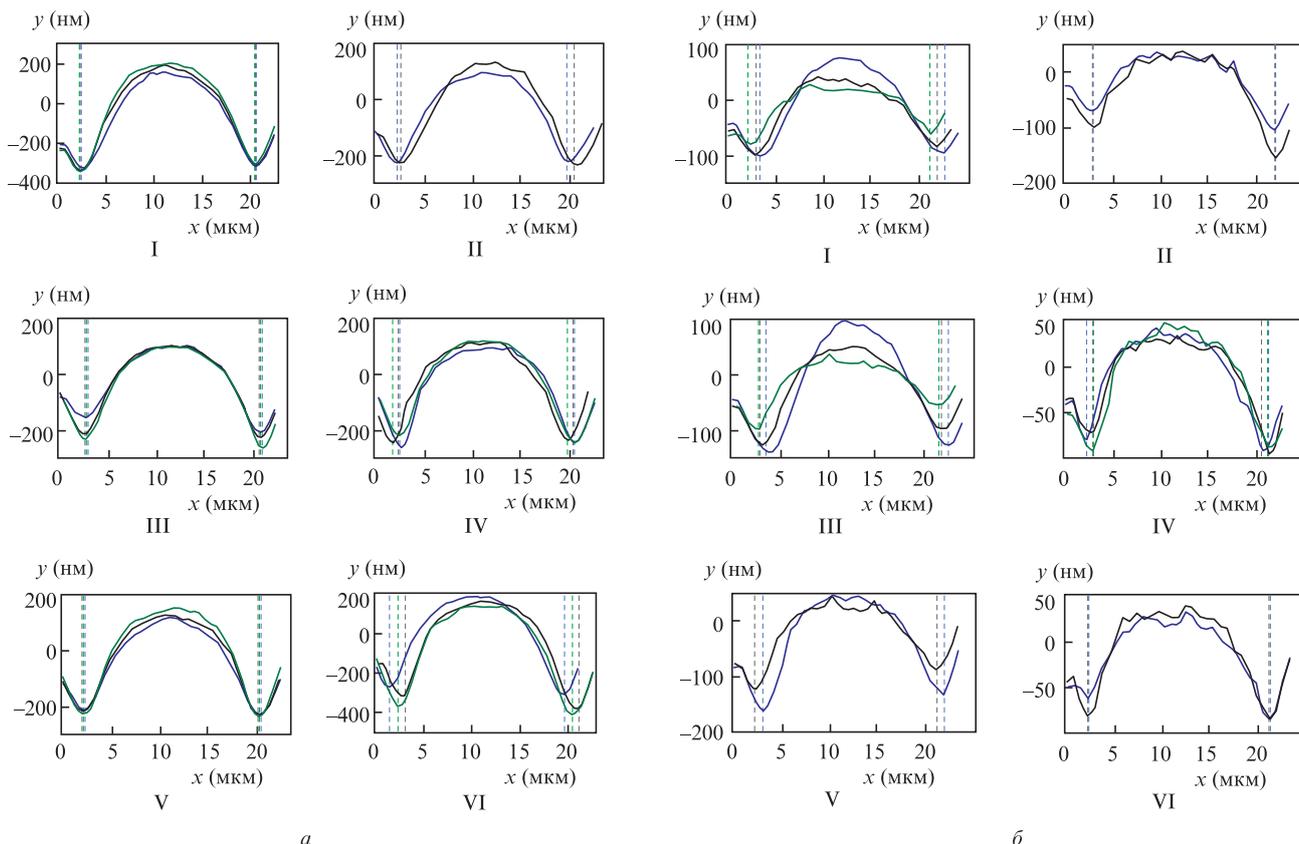


Рис.8. Поперечные сечения полос, представленных на рис.7,а (а) и 7,б (б), использованные для измерения ширины полос.

4. Обсуждение и выводы

Предложенная конфигурация системы с гололинзой в оптической установке для регистрации интерференционных картин для ЛДА во многом превосходит другие конфигурации в силу следующего.

- Имеет место значительное (на 68.3%) уменьшение полного нормированного стандартного отклонения, характеризующего разброс ширины формируемых в измерительном объеме полос, по сравнению с обычной конфигурацией.

- По сравнению с системой двух гололинз сокращено число степеней свободы и, следовательно, уменьшены сложность юстировки, размеры и стоимость установки.

- Эффективность нашей системы выше, чем у существующей системы с одной гололинзой, т. к. в предлагаемой системе используются фокальные точки первого порядка.

- Предлагаемая система проще в изготовлении, меньше весит и дешевле, чем комбинированная гололинзовая система ЛДА; для нее нужен лазер с меньшей выходной мощностью.

- Дополнительным преимуществом является возможность освещения гололинзы с обеих сторон – как со стороны эмульсии, так и с противоположной стороны.

Таким образом, надлежащая оптическая конфигурация с использованием предложенной гололинзы обладает потенциальной способностью формировать картину высококачественных равноотстоящих неискаженных интерференционных полос в измерительном объеме, что позволяет использовать ее в системах ЛДА для повышения точности измерений.

Авторы благодарны Центральной научно-исследовательской базе Индийского Института Технологии (Индийской Горной Школы), Дханбад, за предоставление оборудования для атомно-силовой микроскопии.

1. Zhang Z. *LDA Application Method Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics* (Berlin: Springer, 2010).
2. Durst F., Melling A., Whitelaw J.H. *Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry* (London: Academic, 1981).
3. Annoni M. *Measurement*, **45**, 1639 (2012).
4. Goldstein R.J. *Fluid Mechanics Measurements* (London: Taylor and Francis, 1996).
5. Albrecht H.-E., Damaschke N., Borys M., Tropea C. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques* (Berlin: Springer, 2003).
6. Tropea C. *Meas. Sci. Technol.*, **6**, 605 (1995).
7. Czarzys J.W. *Meas. Sci. Technol.*, **17**, R71 (2006).
8. Diasinos S., Beves C., Barber T. *Meas. Sci. Technol.*, **24**, 017001 (2013).
9. Butefisch K.-A. *Progr. Aerosp. Sci.*, **26**, 79 (1989).
10. Cagniot A., Cape E.G., Walker P.G., Yoganathan A.P., Levine R.A. *J. Am. Soc. Echocardiogr.*, **5**, 393 (1992).
11. Chandrasekaran M., Marcroft H., Bakalis S., Karwe M.V. *Trends Food Sci. Technol.*, **8**, 369 (1997).
12. Pfeifer C., Bruzzese C., Fast G., Kuhn D., Class A.G. *Flow Meas. Instrum.*, **22**, 456 (2011).
13. Spelter L.E., Schirner J., Nirschl H. *Chem. Eng. Sci.*, **66**, 4020 (2011).
14. Zhang Z., Eisele K. *J. Exp. Fluids*, **25**, 371 (1998).
15. Hanson S. *J. Phys. D: Appl Phys.*, **6**, 164 (1973).
16. Zhang Z., Eisele K. *J. Exp. Fluids*, **20**, 466 (1996).
17. Zhang Z., Eisele K. *J. Exp. Fluids*, **19**, 89 (1995).
18. Ruck B. *J. Exp. Fluids*, **10**, 349 (1991).
19. Huisman S.G., Gils D.P.M.V., Sun C. *Eur. J. Mech. B*, **36**, 115 (2012).
20. Durst F., Stevenson W.H. *Appl. Opt.*, **18**, 516 (1979).
21. Li E., Tieu K., Mackenzie M. *Opt. Las. Eng.*, **27**, 395 (1997).

22. Ghosh A., Nirala A.K. *Meas. Sci. Technol.*, **27**, 055202 (2016).
23. Stojanoff C.G., Tholl H.D., Luebbbers H.A., Windeln W. *Proc. SPIE*, **1507**, 426 (1991).
24. Schneider F., Windein W. *Appl. Opt.*, **27**, 4481 (1988).
25. Hansen C.D., Kitchen S.R. *Opt. Las. Eng.*, **44**, 954 (2006).
26. Schock H.J., Case S., Konicek L. *Appl. Opt.*, **23**, 752 (1984).
27. Connelly M.J., Szecowka P.M., Jallapuram R., Martin S., Toal V., Whelan M.P. *Opt.Lett.*, **33**, 330 (2008).
28. Ghosh A., Nirala A.K. *Laser Phys.*, **25**, 116201 (2015).
29. Meier R.W. *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 987 (1965).
30. Champagne E.B. *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 51 (1967).
31. Гош А., Нирала А.К. *Оптика и спектроскопия*, **118**, 508 (2015).
32. Schwar M.J.R., Pandya T.P., Weinberg E.J. *Nature*, **215**, 239 (1967).
33. Richter A.K., Carlson F.P. *Appl. Opt.*, **13**, 2924 (1974).
34. Latta J.N. *Appl. Opt.*, **10**, 599 (1971).
35. Власов Н.Г., Мосякин Ю.С., Скроцкий Г.В. *Квантовая электроника*, №7, 14 (1972) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **2**, 8 (1972)].
36. Chang B.J., Leonard C.D. *Appl. Opt.*, **18**, 2407 (1979).
37. Guenther B.D. et al. editor in chief *Encyclopedia of Modern Optics* (London: Elsevier Acad. Press, 2005).
38. <http://www.integraf.com/Downloads/PFG-01.pdf>
39. Syms R.R.A., Solyman L. *Appl. Phys. B*, **32**, 165 (1983).
40. Shakher C., Yadav H.L., Nirala A.K. *J. Opt.*, **20**, 259 (1989).
41. Saxby G. *Practical Holography* (London: Prentice Hall, 1988).
42. Collier R.J., Burckhardt C.B., Lin L.H. *Optical Holography* (New York: Academic, 1971).