

В. В. Рахманов^{1}, М. В. Кашкарлова¹, В. Г. Меледин¹, И.К. Кабардин¹*

Подходы к улучшению качества оптического сигнала в гидродинамическом эксперименте при использовании ЛДА с МКП-ФЭУ

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: rahmanov@inbox.ru

Аннотация. В работе предложены и опробованы экспериментальные подходы по улучшению качества оптического сигнала в гидродинамическом эксперименте при использовании лазерного доплеровского анемометра с фотоприемником на основе фотоэлектронного умножителя на микроканальных пластинах. В основе предложенных подходов используются свойства данного типа фотоприемника и накопленный опыт в экспериментальных гидродинамических исследованиях при помощи различных оптических приборов. Применение комплекса предложенных мер в двух видах гидродинамических экспериментов позволило существенно улучшить качество принимаемого оптического сигнала и, как следствие, упростить интеграцию микроканальных фотоприемников в лазерные доплеровские анемометры. Это позволяет использовать фотоприемники, выпускаемые в РФ, для ряда задач без потери качества работы анемометра. Данное направление является актуальным в связи с возросшим запросом на импортозамещение критически важных частей и удешевление стоимости конечного оборудования.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, МКП-ФЭУ, гидродинамический поток

V. V. Rakhmanov^{1}, M. V. Kashkarova¹, V. G. Meledin¹, I. K. Kabardin¹*

Approaches to Improving the Quality of the Optical Signal in a Hydrodynamic Experiment Using LDA with MCP-PMT

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: rahmanov@inbox.ru

Abstract. In this paper experimental approaches to improving the quality of the optical signal in a hydrodynamic experiment using a laser Doppler anemometer with a photodetector based on a photomultiplier on microchannel plates are proposed and tested. The proposed approaches are based on the properties of this type of photodetector and accumulated experience in experimental hydrodynamic research using various optical instruments. The use of a set of proposed approaches in two types of hydrodynamic experiments made it possible to significantly improve the quality of the received optical signal and, as a result, simplify the integration of microchannel photodetectors into laser Doppler anemometers. This makes it possible to use photodetectors produced in the Russian Federation for a number of tasks, without losing the quality of the anemometer. This circumstance is a current trend in connection with the increased demand for imported substitution of critical parts and reduction in the cost of final equipment.

Keywords: laser Doppler anemometer, MCP-PMT, hydrodynamic flow

Введение

Гидродинамические эксперименты играют важную роль в изучении сложных физических процессов. Одним из ключевых инструментов, используемых в таких исследованиях, является лазерный доплеровский анемометр (ЛДА), который позволяет измерять скорость потока жидкости или газа.

Современный ЛДА представляет собой сложное оптоэлектронное устройство, оптическая часть которого представляет собой сочетание частей высокоточного интерферометра и телескопа. Точность и надежность результатов, получаемых с помощью ЛДА, во многом зависят от качества оптического сигнала, который регистрируется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) [1].

К современным ФЭУ для их работы в качестве фотоприемников в ЛДА выдвигаются следующие требования: высокое усиление (10^5 – 10^7 раз), низкий уровень собственных шумов (темновой ток не более 1 нА), высокое быстродействие (время нарастания фронта сигнала ~ 1 нс), долговечность (около 10 000 часов наработки на отказ), компактность (не более 200 см³ в сборе с корпусом) и устойчивость к перегрузкам (мощность оптического сигнала может достигать 100 мВт). Данным требованиям удовлетворяют современные вакуумные ФЭУ. Однако, и у них есть свои недостатки: высокая стоимость (\sim \$1000 за шт.), чувствительность к магнитным полям и др.

В последние 10 лет, в связи с высоким спросом в физике высоких энергий и астрономии, активно развиваются аналоги вакуумных ФЭУ. Это кремниевые фотумножители (Si-ФЭУ) на основе микропиксельных лавинных фотодиодов и ФЭУ с микроканальными пластинами (МКП-ФЭУ). Они лишены указанных недостатков и, на данный момент, широко применяются в ядерной физике, лидарах и других приложениях [2–5]. Однако они не нашли широкое распространение в качестве фотоприемников в составе ЛДА. В первую очередь это объясняется высокой степенью консервативности данной области и во-вторую – сложностями адаптации данных типов ФЭУ при работе с реальными измерениями потоков в составе ЛДА.

В данной работе рассматриваются подходы к улучшению качества оптического сигнала в гидродинамическом эксперименте при использовании ЛДА с МКП-ФЭУ. Актуальность этой задачи обусловлена необходимостью повышения точности и достоверности результатов измерений, что особенно важно для изучения сложных и динамичных процессов в гидродинамике. В статье будут рассмотрены основные факторы, влияющие на качество оптического сигнала, а также предложены подходы к его улучшению.

Особенности применения МКП-ФЭУ

Схематично устройство МКП-ФЭУ показано на рис 1. Свет падает через защитное стекло 1 на напыленный с обратной стороны фотокатод 2. Квантовая эффективность преобразования фотонов в электроны зависит от материала фотокатода и для GaAs может составлять до 40% в максимуме спектральной чувствительности, а для бищелочного фотокатода – до 50 % [6]. Квантовая эффектив-

ность вакуумного ФЭУ обычно составляет около 20 – 30 %. Это делает МКП-ФЭУ более чувствительными детекторами по сравнению с классическими.

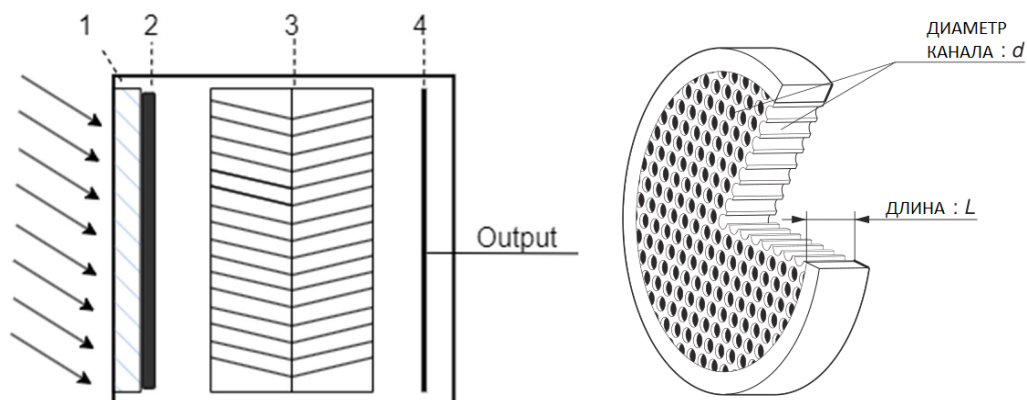


Рис. 1. Упрощенная структура МКП-ФЭУ (слева): 1 – стекло, 2 – напыленный фотокатод, 3 – 2-х секционная микроканальная пластина, 4 – анод. Внутренняя структура МКП (справа)

В электрическом поле между фотокатодом и микроканальной пластиной 3 первичные фотоэлектроны ускоряются и попадают в трубки МКП структуры. Внутри трубок также присутствует электрическое поле за счет приложенной разницы потенциалов между обкладками микроканалов. Типичный МКП имеет около шести миллионов каналов на поверхности диаметром 18 мм. Отношение длины канала L к диаметру d обычно составляет от 40 до 60.

Когда электрон ударяется о внутреннюю стенку микроканала, возникают вторичные электроны. Эти вторичные электроны ускоряются градиентом потенциала и движутся по параболическим траекториям, которые определяются их начальными скоростями. Затем они ударяются о противоположную стенку канала, что приводит к испусканию новых вторичных электронов. Таким образом, электроны движутся к выходному концу, многократно ударяясь о внутреннюю стенку канала. В результате со стороны выхода образуется лавинообразно возрастающее число электронов. Коэффициент размножения электронов достигает $10^4 - 10^6$ и зависит от количества пластин в сборке.

Эти электроны преобразуются в аноде 4 в выходной токовый сигнал. Так как длина L у структуры МКП очень маленькая (< 1 мм) по сравнению с расстояниями между диодами в вакуумном ФЭУ, то время нарастания фронта выходного сигнала в таком ФЭУ значительно ниже и может достигать 0,1 нс, тогда как у вакуумных ФЭУ этот параметр равен 1,5–5 нс.

Время нарастания импульса является основным преимуществом МКП-ФЭУ над вакуумными и делает их пригодными для детектирования высокочастотных оптических сигналов или событий с высоким временным разрешением.

Время нарастания сигнала t_r фотодетектора и его полоса пропускания B связаны известным приближенным уравнением:

$$B = \frac{0,35}{t_r}, \quad (1)$$

где B – в ГГц, а t_r – в нс. Так, для времени нарастания вакуумного ФЭУ (1,5 нс), ожидаемая полоса пропускания будет составлять порядка 230 МГц. А для МКП-ФЭУ с временем нарастания 0,2 нс, $B = 1,75$ ГГц.

В табл. 1 представлены основные параметры МКП-ФЭУ и вакуумных ФЭУ.

Таблица 1

Типичные параметры ФЭУ

ФЭУ	Усиление, раз	Время нарастания, нс	Анодная чувствительность, А/Лм	Средн. анодный ток, мкА	Напр. питания, кВ
Вакуумный	10^7	1,4	700	10	1,2
МКП	10^6	0,2	200	0,1	3,4

К минусам МКП-ФЭУ можно отнести высокий по сравнению с вакуумными ФЭУ уровень собственных шумов. Для счетно-фотонных вакуумных ФЭУ производства Hamamatsu уровень темного тока составляет от 0,1 до 1 нА, тогда как для МКП-ФЭУ той же фирмы – от 0,5 до 5 нА. Темновой счет МКП-ФЭУ имеет разброс от модели к модели от 50 до 30 000 импульсов в секунду, тогда как у вакуумных ФЭУ – от 10 до 300. Высокий уровень собственных шумов приводит к снижению динамического диапазона регистрируемого света.

Одним из существенных недостатков МКП-ФЭУ является восприимчивость к повреждениям из-за воздействия высоких уровней света. Высокая мощность оптического сигнала, сфокусированного в малую приемную апертуру, может привести к необратимому повреждению микроканальных пластин. Во избежание повреждений и для поддержания работоспособности необходимо не допускать установку этого вида ФЭУ в фокус приемной оптики доплеровского анемометра.

Еще одним минусом МКП-ФЭУ является требования к напряжению питания. На одну пластину МКП необходимо подавать до 1 кВ напряжения. Если таких пластин 2, то уже 2 кВ только на МКП структуре, а есть еще смещение фотокатода и анода. Однако за счет того, что токи потребления низкие (<1 мА), это не является существенной проблемой.

Еще одной особенностью МКП-ФЭУ является низкий выходной ток (средний ток 0,1 мкА) при относительно высоком импульсном токе до 100 мА, что может привести к быстрому насыщению и высоким нелинейностям выходного сигнала.

В задаче измерения скорости гидродинамических потоков при помощи ЛДА существуют несколько особенностей, затрудняющих проведение экспериментов.

1. Качество сигнала может существенно ухудшаться с увеличением заглубления области измерения, если оптическая ось ЛДА расположена не строго по нормали к границе раздела воздух-стекло-вода. Чем больше угол отличается от 90 градусов, тем быстрее ухудшается качество сигнала при заглублении из-за нарушения интерференции в области измерения [7]. Кроме того, при заглублении лазерных лучей в поглощающую среду интенсивность отраженного сигнала падает экспоненциально.

2. Отражения лучей вблизи границ раздела. Паразитные отражения от поверхностей раздела фаз сильно снижает динамический диапазон фотоприемника. Это может привести к появлению артефактов или искажений в измеренных скоростных данных.

3. Помехи от диффузного рассеивания света от светоотражающих частиц в потоке. Избыток светорассеивающих частиц в зоне измерения приводит к чрезмерному рассеиванию света зондирующих лучей. Теряется полезная мощность сигнала, и рассеянное излучение может создавать зашумление сигналов.

4. Малое количество достоверных доплеровских всплесков. При недостаточном количестве светорассеивающих частиц или при измерениях в мутных потоках будет детектироваться малое количество частиц в единицу времени. Это не позволит измерять быстротекущие потоки и их пульсации.

Все эти причины приводят к деградации качества оптического сигнала для всех видов фотоприемников, однако, для МКП-ФЭУ из-за его особенностей – высокие собственные шумы, восприимчивость к повреждениям из-за воздействия высоких уровней света, высокая квантовая эффективность и быстрое насыщение выходного сигнала – необходимо особенно тщательно подбирать решения и подходы для возможности его штатной работы в ЛДА.

Экспериментальные результаты

Для оценки качества оптического сигнала непрямыми методами были использованы следующие критерии: количество достоверных частиц в единицу времени (это отражает чувствительность приемной части ЛДА), отношение среднеквадратичного отклонения (СКО) скорости к средней скорости в эксперименте – коэффициент вариации скорости (этот параметр описывает погрешность определения доплеровской частоты) и отношение СКО достоверности к средней достоверности определения скорости – коэффициент вариации достоверности.

Достоверность определения скорости равна отношению максимального значения к среднему в спектре сигнала и напрямую коррелирует с соотношением сигнал/шум. Коэффициент вариации достоверности в эксперименте позволяет сравнивать шумовые свойства сигналов в разных экспериментах.

В контейнере прямоугольного сечения с габаритными размерами 550x300x200 мм (ДхВхШ) было проведено 2 эксперимента: измерение скорости затопленной струи в центре сечения (рис. 2 а.) и измерение пульсаций скорости

потока от вращающихся лопаток (рис. 2 б) при помощи ЛДА с установленным МКП-ФЭУ.

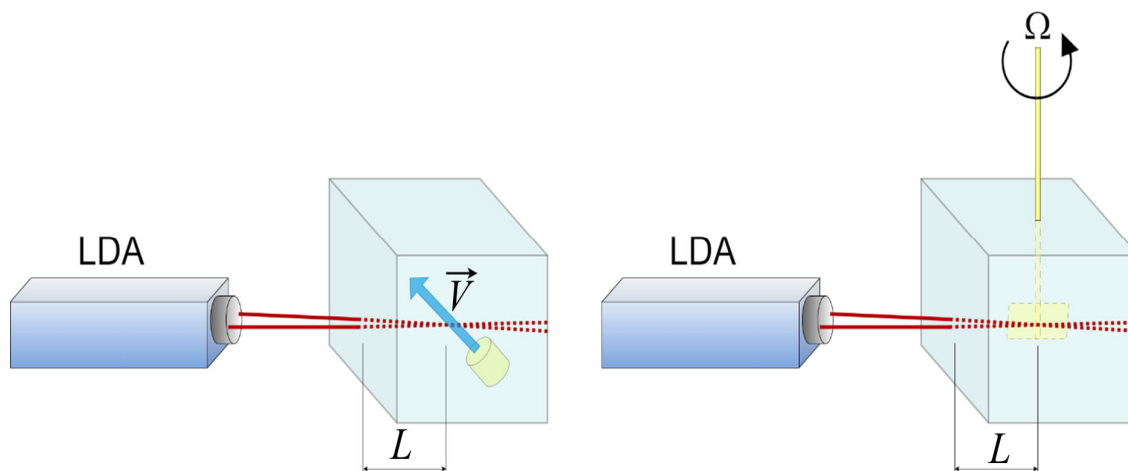


Рис. 2. Схема измерений: затопленная струя (слева) и пульсации от вращающихся лопаток (справа)

В первом эксперименте по измерению скорости затопленной струи зона измерения была на расстоянии $L=115$ мм от стенки и на расстоянии 30 мм от среза сопла. Оптическая ось ЛДА была расположена под углом 4 градуса к нормали передней поверхности контейнера. Угол в 4 градуса был введен намеренно, чтобы понять, насколько хуже будут параметры сигнала по сравнению с нулевым углом. Никаких дополнительных подходов к улучшению сигнала не было предпринято: отраженные от переднего и частично от заднего стекла лучи попадали в объектив, и дополнительного засева частицами потока не было.

Далее последовательно реализовывались подходы к улучшению оптического сигнала и изучалось влияние этих шагов на критерии качества сигнала.

Было выполнено 5 шагов для улучшения качества оптического сигнала:

- 1) устранение перекоса оптической оси прибора к нормали стекла контейнера;
- 2) фильтрация отраженных от передней стенки контейнера лазерных лучей. Это достигалось за счет перегораживания части главного объектива, куда попадают отраженные лучи, плотным светопоглощающим картоном;
- 3) фильтрация лучей от задней поверхности контейнера. Это должно приводить к меньшим помехам в оптическом сигнале и меньшей перегрузке фотоприемника;
- 4) фильтрация отраженного света от передней и от задней стенки;
- 5) добавление искусственных светорассеивающих частиц. Дополнительно к пункту 4 добавлялись латексные светорассеивающие частицы с нейтральной плавучестью диаметром 20 мкм.

Полученные в результате применения данных подходов экспериментальные данные приведены в табл. 2.

Эффекты от применения подходов к улучшению сигнала

Примененные подходы	Допл. вспышек в секунду	Коэфф. вариации скорости, %	Коэфф. вариации достоверности, %
Исходное состояние	2,5	30,4	57,1
Устранение перекоса	3,6	28,7	55,7
Фильтрация от передней стенки	1,2	29,5	62,1
Фильтрация от задней стенки	3,3	29,8	60,2
Фильтрация от обеих стенок	4,1	25,5	50,6
Засев частицами	15,5	26,2	43,2

Как видно из табл. 2, на рост потока частиц положительно повлияли устранение перекоса, фильтрация отражений от обеих стенок и засев светоотражающими частицами. Фильтрация лучей только от передней или только от задней стенки сказалась негативно, так как, по-видимому, вместе с устранением части отражений, уменьшилась полезная площадь приемной апертуры, но при этом фотоприемник подвергался перегрузке по свету. А фильтрация отражений от обеих стенок немного улучшила суммарный результат. Однако, существенно увеличить поток доплеровских вспышек получилось только засевом светоотражающих частиц.

Такая же тенденция наблюдается и с другими параметрами качества оптического сигнала. Улучшение оптического сигнала в данном эксперименте при использовании ЛДА с МКП-ФЭУ происходит при устранении перекоса оптической оси, фильтрации отражений от обеих стенок и добавлении светоотражающих частиц. При применении комплекса мер получилось максимально улучшить поток частиц в 6 раз и параметры, отвечающие за достоверность определения доплеровской скорости, на 4,9%, а меру шумов фотоприемника – на 13,9%.

Для оценки динамических свойств потока во втором эксперименте измерялась частота пульсаций скорости вращающихся лопаток. Точка измерения была на расстоянии $L=115$ мм от стенки и на расстоянии 2 мм от края лопатки. Начальный угол перекоса оптической оси прибора был выбран равным 4 градуса, и был выполнен засев светоотражающими частицами. Частоты пульсаций в такой конфигурации удалось измерить до частоты 2 Гц.

При выполнении полного спектра подходов к улучшению оптического сигнала диапазон измеряемых пульсаций составил 5 Гц.

Заключение

Применение предложенных подходов по улучшению качества оптического сигнала в гидродинамическом эксперименте при использовании ЛДА с МКП-ФЭУ позволило существенно увеличить поток доплеровских вспышек с положительными результатами по остальным параметрам в случае измерения скорости затопленной струи. Кроме того, удалось повысить измеряемую частоту пульсаций от вращающихся лопаток с 2 до 5 Гц.

Использование МКП-ФЭУ без дополнительных усилий по уменьшению паразитных засветок ведет к существенной деградации доплеровского сигнала.

Применение данного типа фотоприемника в составе ЛДА является перспективным в связи с возросшим запросом на импортозамещение и снижение стоимости конечного оборудования.

Все эти подходы могут применяться и для других типов фотоприемников, но с несколько меньшим положительным эффектом.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. С. Соболев, Г. А. Кащеева Потенциальная точность методов лазерной доплеровской анемометрии в режиме одночастичного рассеяния // Автометрия, 2017. – Т. 53, № 3. – С. 74–80.
2. Corsi, F., Marzocca, C., Perrota, A., Dragone, A., Foresta, M., Del Guerra, A., et al., 2006. Electrical characterization of Silicon Photomultipliers detectors for optimal front-end design. In: IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, N30-222, pp. 1276–1280.
3. Imando, A.T., Dinu, N., Callier, S., Cuisy, D., Gaspard, M., Pinot, L., et al., 2012. Miniaturized multi-channels SiPM read-out electronics for medical imaging application. In: Proceedings of Science, PoS(PhotoDet2012)049.
4. O. Siegmund, J. Vallerger, B. Welsh, A. Tremsin, J. McPhate, Imaging photon counting detectors for high time resolution astronomy, High Time Resolution Astrophysics, Astrophysics and Space Science Library 351, 327 (2008).
5. A Lehmann et al 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2374 012128. doi:10.1088/1742-6596/2374/1/012128.
6. Nützel, G. (2011). Single-Photon Imaging Using Electron Multiplication in Vacuum. In: Seitz, P., Theuwissen, A. (eds) Single-Photon Imaging. Springer Series in Optical Sciences, vol 160. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18443-7_5.
7. Rakhmanov V., Kulikov D. The analysis of applicability of the refractive-index-matching method for flow investigation by LDA method in models of the fire chambers of complex geometry / Thermophysical Basis of Energy Technologies, EPJ Web of Conferences, Vol. 76, 2014. 1008-4.

© В. В. Рахманов, М. В. Кашкарова, М. Г. Меледин, И. К. Кабардин, 2024