

03;15

Исследование ударных волн в электрохимическом микроактюаторе

© А.В. Постников

Ярославский филиал Физико-технологического института РАН,
Ярославль, Россия
E-mail: mems@yf-ftian.ru

Поступило в Редакцию 25 июля 2018 г.

Исследован взрывной режим работы электрохимического микроактюатора. В этом режиме происходит взрыв микропузырьков смеси водорода и кислорода, образующихся в процессе электрохимического разложения воды высокочастотными импульсами переменной полярности, в рабочей камере электрохимического микроактюатора. Показано, что ударная волна возникает не вследствие взрыва микропузырька, а в результате кавитации взрывной полости. На основе экспериментального определения зависимости скорости ударной волны от расстояния до центра взрыва найдено давление в ударной волне. Определена динамика схлопывания микропузырька на основе скоростной теневой фотографии.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.23.47017.17475

Мембранный актюатор является широко распространенным устройством микрофлюидики [1–3]. Это ключевая часть микронасосов, клапанов и других устройств, используемых в био- и химическом анализе, системах дозирования лекарств, биологического секвенирования. К основным параметрам таких устройств относятся их надежность, потребляемая мощность, простота и стоимость изготовления, а также биосовместимость, скорость работы и точность дозировки. Электрохимический актюатор очень привлекателен, поскольку имеет простую конструкцию, развивает значительные усилия. Действие актюатора основано на генерации газа в электрохимическом процессе с последующим его удалением из систем. Главный недостаток такого актюатора — длительный рабочий цикл по причине медленной рекомбинации газа в рабочем объеме. В [4] был представлен электрохимический микроактюатор, использующий для разложения воды и генерации газов импульсы переменной полярности высокой частоты [5]. Принцип работы прибора

основан на том, что в рабочем объеме производится газовая смесь кислорода и водорода. Эти газы содержатся в нанопузырьках, которые при достижении определенного уровня перенасыщения могут сливаться в микропузырьки, содержащие стехиометрическую смесь газов. В таких микропузырьках происходит спонтанная реакция кислорода и водорода. Причины этой реакции выяснены не до конца, однако ясно, что реакция идет вследствие присутствия в объеме нанок капель воды. Реакция носит взрывной характер и вызывает значительный подъем давления в камере актюатора. Рабочий цикл актюатора в таком режиме составляет единицы миллисекунд. Это на несколько порядков меньше, чем в известных к настоящему времени конструкциях, используемых в микрофлюидике.

В данном исследовании рассмотрен взрывной режим работы актюатора. Непрозрачная мембрана, закрывающая рабочий объем актюатора, мешает проведению измерений, поэтому она была удалена. Подложка с прибором помещалась в кювету с одномолярным раствором сульфата натрия в вертикальном положении. На уровне электродов через кювету проходит несфокусированный луч гелий-неонового лазера с длиной волны 632 nm. Диаметр пучка лазера составляет 0.55 mm. Луч лазера отклоняется в горизонтальной плоскости, если в среде возникает градиент показателя преломления. Угловое отклонение луча с помощью линзы преобразуется в линейное смещение в плоскости фотоприемника. Двух сегментный фотоприемник имеет полосу пропускания 3 MHz. Луч лазера в исходном положении засвечивает в равной степени оба сегмента фотоприемника. Сигналы с обоих сегментов регистрируются запоминающим осциллографом PicoScope 5000. Полоса частот осциллографа 100 MHz. Кювета с электролитом и прибором размещается на микропозиционере. Микропозиционер дает возможность изменять расстояние от прибора до лазерного луча с точностью 10 μm в диапазоне 50 mm.

Рабочий цикл актюатора состоит из следующих стадий, обозначенных цифрами на рис. 1: производство смеси газов до достижения определенной величины перенасыщения — инкубация (1), рост микропузырька (2), стационарная фаза (3) и, наконец, схлопывание микропузырька (4). Эти характерные стадии различаются поведением тока, протекающего через электролит. На рис. 1 верхняя трасса представляет импульсы тока. Падение тока на участке 2 продолжается 60–70 μs . За это время пузырь со смесью газов достигает размеров электродов, и ток почти прекращается. На указанной стадии не происходит формирования

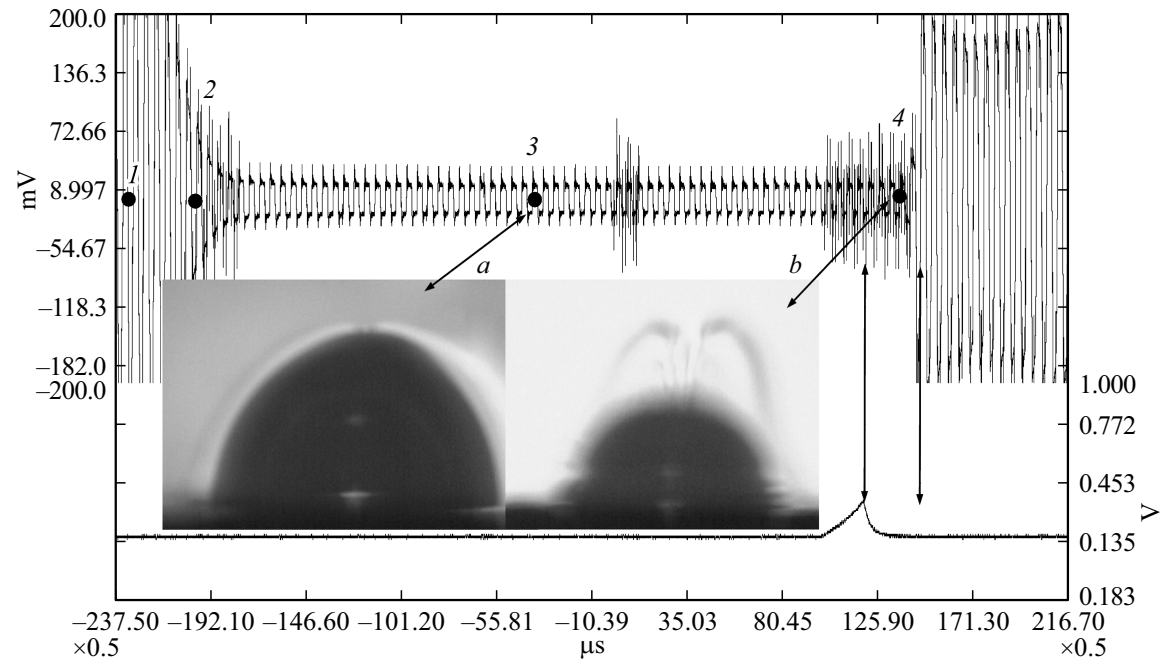


Рис. 1. Осциллограммы тока, протекающего через электролит, и синхроимпульса скоростной камеры. Цифры 1–4 поясняются в тексте. На вставке *a* — теневая фотография пузырька в стационарной фазе, на вставке *b* — теневая фотография пузырька, соответствующая синхроимпульсу.

ударной волны по следующей причине. Во время периода инкубации в жидкости образуется облако нанопузырьков над электродами [6]. Это область с плотностью, меньшей, чем у воды, поэтому она играет роль демпфера и не дает возможности сформироваться ударной волне. Стационарная фаза продолжается $200\text{--}300\ \mu\text{s}$ (область 3 на рис. 1). Этому моменту соответствует теневая фотография пузырька на вставке *a* к рис. 1. Вокруг пузырька видно светлое гало — это облако нанопузырьков. Показатель преломления в облаке нанопузырьков меньше, чем в окружающем электролите. Высота пузырька составляет $1.5\ \text{mm}$. Схлопывание пузырька продолжается примерно $50\ \mu\text{s}$ (участок 4 на рис. 1). Время схлопывания определено с помощью скоростной фотографии. Нижняя трасса на рис. 1 показывает положение синхроимпульса, во время которого камера собирает данные, время экспозиции $20\ \mu\text{s}$. Теневая фотография на вставке *b* к рис. 1 соответствует моменту синхроимпульса камеры. Время от окончания синхроимпульса до полного восстановления тока это и есть время схлопывания пузырька (обозначено вертикальными стрелками на рис. 1). При схлопывании пузырька образуется ударная волна, которая регистрируется фотоприемником как градиентное изменение оптической плотности электролита. На небольшом расстоянии от электродов в месте формирования волны ее скорость превышает скорость звука в среде [7]. Для измерения скорости распространения ударной волны луч лазера перед прохождением через кювету с помощью двулучепреломляющей пластинки расщепляется в горизонтальной плоскости на два луча равной интенсивности. Таким образом, фронт ударной волны пересекает сначала один пучок, затем второй. Расстояние между центрами лазерных пучков составляло $1.5\ \text{mm}$. Каждый пучок из пары попадал на разные сегменты фотоприемника. Измеряя время между максимумами откликов разных сегментов фотоприемника, можно по известному расстоянию между лучами вычислить скорость ударной волны. На рис. 2 представлены сигналы сегментов фотоприемника при прохождении через лучи ударной волны. На вставке к рис. 2 приведены панорама сигналов с фотоприемников и изменение тока через электролит при формировании и взрыве микропузырька. Из рис. 2 видно, что окончание сигнала сегмента 1 соответствует началу отклика сегмента 2. Это означает, что расстояние между пучками лазера равно протяженности ударной волны. Изменяя расстояние пары пучков до подложки с электродами, можно измерить изменение скорости ударной волны. Из-за относительно большого расстояния

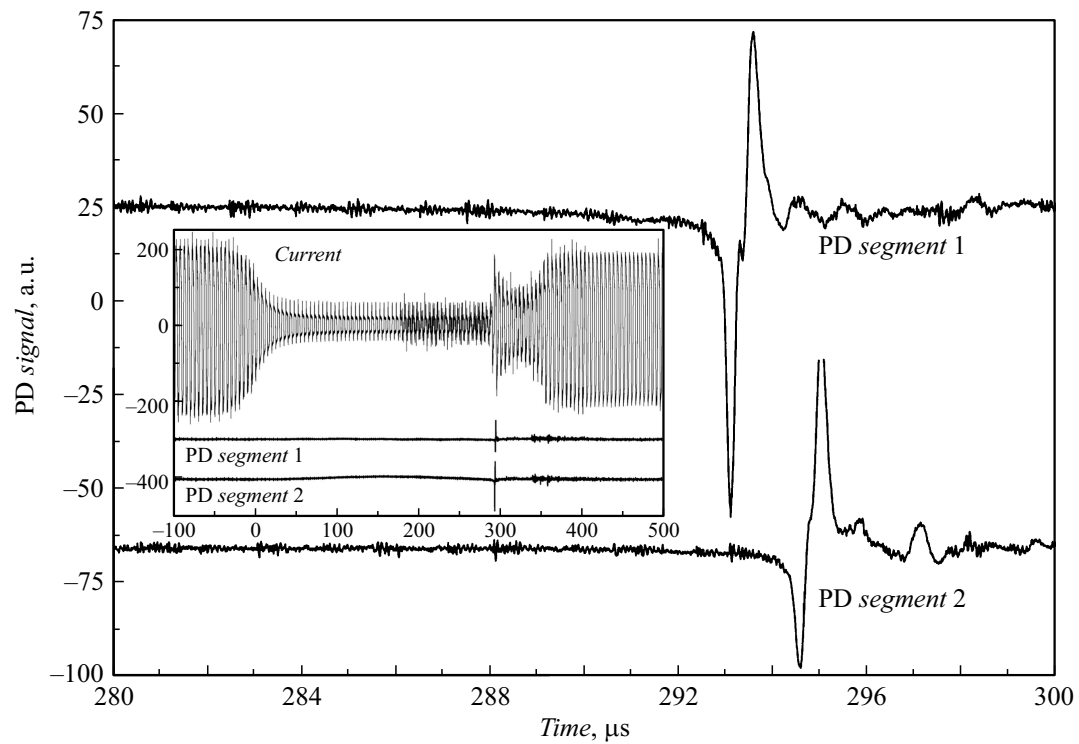


Рис. 2. Отклики сегментов фотоприемника при пересечении лазерного пучка ударной волной. На вставке — панорамная осциллограмма с током через электролит.

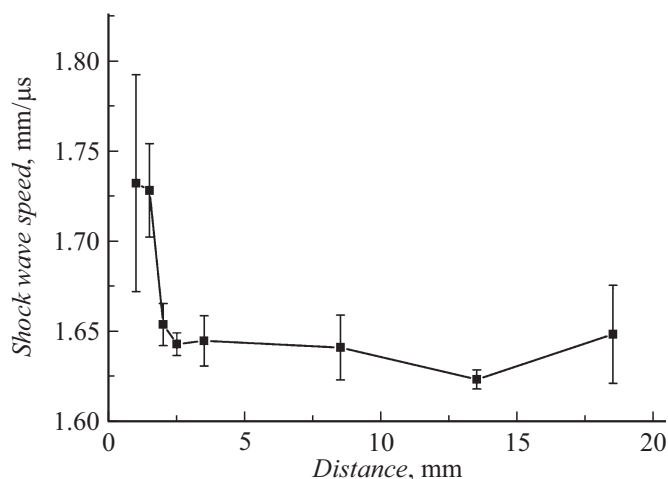


Рис. 3. Изменение скорости ударной волны в зависимости от пройденного расстояния.

между пучками такие измерения будут давать заниженный результат, поскольку замедление происходит на масштабе 5–10 mm. Зависимость скорости распространения ударной волны от расстояния до электродов представлена на рис. 3. На расстоянии более 3 mm от электродов до середины расстояния между пучками скорость распространения равна скорости звука в электролите (по данным, приведенным в [8]). Энергия взрывов микропузырьков не является постоянной, а имеет значительную дисперсию по величине. При приближении пучков к электродам на расстояние меньше миллиметра это выражается в большом разбросе экспериментальных данных. Согласно модели Гилмора [9] и уравнению состояния Тейта, соотношение между давлением и скоростью ударной волны записывается следующим образом:

$$p_s = (p_a + B) \left(\frac{2nu_s^2}{(n+1)c_0^2} - \frac{n-1}{n+1} \right) - B,$$

где p_s — давление в ударной волне, p_a — равновесное давление в жидкости, c_0 — скорость звука в электролите (1.64 mm/μs), u_s — скорость ударной волны, показатель n равен 7, B — константа, равная

314 МПа. Исходя из данных, представленных на рис. 3, давление на фронте ударной волны составляет $p_s = 74$ МПа.

В результате проведенного исследования показано, что ударная волна формируется при схлопывании пузырька, образованного при взрыве микропузырька со смесью кислорода и водорода. Дана количественная оценка протяженности самой ударной волны. На основе модели Гилмора и измерений скорости ударной волны в зависимости от пройденного расстояния вычислено давление на фронте ударной волны. Таким образом, полученные результаты способствуют детальному пониманию процессов при работе электрохимического микроактюатора во взрывном режиме.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России с использованием оборудования Центра коллективного пользования диагностики микро- и наноструктур.

Список литературы

- [1] Yi Y., Buttner U., Carreno A.A.A., Conchouso D., Foulds I.G. // J. Micromech. Microeng. 2015. V. 25. P. 105011.
- [2] Lee D.E., Soper S., Wang W. // Microsyst. Technol. 2008. V 14. P. 1751–1756.
- [3] Werber A., Zappe H. // J. Microelectromech. Syst. 2008. V. 17. P. 1218–1227.
- [4] Uvarov I.V., Lokhanin M.V., Postnikov A.V., Melenev A.E., Svetovoy V.B. // Sensors Actuators B: Chemical. 2018. V. 260. P. 12–20.
DOI: 10.1016/j.snb.2017.12.159
- [5] Svetovoy V.B., Remco G.P., Sanders R.G.P., Elwenspoek M.C. // J. Phys.: Condens. Matter. 2013. V. 25. P. 184002. DOI: 10.1088/0953-8984/25/18/184002.
- [6] Postnikov A.V., Uvarov I.V., Lokhanin M.V., Svetovoy V.B. // PLoS ONE. 2017. V. 12. P. e0181727. DOI: 10.1371/journal.pone.0181727
- [7] Brennen C.E. Cavitation and bubble dynamics. N.Y-Oxford: Oxford University Press, 1995. P. 282.
- [8] Chen C.T., Chen L.S., Millero F.J. // J. Acoust. Soc. Am. 1978. V. 63. P. 1795–1800.
- [9] Vogel A., Busch S. // J. Acoust. Soc. Am. 1996. V. 100. P. 148–165.