

Микрожидкостная акустоэлектроника — история, достижения, проблемы и перспективы

В.Г. Можаяев*

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

Представлен краткий обзор исследований в области взаимодействия акустических волн в твердых телах с помещенными на их поверхность микрообъемами жидкости. Обсуждаются результаты, полученные в лаборатории поверхностных акустических волн кафедры акустики физического факультета МГУ и зарубежных научных центрах.

PACS: 43.20.-f, 43.25.-x, 43.35.+d, 46.40.Cd, 47.10.-g, 47.35.Pq, 47.55.D-, 62.60.+v, 62.65.+k, 68.03.Kn, 68.35.Iv, 68.60.Bs, 77.65.Dq, 77.65.Fs. УДК: 534.2, 534-14, 534-16, 543, 579, 615, 621.38.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, пьезокристаллы, лаборатории на чипах, транспорт капель, колебания капель, капиллярные волны, акустический диэлектрофорез.

С наступлением XXI века связано возникновение, формирование и развитие нового научного направления, которое кратко можно назвать микрожидкостной акустоэлектроникой. В существенной степени это связано с идеями и инициативами группы немецких ученых во главе с профессором А. Вискфорсом [1], хотя для объективности следует отметить, что некоторые вопросы, относящиеся к данной области, исследовались и ранее. В последние годы опубликован ряд обзоров, посвященных данному актуальному и бурно развивающемуся научному направлению [2–7].

Предметом микрожидкостной акустоэлектроники является исследование разнообразных физических, химических и биологических процессов, происходящих при взаимодействии малых объемов жидкости с поверхностными акустическими волнами на поверхности твердых тел. Практическая цель этих исследований состоит в разработке и создании новых микроэлектронных устройств типа «лаборатории на чипе» или кратко биочипов, а также в разработке новых методов нанотехнологий на основе воздействия на капли поверхностных акустических волн. Устройства типа лаборатории на чипе предназначены для выполнения функций обычных химических или биологических лабораторий, но только в полностью автоматизированном режиме работы с малыми каплями растворов объемов порядка микро- и нанолитров. Акустические волны в обсуждаемых устройствах могут использоваться для направленного перемещения капель, контролируемого деления крупных капель на более мелкие и создания в каплях вихревых акустических течений, способных многократно ускорять протекающие в них химические и биологические процессы.

Успешная реализация планов и намерений по созданию акустических лабораторий на чипах и их массовое производство способны вызвать революционные изменения и улучшения аппаратных средств современной медицины. В этом случае картина приема пациен-

та врачом в будущем может выглядеть так. У каждого врача на столе будет стоять прибор типа биочипа, легко программируемый с помощью клавиатуры (как обычный компьютер) на выполнение специальных операций для анализа состояния и лечения конкретного больного. В процессе беседы с больным врач может взять у него микропробы различных биологических жидкостей, например, крови, слюны, пота и т. д. (тело человека, как известно, состоит на три четверти из воды) и поместить их для анализа в биочип. В процессе дальнейшей беседы врача с пациентом биочип, как ожидается, быстро выполнит серию анализов, необходимых для объективной характеристики состояния данного больного прямо на момент приема у врача. Далее на основе результатов такого оперативного и объективного анализа врач сможет снова использовать биочип, но теперь уже в иной качестве — не для проведения анализов, а для синтеза индивидуального лекарства для данного конкретного больного. Такая оперативность и объективность анализов, а также оперативность синтеза индивидуальных лекарственных препаратов должны качественно изменить и улучшить эффективность медикаментозного лечения.

Следует отметить, что взаимодействия капель с поверхностными акустическими волнами на поверхности твердых тел представляют собой довольно обширную и сложную область физических исследований. В нее входит изучение как линейных, так и нелинейных динамических взаимодействий всех трех основных фаз конденсированных сред: твердой (обычно пьезокристаллической) подложки, жидких капель — капель чистых жидкостей, растворов, суспензий и гелей, а также газообразной атмосферы. Причем в эти взаимодействия вовлечены не только акустические, но и капиллярные волны, а на пьезоэлектрических подложках взаимодействия происходят с участием и электрических полей. В настоящее время исследования таких взаимодействий проводятся во многих лабораториях в развитых странах мира, в том числе в Германии (А. Wixforth и др.), Франции (J. F. Manceau, V. Laude и др., P. Brunet и др.), Италии (M. Cecchini

*E-mail: vgmochaev@mail.ru

и др.), Греции (E. Gizeli, и др.), Великобритании (G. McHale, M. I. Newton и др., Y. Q. Fu и др.), Австралии (J. R. Friend L. Y. Yeo и др.), Японии (S. Shiokawa, M. K. Kurosawa и др., J. Kondoh и др.) и США.

Исследования физических процессов в микрожидкостных акустоэлектронных системах с участием автора данного обзора проводятся в лаборатории поверхностных акустических волн кафедры акустики физического факультета МГУ, начиная с 2002 г. Основные результаты этих исследований [8–22] кратко можно сформулировать так:

1. С помощью численных расчетов обнаружено смещение реального порога области существования рэлеевских волн утечки на границе твердого тела и жидкости в сторону меньших значений относительно скорости объемных волн в жидкости, считавшейся ранее наименьшей предельной скоростью для существования волн утечки.
2. Предсказан новый (импульсно-колебательный) механизм волнового транспорта объектов малых размеров. Одним из принципиальных отличий этого механизма от ранее известных является равенство для него средней по времени силы нулю, т. е. обнаруженный механизм в отличие от традиционных нелинейных механизмов является линейным по амплитуде волны и за счет этого он может быть более эффективным. Другое его важное отличие состоит в двунаправленности перемещения с возможностью смены направления движения перемещаемого объекта только за счет изменения фазы импульсов и без изменения направления распространения волны, в отличие от того, что требуют традиционные представления в этом вопросе.
3. Предложена идея реализации диэлектрофореза в поле бегущих поверхностных акустических волн, распространяющихся в пьезоэлектрических материалах. Ранее для этой цели использовались только так называемые «бегущие электростатиче-

ские волны», которые в действительности являются не волнами, а только их имитацией при помощи периодической системы электродов с индивидуальными фазовыми сдвигами возбуждающего сигнала на каждом электроде. Предложенная идея может дать преимущества в случае необходимости применения диэлектрофореза к ультрамелким частицам.

4. Экспериментально обнаружено новое явление образования на поверхности капли квазистационарного выступа (сглаженного пика) при воздействии на нее встречных поверхностных акустических волн.
5. Экспериментально обнаружено новое явление автоколебательной динамики формы поверхности капли в поле бегущих поверхностных акустических волн в случае слабого наклона поверхности подложки относительно горизонтали.
6. Развита теория резонансных акустических колебаний в каплях, заполняющих пирамидальные резервуары, и толщинных акустических резонансов в капле на подложке. Объяснена и описана краевая локализация капиллярных колебаний в капле Лейденфроста.
7. Изучены особенности поля акустических волн утечки в капле вязкой жидкости и формирование в капле акустических каустик.
8. Изучено нелинейное рассеяние поверхностных акустических волн каплями, вызванное контактной нелинейностью и нелинейностью законов смачивания.

Данная работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 11-02-01499-а для исследований по теме «Изучение физических процессов в микрожидкостных акустоэлектронных системах».

[1] Wixforth A. Superlatt. Microstruct. **33**, No 5–6. P. 389. (2003).
 [2] Franke T.A., Wixforth A. ChemPhysChem. **9**, No 15. P. 2140. (2008).
 [3] Lindner G. J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, No 12. Art. 123002. (2008).
 [4] Luong T.D., Nguyen N.T. Micr. Nanosyst. **2**, No 3. P. 217. (2010).
 [5] Wang Z., Zhe J. Lab Chip. **11**, No. 7. P. 1280 (2011).
 [6] Nam J., Lim H., Shin S. Korea-Australia Rheol. J. **23**, No 4. P. 255. (2011).
 [7] Friend J., Yeo L.Y. Rev. Mod. Phys. **83**, No 2. P. 647. (2011).
 [8] Mozhaev V.G., Weihnacht M. Ultrasonics. **40**, No 1–8.

P. 927. (2002).
 [9] Mozhaev V.G., Zyryanova A.V. Proceedings of 2004 IEEE International UFFC Joint 50th Anniversary Conference. P. 1169.
 [10] Korshak B.A., Mozhaev V.G., Zyryanova A.V. Innovations in nonlinear acoustics: ISNA17 - 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics including the International Sonic Boom Forum (The Pennsylvania State University, USA. 2005). AIP Conference Proceedings. **838**. P. 500. (2006).
 [11] Korshak B.A., Mozhaev V.G., Zyryanova A.V. 2005 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. P. 1019. (2005).
 [12] Зырянова А.В., Коршак Б.А., Можав В.Г. Сборник

- трудов XVI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС. **1**. С. 40. (2005).
- [13] *Зырянова А.В., Можяев В.Г., Laude V.* Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС. **1**. С. 277. (2007).
- [14] *Sapozhnikov O.A., Karabutov A.A., Mozhaev Jr. V.G.* 2007 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. P. 391. (2007).
- [15] *Kozlov A.V., Mozhaev V.G.* Phys. Lett. A. **372**, No 26. P. 4718. (2008).
- [16] *Zyryanova A.V., Mozhaev V.G.* Phys. Wave Phenom. **16**, No 4. P. 300. (2008).
- [17] *Берёзин М.С., Зырянова А.В., Можяев В.Г.* XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2009». Секц. Физ. Подсекц. Радиофиз. Материалы докладов. Физ. ф-т МГУ. С. 1. (2009).
- [18] *Зырянова А.В., Можяев В.Г.* Письма в ЖТФ. **35**, № 10. С. 34. (2009).
- [19] *Зырянова А.В., Можяев В.Г.* ЖТФ. **79**, № 11. С. 77. (2009).
- [20] *Ivanushkin E.A., Korshak B.A.* Days on Diffraction 2013. International Conference. St. Petersburg. May 27–31, P. 40. Abstracts. (St. Petersburg: POMI, 2013).
- [21] *Козлов А.В.* Потоки энергии и эффекты локализации акустических волн в твердых телах с элементами радиальной симметрии. Автореф. дис. к.ф.-м.н. (М.: Физический ф-т МГУ имени М. В. Ломоносова, 2011). 26 с.
- [22] *Бегарь А.В.* Взаимодействие капель и малых объектов с поверхностными акустическими волнами. Автореф. дис. к.ф.-м.н. (М.: Физический ф-т МГУ имени М. В. Ломоносова, 2013). 24 с.

Microfluidics acoustoelectronics — history, achievements, problems and perspectives

V.G. Mozhaev

*Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
E-mail: vgmzhaev@mail.ru*

A brief overview is presented of studies in the field of interactions between acoustic waves in solids and micro-volumes of a liquid placed on their surface. The results obtained in the laboratory of surface acoustic waves of Acoustic Department of Physics Faculty of Moscow State University and in the foreign scientific centers are discussed.

PACS:43.20.-f, 43.25.-x, 43.35.+d, 46.40.Cd, 47.10.-g, 47.35.Pq, 47.55.D-, 62.60.+v, 62.65.+k, 68.03.Kn, 68.35.Iv, 68.60.Bs, 77.65.Dq, 77.65.Fs.

Keywords: surface acoustic waves, piezoelectric crystals, labs-on-chips, droplet transport, droplet vibration, capillary waves, acoustic dielectrophoresis.

Сведения об авторах

Можяев Владимир Геннадиевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939–29–27, e-mail: vgmzhaev@mail.ru.