

05;08

Стимулированный ультразвуком перенос микрочастиц на поверхности пластины LiNbO_3

© А.Н. Горб, О.А. Коротченков

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Украина

Поступило в Редакцию 1 апреля 2002 г.

Зарегистрировано стимулированное ультразвуком (УЗ) различной частоты перемещение микрочастиц SiC на поверхности пластины-звукопровода LiNbO_3 . Обнаружено, что вероятности прямого и обратного перемещений соответственно в направлении распространения УЗ и в противоположном направлении близки для моды a_1 волн Лэмба. В случае возбуждения моды s_1 наблюдается преимущественное прямое перемещение микрочастиц. Металлизация поверхности LiNbO_3 приводит к значительному падению доли перемещаемых частиц для моды s_1 . Указанные закономерности интерпретируются в рамках модели, учитывающей характер колебаний частиц поверхности LiNbO_3 на модах a_1 и s_1 и существование переменного пьезоэлектрического поля, сопровождающего УЗ. Предложена возможность использования обнаруженных закономерностей для транспортировки нейтральных и заряженных микрочастиц, включая биологические объекты.

Исследование процессов переноса вещества в различном агрегатном состоянии с использованием ультразвуковых волн представляет несомненный интерес с научной и прикладной точек зрения. Динамика поведения ансамбля микрочастиц вблизи пластины-звукопровода обнаруживает черты, свойственные как жидкости, так и твердому телу. При этом особенности такой динамики остаются слабо изученными [1,2]. Практические приложения данного эффекта связаны в значительной степени с возможностью циклического перемещения жидкостей и находящихся в ней частиц при контакте с пластиной-звукопроводом [3]. В частности, данный способ может найти применение в молекулярной микромеханике и переносе микробиологических объектов [4].

Учитывая различный характер соотношения компонент упругих смещений для разных мод волн в пластинах, следует ожидать существенных особенностей переноса микрочастиц на поверхности LiNbO_3

при возбуждении в пластине различных мод. Кроме того, распространение ультразвуковых (УЗ) волн в пьезоэлектрической пластине LiNbO_3 сопровождается переменным пьезоэлектрическим полем. Поскольку это поле проникает за пределы пластины, следует ожидать его взаимодействия с микрочастицами с соответствующим влиянием на процесс их переноса вдоль поверхности LiNbO_3 . Выяснению двух указанных проблем и посвящена данная работа.

В эксперименте использовалась пластина ниобата лития YZ -среза толщиной $630 \mu\text{m}$. Для возбуждения УЗ-волн она размещалась на заземленном металлическом основании (1 на вставке рис. 1). На верхнюю грань пластины LiNbO_3 наносился медный электрод 2 шириной 1 мм. Приложение высокочастотного электрического напряжения V между электродами 1 и 2 приводило к возбуждению в пластине УЗ-волн Лэмба [5]. Сопоставление экспериментально возбуждаемых резонансных мод (регистрация осуществлялась с помощью дополнительного медного электрода, находящегося на удалении $\approx 1 \text{ cm}$ от электрода 2 на вставке рис. 1) и теоретически рассчитанных частот рождения мод в данной пластине [6] позволило идентифицировать тип ряда нижайших волн Лэмба. Дальнейшие исследования проводились на двух частотах, $f_1 = 3.7 \text{ MHz}$ и $f_2 = 5.2 \text{ MHz}$, идентифицированных как моды a_1 и s_1 соответственно. При этом прикладываемое напряжение V выбиралось из условия равенства акустической мощности для обеих мод. Последняя оценивалась из сопротивления излучения [7] с учетом измеренных ранее значений коэффициента электромеханической связи для мод a_1 и s_1 [8]. Напряжение устанавливалось для случая свободной поверхности LiNbO_3 и оставалось неизменным в случае металлизации поверхности медным слоем 4 (вставка на рис. 1), осуществляемый с целью экранировки пьезоэлектрического поля. В качестве транспортируемых частиц (3 на вставке рис. 1) использовался порошок SiC со средним диаметром около $30 \mu\text{m}$ и разбросом диаметра до $15 \mu\text{m}$. Оценки массы микрочастиц дают значения в пределах от 10^{-6} до 10^{-7} g . При возбуждении УЗ наблюдалось перемещение частиц по поверхности пьезопластины, которое имело характер последовательных прыжков на расстоянии, преимущественно не превышавшие 1–2 мм. Перемещения частиц регистрировались визуально с помощью оптического микроскопа. Путем последовательно проводимых измерений отслеживались треки перемещения отдельных микрочастиц и групп из нескольких микрочастиц, совершаемые за одинаковые промежутки времени. Приведенные ниже графики усреднены по нескольким сотням

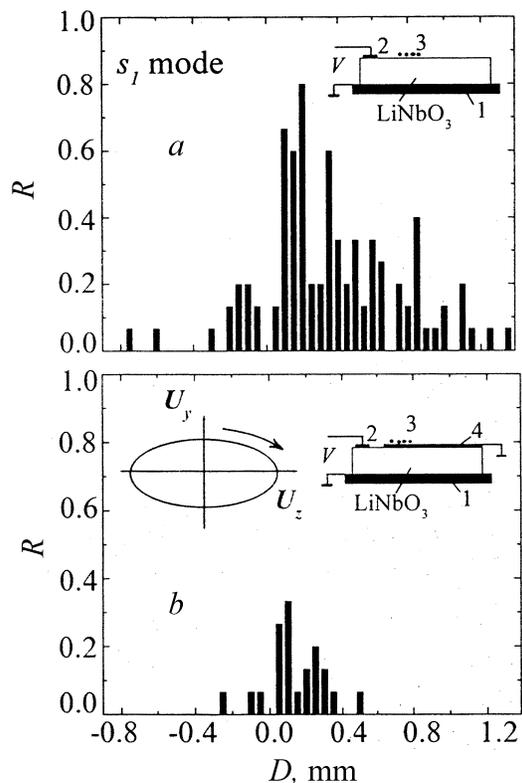


Рис. 1. Распределение относительной вероятности (R) перемещения частиц SiC на поверхности пластины LiNbO_3 для моды s_1 волн Лэмба в случае свободной (a) и металлизированной (b) поверхности. Вставки иллюстрируют: используемые схемы эксперимента (см. текст); эллиптические смещения U_y и U_z частиц среды на поверхности пластины (стрелка указывает направление их движения). (D — смещение).

таких временных интервалов, что позволило получить зависимости относительной вероятности выпадения данного перемещения микрочастицы от величины самого перемещения для разных возбуждаемых мод волн Лэмба.

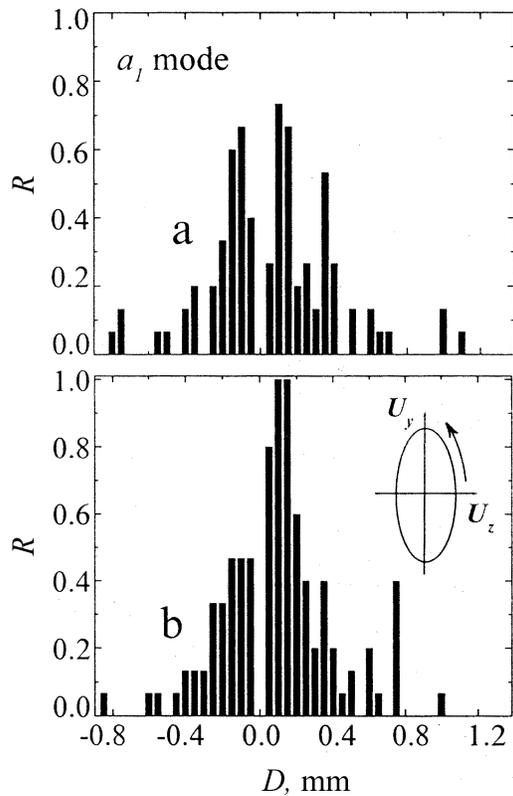


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для моды a_1 волн Лэмба.

Исследованиями обнаружена существенная зависимость распределения указанной вероятности перемещения на свободной поверхности LiNbO_3 от типа возбуждаемой моды УЗ-графики a рис. 1 и 2. Видно, что имеют место перемещения микрочастиц как в направлении УЗ-волны (положительные значения перемещений на графиках a), так и в противоположном направлении (отрицательные значения). При этом существенно подчеркнуть, что вероятности противоположных смещений близки друг к другу для моды a_1 волн Лэмба (рис. 2, a). В случае же возбуждения моды s_1 вероятность смещения частиц

вдоль направления распространения УЗ существенно выше вероятности обратного смещения (рис. 1, *a*).

Указанные закономерности могут быть проанализированы с учетом характера смещений на поверхности пьезопластины при возбуждении волн Лэмба. В нашем случае реализуются волны Лэмба с компонентами смещений U_y и U_z [6]. Количественный анализ величины данных компонент с учетом пьезоэффекта не является целью данной работы. Ограничимся качественным рассмотрением, строго справедливы лишь для изотропной пластины. Тогда компоненты смещения U_y и U_z фиксированной точки на поверхности представимы в виде [5]: $U_y = i\alpha \exp(i\omega t)$, $U_z = \beta \exp(i\omega t)$ для моды s_1 и $U_y = \gamma \exp(i\omega t)$, $U_z = i\delta \exp(i\omega t)$ для моды a_1 , где i — мнимая единица, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, t — время, а $\alpha, \beta, \delta, \gamma$ — некоторые постоянные. Следовательно, частицы поверхности пластины при возвратно-поступательном движении описывают эллипс, причем движение совершается по часовой стрелке в случае моды s_1 (вставка на рис. 1) и против часовой стрелки для моды a_1 (вставка на рис. 2). Соответственно направлению движения поверхности для моды s_1 волн Лэмба на микрочастицы, расположенные на ней, действуют силы, обуславливающие их доминирующее перемещение в положительном направлении оси Z , что и наблюдается на рис. 1, *a*. В случае же моды a_1 следует ожидать значительной вероятности перемещения микрочастиц в обратном направлении, что и иллюстрирует рис. 2, *a*.

Предположим далее, что движение микрочастиц возле пластины LiNbO_3 можно рассмотреть в рамках гидродинамического подхода (см., например, [9]). В этом случае помимо возвратно-поступательного движения микрочастиц, рассмотренного выше, следует учесть и их дрейф в направлении распространения УЗ. Так, аппроксимируя скорость микрочастицы $v(z, t) = A \cos(\omega t - kz)$ (k — волновое число УЗ) и записывая уравнение непрерывности $\text{div}(\rho v) = -\partial\rho/\partial t$ ($\rho = \rho_0 + \tilde{\rho}$ — плотность микрочастиц, включающая невозмущенное волной значение ρ_0 и „ультразвуковую“ добавку $\tilde{\rho}$), получим дрейфовую скорость $v_d = \langle \tilde{\rho} v \rangle / \rho_0 = \rho_0 A^2 / 2\omega$ ($\langle \dots \rangle$ — знак усреднения) в направлении распространения УЗ. Указанный дрейф объясняет значительную долю положительных смещений микрочастиц, наблюдаемых на рис. 2, *a*.

Для выяснения роли пьезоэлектрических полей в наблюдаемых перемещениях проанализируем смещения микрочастиц в случае экранировки пьезополей на поверхности LiNbO_3 — гарфики *b* на рис. 1 и 2.

Видно, что количество переносимых частиц существенно снизилось для моды s_1 (график b на рис. 1). Интерпретируя данный факт, отметим, что металлизация поверхности LiNbO_3 приводит к увеличению фазовой скорости волн Лэмба [10] с соответствующим увеличением длины волны в пределах до 25%. Это обуславливает уменьшение компонент смещений U_y и U_z , хотя сама величина подобного эффекта ранее не сообщалась. Отметим, однако, что в случае поверхностных волн в LiNbO_3 металлизация поверхности сопровождается уменьшением обеих компонент в пределах от 10 до 30% [7]. Можно, следовательно, предположить, что наблюдаемое на рис. 1, b уменьшение вероятности смещения микрочастиц при металлизации поверхности (до 2.5 раза) не может быть вызвано исключительно уменьшением U_y и U_z . Такое предположение подтверждают и данные рис. 2, b для моды a_1 , поскольку металлизация поверхности приводит не к уменьшению, а к различимому увеличению вероятности смещения микрочастицы для данной моды. Мы полагаем, что объяснение указанных закономерностей возможно с учетом пьезоэлектрического поля, сопровождающего УЗ-волну. В рамках такого подхода микрочастицы захватываются в потенциальных минимумах, формируемых пьезополем, и транспортируются вдоль направления распространения волны. Это и обуславливает значительное увеличение вероятности положительных перемещений на рис. 1, a по сравнению с соответствующей вероятностью на рис. 1, b . С другой стороны, для моды a_1 вероятность захвата микрочастицы в движущийся в направлении Z потенциальный минимум существенно меньше соответствующей величины для моды s_1 вследствие обратного движения частиц поверхности LiNbO_3 (вставка на рис. 2). Это и обуславливает отсутствие роста положительных смещений с одновременным возрастанием доли обратных смещений микрочастиц на рис. 2, a в сравнении с рис. 2, b . Что касается физического механизма предполагаемого захвата, то он может быть обусловлен, например, описанным ранее поляризационным взаимодействием микрочастиц с электрическим полем [11,12].

Таким образом, в работе зарегистрировано существенное влияние типа возбуждаемой в пластине LiNbO_3 моды волн Лэмба на характер перемещений микрочастиц на ее поверхности. Показано, что эти перемещения можно объяснить действием колеблющейся поверхности звукопровода и пьезоэлектрическим полем, сопровождающим волну в пластине. Полученные результаты могут найти применение в разработке устройств для транспортировки твердых микрочастиц и их взвесей, включая биологические объекты.

Авторы выражают признательность П.П. Ильину за обсуждение свойств волн Лэмба.

Список литературы

- [1] *Korotchenkov O.A., Goto T.* // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. N 21. P. 13 646–13 649.
- [2] *Korotchenkov O.A., Goto T.* // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. N 2. P. 1153–1158.
- [3] *Moroney R.M., White R.M., Howe R.T.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. N 7. P. 774–776.
- [4] *Julicher F., Ajdari A., Prost J.* // Rev. Mod. Phys. 1997. V. 69. N 4. P. 1269–1281.
- [5] *Викторов И.А.* Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.
- [6] *Бурлий П.В., Горб А.Н., Кучеров И.Я.* и др. // Вестник Киевского университета. Серия: физ.-мат. науки. 2000. № 2. С. 470–476.
- [7] *Дьелесан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982. 424 с.
- [8] *Бурлий П.В., Горб А.Н.* // Вестник Киевского университета. Серия: физ.-мат. науки. 2001. № 1. С. 421–427.
- [9] *Физическая акустика. Т. 2. Свойства полимеров и нелинейной акустики. Ч. Б.* / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1969. 420 с.
- [10] *Бурлий П.В., Ильин П.П., Кучеров И.Я.* // Укр. физ. ж. 1978. Т. 23. № 10. С. 1730–1732.
- [11] *Rousselet J., Salome L., Ajdari A.* et al. // Nature 1994. V. 370. P. 446–448.
- [12] *Faucheux L.P., Bourdieu L.S., Kaplan P.D.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. N 9. P. 1504–1507.