

Звукът – от древността до съвременните технологии

Веселин Страшилов

Казват, че двата стълба на нашето съществуване са зрението и слухът. Но също понякога казват – зрението е по-важно. Една стара китайска поговорка гласи: „Чувам и забравям; виждам и помня“.

В университета в Айова даже напоследък са направени експериментални изследвания в тази насока от професора по психология и неврология Ами Поремба (Amy Poramba). Твърди се, че „ние помним нещата, които чуваме, не така добре както тези, които виждаме или докосваме“. Въпреки това вие споделяте ли това схващане? Нима можем да разделяме и сравняваме двата процеса, двете усещания така елементарно? Още повече, че и двете са носители на една и съща физична природа – тази на вълните. Между електромагнитните и акустичните вълни, между оптиката и акустиката има дълбока и всеобхватна връзка, изразяваща

се както в сходството на математичния им апарат, така и в аналогията на базовите явления, които или ни съпътстват житейски, или лежат в основата на действието на толкова много класически и съвременни прибори. А някои ще чуете да казват, че, виждайки, опознават предметите, а чувайки – хората. Затова нека да говорим за звука с респекта, който заслужава, редом със зрението, редом със светлината.

Същност на звука. Вигове звук

Звукът представлява механично трептене на частици, което се осъществява спрямо някакво равновесно положение

под действие на определена възвръщаща (еластична) сила. Ако това трептение се разпространява в пространството като вълна, говорим за звукова или по-общо, акустична вълна. За звука трябва да се говори в два аспекта. В тесен смисъл това са трептенията и вълните, които чуваме. Това всъщност е „истинският“ звук. В широк смисъл се обхваща цялостният честотен интервал, в който тези трептения и вълни съществуват. Тук би било по-уместно да говорим най-общо за акустика. Долната граница на чистия звуков интервал е условна. По-точно би трябвало да се говори за 20 Hz или даже 16 Hz, но това в случая не е особено съществено.

Нискочестотните вълни (инфразвук), които съществуват в различни условия, могат



Веселин Страшилов е професор във Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“. Научните му интереси са в областта на физиката на твърдото тяло, акустиката и оптиката.

< 1 Hz (инфразвук – морски вълни, сеизмични вълни, хидромагнитни вълни)

1 Hz – 20 kHz (звук – шум, музика)

20 kHz – 100 MHz (ултразвук); > 100 MHz (хиперзвук); < GHz (микроакустика – прибори на вълновата микроелектроника)

THz – решетъчни фонони

Честотните интервали на звука

да се улавят от някои видове животни. Същото важи и за долната честотна зона на ултразвука. Всичко нагоре е свързано с практически приложения, за които ще споменем по-късно. Най-високо по честота стоят трептенията на частиците, изграждащи твърдите тела. Тези така наречени фонони са отвъд нашите възможности за приложения, но изучаването им дава обширна информация за структурата и свойствата на материалите. Като цяло звукът се простира по честота до терагерцовата зона, където се засича с нискочестотната

инфракчервена светлина. На тази основа се осъществяват взаимодействия между двата типа вълни, които предоставят спомнатите възможности за изследване на фононните спектри чрез облъчване на телата със светлина.

Важна особеност на звуковите вълни е, че те съществуват като надлъжно поляризирани – векторът на трептение на частиците е колинеарен с вълновия вектор, сочещ направлението на разпространение. Това е така във флуидите (газове и течности). В твърди тела освен надлъжни звуко-



Атанасиус Кирхер (Athanasius Kircher) (1650): Хармонията на музиката отразява пропорциите на Вселената



Илюстрации от знаменитата книга на енциклопедиста Атанасиус Кирхер „Универсалната музика“

вите вълни могат да бъдат и напречни. Да припомним, че електромагнитните вълни, в частност светлината, носят само напречна поляризация.

Историята накратко

Разбираемо е, че поради своята същност звукът е бил обект на всестранен интерес от древни времена, който е включвал и задълбочаващо се научно познание. Например известно е било отражението на звуковите вълни от наподобяващия цилиндрично огледало свог на помещение, позволяващо оптималното им приемане от застанал на определено място слушател – явление, познато от катедралите в Средновековието.

Още в праисторическите времена е възникнал говорът. Подсилен с музикална окраска, той после станал песен. Движението на тялото под музикален акомпанимент станало танц. Животинският рог бил трансформиран в музикален инструмент. Към 27 в. пр.Хр. отнасяме началото на развитието

на акустиката като наука за звука. Линг Лун, министър на Жълтия император, получава задачата да дефинира стандартна височина на тона. Използва бамбукова пръчка с определено разстояние между възлите. Понятието вълна възниква в Древна Гърция в резултат на наблюдението на морските вълни. Питагор свързва звука с движение на въздуха под действие на трептящо тяло. Александър Велики използва модел на мегафон, за да насърчава войските си от разстояние 15 км. По-нататък, в Средните векове, представата за звука се задълбочава. Леонардо (Leonardo da Vinci) потвърждава тезата на Питагор. Галилео (Galileo Galilei) открива принципа на резонанса чрез експерименти с махала. Мерсен (Marin Mersenne) (1636 г.), смятан за бащата на съвременната акустика, открива връзката между честотата и височината на тона. По същото време Грималди (Francesco Maria Grimaldi) работи върху принципите на дифракцията, Хук (Robert Hooke) получава връзката между механичното напрежение и деформацията

в теорията на еластичността, а Нютон (Isaac Newton) извежда теоретично скоростта на звука.

Забележително е, че през XVII в., когато оптичните явления (интерференция, дифракция, пречупване) са изяснени, се установява валидността на същите явления и в акустиката. Това поставя основите на споменатата солидна взаимносвързаност между двете науки, позволяваща трансфер на знанията между тях. Така през XIX в. Хелмхолц (Hermann von Helmholtz) поставя основите на спектралния анализ въз основа на изследване на сетивното ни усещане за звука. По-нататък с откриването на магнитострикцията от Джаул (James Prescott Joule) и на пиезоелектричеството от Пиер Кюри (Pierre Curie) се слага началото на технологичната ера в развитието на акустиката чрез разработката на преобразувателите за генериране и детекция на акустични вълни. XX в. слага началото на развитието на съвременната архитектурна акустика. След 1930 г. започва забележителният прогрес на т.нар. медицински ултразвук –

използването на акустични вълни за медицинска диагностика и терапия, достигнало понастоящем непогозирани висоти. Успоредно с това напредват с високи темпове други съвременни дисциплини като микровълнова акустика, безразрушителен ултразвуков контрол на материалите, акустична микроскопия, подводна сонография, за които ще споменем накратко по-нататък.

Как чуваме?

Тук не е мястото, където можем да се задълбочим в медицинската страна на нашето слухово възприятие. Все пак да отбележим две съществени особености на детекцията на звуковите вълни, осъществявана в ухото. Вълната на налягане във въздуха се приема от ушната мида и постъпва в цилиндричен канал, който играе ролята на акустичен резонатор. Резонансът усилва трептенията, повишавайки съществено чувствителността. По-нататък, чрез серия предаващи елементи в средното и вътрешното ухо, сигналът от тъпанчевата



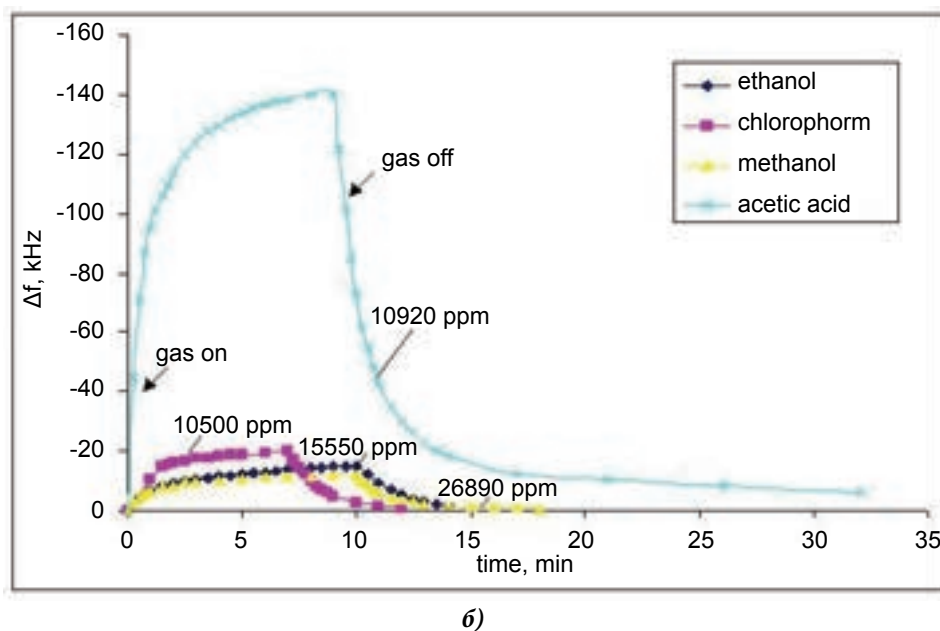
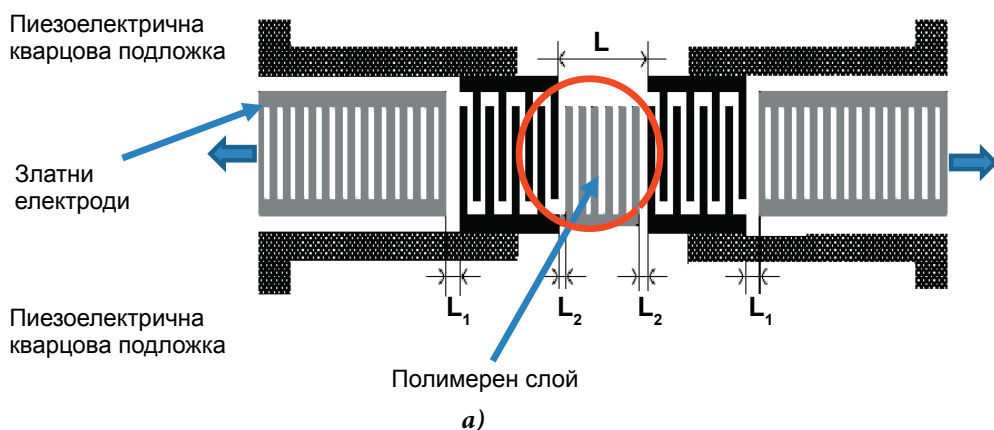
Структура на ухото: <http://medpedia.framar.bg>

мембрана се преобразува в нервен импулс, който постъпва за обработка в главния мозък. Най-ниското ниво на звуково налягане, което можем да детектираме, е това от комар на разстояние 3 м (праг на чувателност 0 dB). Налягания от порядъка на 120 dB са пагубни и нанасят непоправими поражения. За илюстрация, това е звуковото налягане на знаменитите вувузели, с които южноафри-

канските футболни привърженици насърчаваха своите любимици по време на предишно световно първенство.

Микроакустика

Тази нова дисциплина почива на използването на акустичните вълни в прибори за обработка на информация. Поначало с тази



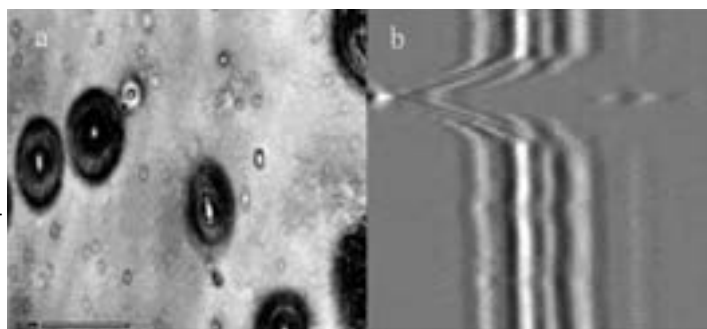
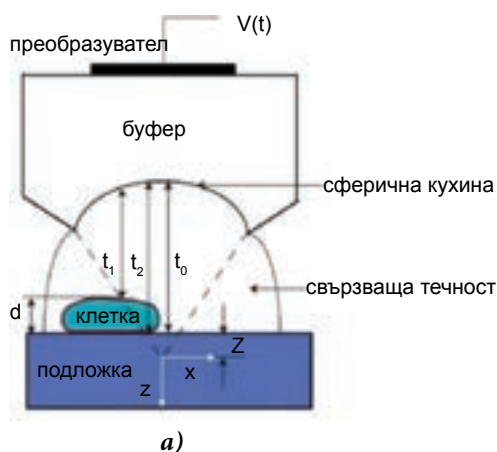
Сензор за наличие на газ на базата на ПАВ резонатор. а) структура; б) честотен отклик при прилагане на различни газове с определени концентрации: Vesseline L. Strashilov, Gergana E. Alexieva, Velitchko N. Velichkov, Ivan D. Avramov and Stephen D. Evans, "STW Resonator With Organo-Functionalized Metallic Nanoparticle Film for Vapor Sensing", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control*, vol. 56, no. 5, May 2009, pp. 1018-1023

проблематика се занимава най-общо микроелектрониката, като според информационния носител тя се подразделя на полупроводникова (с електрони) и вълнова. Вълновата микроелектроника от своя страна бива оптоелектроника (със светлина) и акустоелектроника (с акустични вълни), като в западната литература последната е наричана по-често микроакустика. Тук попадат най-различни прибори главно за аналогова обработка на сигнали като преобразуватели, закъснителни линии, резонатори, филтри. Използват се както обемни акустични вълни, така и такива, които се разпространяват по повърхността на звукопроводите – повърхнинни акустични вълни (ПАВ). Ще илюстрираме тази област с един пример от нашата практика. ПАВ са силно чувствителни към условията на повърхността на подложката, по която се разпространяват. Всяка промяна се отразява върху тяхната скорост и оттам – на честотата на селективно устройство, например резонатор, построено на тяхна основа. Един ПАВ резонатор се възбужда със стандартни насрежно-гребеновидни преобразуватели, като при отстояние между електродите от порядъка на 1 μm резонансната работна честота е около 1 GHz. Нека в активната

зона на резонатора повърхността на подложката, заедно с електродната решетка, е покрита с тънък полимерен слой, който има способността да поглъща обратимо молекулите на газове в прилежащата атмосфера. В резултат на увеличената маса на слоя се понижава резонансната честота, откъдето след калибровка се определя концентрацията на газа. Както се вижда от честотната характеристика, в най-чувствителния случай, този на детекция на оцетна киселина, при концентрация на газа 10920 ppm се регистрира честотно понижение от 140 kHz, което позволява реализацията на разделителна способност на устройството от порядъка на единици ppm. След преустановяване на присъствието на газа погълнатите молекули напускат полимерната матрица и честотата се възстановява, при което сензорът е готов за следващо измерване.

Акустична микроскопия

Както всеки микроскоп, акустичният микроскоп работи чрез фокусировка на излъчени с преобразувател акустични вълни в дадена точка от изследвания обект. Но за разлика от оптичния микроскоп, който предста-



Акустичен микроскоп. а) принцип на действие – игра с акустичните пътища чрез геометрията на звукопровода; б) подповърхностни дефекти в епоксиден слой върху алуминий. Ляво(а) – C-scan; дясно(б) – B-scan. Работна честота 300 MHz: P. Zinin, W. Arnold, W. Eise and S. Berezina, in "Ultrasonic and Electromagnetic NDE for Structure and Material Characterization", CRC Press, 2013, ch. 11

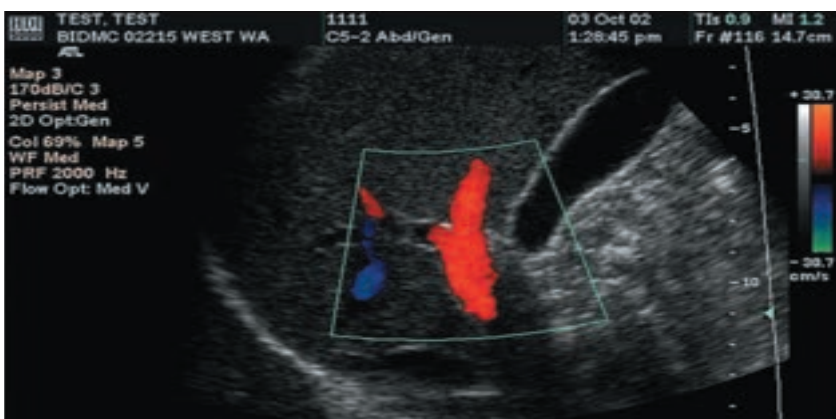
влява система с паралелна обработка, при която всички точки на обекта се виждат едновременно, при акустичния микроскоп се извършва сканиране и точките се визуализират последователно. Сканирането се осъществява механично, с придвижване на обекта или преобразувателя. Ако се сканира по линия, имаме т.нар. В-scan, а при двумерно сканиране в равнина - С-scan. Съществува и възможност за придвижване на фокуса в дълбочина, като чрез комбиниране с другите възможности се постига и тримерно сканиране. Голямото предимство тук е изследването на непрозрачни за светлината образци. За подобряване на ефективността преобразувателният елемент се свързва с обекта с течност (обикновено вода), чийто по-висок акустичен импеданс спрямо въздуха понижава отражението на вълните. При високи честоти разделителната способност е микрони.

Медицински ултразвук

Медицинската ултразвукова диагностика се основава на същия принцип както микроскопията – наблюдение на области от човешкото тяло чрез фокусиране на излъчени в него акустични вълни. Но за разлика от нея, тук преобразувателят представлява матрица от излъчващи елементи, като фокусирането се извършва чрез електронно контролируемо дефазироване между тях. Така, чрез игра с фазите, се осъществява и сканирането. Процесите се наблюдават на живо. В системи с ефекта на Доплер (Doppler) се наблюдава движението на кръвта в съдовете и оттам се реконструира техният профил. Голямото предимство на тези методи е тяхната безопасност за здравето, свързана с ниската честота (около 5 MHz) и малката енергия на акустичните фонони.



4-месечен плод в утробата на майката:
<http://www.livescience.com/38426-ultrasound.html>



Доплерова снимка на портална вена:
http://www.ultrasoundtraining.com.au/sb_cashe/events/id/35/f

Подводна сонография

Идеята за търсене и визуализиране на обекти в моретата и океаните чрез ултразвук принадлежи на Ланжвен (Paul Langevin), който през Първата световна война разработва сонари за търсене на германски подводници. И тук ултразвукът има предимство пред оптичните камери, тъй като позволява изследвания в мътни среди. Една впечатляваща илюстрация на възможностите на тази методика е откриването

и заснемането на потъналия в началото на миналия век „Титаник“. С помощта на робот са сканирани последователно части от кораба. След това снимките са комбинирани и е моделирано цялото изображение. Вижда се пречупеният нос – резултат от трагичния сблъсък с айсберга.

В заключение, мащабните приложения на ултразвуковите технологии в медицината и техниката тепърва ще бележат нови постижения, обогатявайки нашите познания и правейки живота ни по-добър. ■



Реконструиран образ на потъналия „Титаник“: Daily Mail, 21 март 2012 г.