ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКАЯ МИКРОФЛЮИДИКА С МОРФОМЕТРИЧЕСКИМ КОРРЕЛЯЦИИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫМ КОНТРОЛЕМ СРЕДЫ: ОТ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ДО РАДИОЧАСТОТНОЙ ОСЦИЛЛОПОЛЯРОГРАФИИ

© 2018 г. Е.Д. АДАМОВИЧ, О.В. ГРАДОВ, Ф.А. НАСИРОВ

Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН, г. Москва,
Институт химической физики им. Н.Н.Семенова РАН, г. Москва

Введение

Жидкометаллические антенны, разрабатываемые и используемые с середины / третьей четверти XX века, обладают высокими технологическими свойствами, а также диапазонами перестройки и эффективной добротностью, благоприятствующими вводу их в практику не только узко-специализированных «ведомственных» приложений, но и, что очевидно, в исследовательскую и мониторинговую практику широкого назначения – включая радиохимическую физику и радиочастотные методы в медицине. Несмотря на высокий уровень дезинформации и несоответствующих реальности нарративов в этой области среди ИТР и радиолюбителей (начиная с ртутных антенн), зарубежная наука к настоящему времени разработала и внедрила в производство более десятка классов / конструкций соответствующих антенн, способных являться мультиплексированными по анализируемым переменным сенсорами специализированного и кастомизируемого без изменения конструкции назначения. Известны, в частности, реконфигурируемые типы жидкометаллических антенн с перестройкой сигнала, осуществляемой по механизмам электрокапиллярности / электрохимически-варьируемой капиллярности [1], антенны с чувствительностью к редокс-статусу – окислительно-восстановительному потенциалу – среды (отклик путем обратимого формирования оксидной пленки на жидком металле) и изменениям давления [2]. Роль механизма переключения может выполнять металл – без использования специализированных схем подстройки – по физическим и физико-химическим принципам, делающим такое переключение не только закономерным, но и автоматическим [3]. Диапазон перестройки может достигать двух октав [4]. Логичным и естественным продолжением любого жидкостного инструментария, в том числе жидко-металлического антенного, является имплементация его в формате микрофлюидики в рамках микроминиатюризации подобных устройств, активно практикуемой в последние 20-25 лет, начиная от технологий химической сенсорики и заканчивая биомедицинской инженерией. Созданы разные микрофлюидные жидкометаллические широкополосные антенны, в которых изменение конфигурации достигается заполнением микроканалов, бороздок, углублений (питов), в которых содержится и морфологически изменяется – в частности, деформируется под действием поля (или, наоборот – нагнетается для его регистрации) – жидкометаллический проводник [5]. В последнее время архиинтенсивно развивается направление, связанное с пространственной сепарацией ROI / «пикселей» антенны или антенной решетки в целях реконфигурации диаграммы направленности и оптимальных диапазонов антенны [6]. В настоящее время химизм жидкометаллических сред, на которых имплементируются вышеописанные антенны, уже не ограничивается ртутью, но включает в себя многие допустимые по фазовым диаграммам монометаллы и сплавы (в числе последних, например, низковязкие сплавы галлия и индия), которые, в частности, способны к спонтанному и (что является целевой функцией) обратимому формированию оксидных и т.п. пленок, пассивирующих и стабилизирующих геометрию

поверхности металла. Однако перспективу широкомасштабного практического ввода в устройства, работающие при нормальных условиях диаграммы состояния (температур и давлений), имеют только те, которые не требуют для перестройки изменения среды, вплоть до уровня физики высоких температур и давлений. Особо это важно для малых позиционируемых «антенно-пиксельных» систем, указанных выше. Фазовый анализ на плоскости явно указывает, что положение области двухфазного равновесия (то есть – бинодали) и спинодали (которая отделяет область метастабильных состояний / фаз от лабильных неустойчивых; а также является индикатором спинодального распада фаз) могут быть для таких систем определены морфометрически, так как каждой подобной фазе можно сопоставить известную структуру. Как следствие этого, для целей полного контроля эффективности перестройки микрофлюидных антенн с пиксельной или иной, но детерминируемой физикой жидкометаллической капли или капиллярной структурой / геометрией флюидного чипа, рационально совместить анализ радиоизмерительным и морфометрическим оборудованием в ходе перестройки частот и «директограмм» (или, что тождественно, диаграмм направленности). Учитывая возможность имплементации оптических методов детектирования (на подлежащем микрофлюидной геометрии чипа позиционно-чувствительном сенсоре) на чипе, в том числе – содержащем монометалл или сплав, транслирующий в бороздках чипа, рационально измерять их локализацию и фазовую колокализацию на контактном чипе и оценивать оптимальность топологии той или иной формы жидкометаллических структур и образующихся на них (или в контакте с ними) фаз в радиофизическом аспекте. Соотнося по базе данных оптимальные типы (опорные стандарты) и эффективные геометрии антеннирующих жидкометаллических / сплавных структур и измеряемых радиофизических свойств, можно оптимизировать (в универсальной форме – для всех возможных и рациональных диаграмм состояния или для любого химизма антенны) последние непосредственно в процессе использования, *in situ*, в реальном времени, пользуясь данными морфометрии как «обратной связью».

Цель работы

Для решения данной задачи были проведены тестовые исследования на самых элементарных жидкометаллических капельных и Hg-матричных (Hg-array) структурах с наиболее релевантными геометриями регулярных и сингулярных единиц. В частности, ряд геометрий был заимствован из полярографии и электрохимических методов сбора данных о веществе, а также – из физико-химических методов эксперимента. Благодаря этому, а также в связи с апеллированием к проблеме из первых принципов (ab initio), а не к технологиям решения конкретной радиотехнической задачи, мы смогли поставить цель работы, обеспечивающую диверсификацию результатов не только в радиофизике как таковой, но и в методы электроаналитической химии, биоэлектрохимии, медицины и т.д. Целью работы являлся скрининг возможных решений и их применимости ко всем возможным приложениям в данных областях. Радио-морфометрическая гибридизация, являясь подходом к решению как прямых, так и обратных задач, позволяет находить в базе данных не только оптимальные геометрии для определенных радиотехнических / трансляционных задач, но и находить оптимальные области применимости для каких-либо отдельных геометрий расположения жидкометаллической антенны на сенсоре.

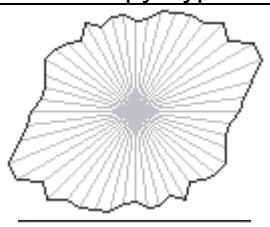
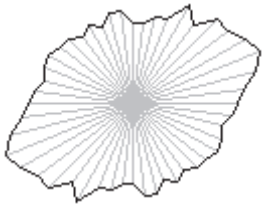
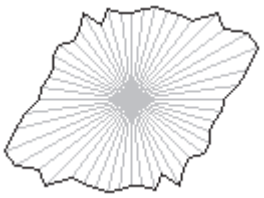
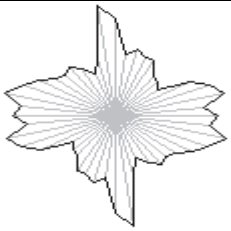
В таблице представлены результаты модельных морфометрических измерений (корреляционно-спектрального анализа) в перекрывающихся квадрантах на различных жидкометаллических антенно-капельных структурах-прототипах:

1. MDA (Mercury Drop Array): псевдорегулярный массив капель с отличающимся размером и ориентацией.
2. MDFTWD (Mercury Drop Floating on a Tap Water Drop): одиночная капля ртути, интродуцированная в капле воды или иной жидкости с подобными свойствами.
3. DME (Dropping Mercury Electrode): ртутно-капельный электрод и аналогичная структура в методе висячей капли – Hanging Mercury Drop Electrode (HMDE / HDME).
4. MSD (Mercury Sessile Drop): стандартная геометрия в методе измерения угла

смачивания / краевого угла.

5. SMFS (Super MercuryPhobic Surfaces): кадр с крайне малым контактом капли с поверхностью (аналогично супергидрофобным поверхностям) и большим углом меж ними.

Можно видеть, что для различных указанных структур они качественно отличны, что создает предпосылки для использования их в различных качествах. Определенно, механизмы действия решеток и матричных структур (верхний ряд таблицы) отличны от действия одиночных жидкометаллических структур (которые могут использоваться как единицы для построения первых). В силу ограниченности объёма мы не приводим тут полной расшифровки каждого из приведенных графиков, однако они введены нами для последующих исследований в базу данных “LIQ_MET_KSA” (ИНЭПХФ), создающуюся д.с.п. для последующих разработок в этой области. Если таковые будут продолжены (в настоящее время работы в этой области временно заморожены в силу реорганизации, сопровождающейся отсутствием штатных единиц), мы намерены опубликовать данные и довести полную БД с дружественным интерфейсом GUI до публикации в сети (с DOI) в открытом доступе в ближайшие годы.

Класс структур в базе данных: квазирегулярный массив жидкометаллических единиц.			
 Среднее = 84,55 Дисперсия = 5739,74 Ср.кв.откл = 75,76 Ассиметрия = 0,5 Эксцесс = -1,15 Максимум = 255	 Среднее = 89,58 Дисперсия = 6125,6 Ср.кв.откл = 78,27 Ассиметрия = 0,5 Эксцесс = -1,09 Максимум = 255	 Среднее = 101,06 Дисперсия = 6598,69 Ср.кв.откл = 81,23 Ассиметрия = 0,34 Эксцесс = -1,28 Максимум = 255	 Среднее = 88,32 Дисперсия = 6595,88 Ср.кв.откл = 81,22 Ассиметрия = 0,51 Эксцесс = -1,17 Максимум = 255
Mercury Drop Array 1 квадрант (MDA-1)	Mercury Drop Array 2 квадрант (MDA-2)	Mercury Drop Array 3 квадрант (MDA-3)	Mercury Drop Array 4 квадрант (MDA-4)
Класс структур в базе данных: единичные ориентированные к поверхности единицы, в том числе – специфически взаимодействующие с поверхностью.			
 Среднее = 132,07 Дисперсия = 407,99 Ср.кв.откл = 20,2 Ассиметрия = -2,16 Эксцесс = 9,91 Максимум = 231	 Среднее = 23,29 Дисперсия = 1782,93 Ср.кв.откл = 42,22 Ассиметрия = 2,74 Эксцесс = 8,49 Максимум = 255	 Среднее = 103,71 Дисперсия = 2545,55 Ср.кв.откл = 50,45 Ассиметрия = -0,43 Эксцесс = -1,18 Максимум = 194	 Среднее = 67 Дисперсия = 2873,83 Ср.кв.откл = 53,61 Ассиметрия = 0,79 Эксцесс = 0,11 Максимум = 252,67
MDFTWD. Точное центрирование ROI.	DME. Геометрия ROI ортогональная.	MSD. Геометрия ROI ортогональная.	SMFS. Геометрия ROI ортогональная.

Заключение

Таким образом, становится возможным интеграция ряда методов в одной схеме с жидкометаллической морфометрически контролируемой антенной, в том числе таких экзотических, как:

I. Оптически-опосредованная позиционно-чувствительная термометрия на основе жидкометаллических носителей (ртуть; галинстан или, что тождественно, ингас) на микрофлюидном чипе.
II. Реакционно-диффузионная полярографическая микрофлюидика на активной Hg поверхности, управляемой полем.
III. Антенные измерения краевого угла смачиваемости и электрокапиллярности для определения физико-химической реактивности во внешнем поле.
IV. «Микрогидродинамические актуаторы» и жидкометаллические микрокапельные устройства, в том числе – основанные на технологии антенной радиочастотной манипуляции на висячей капле переменного объёма и поверхностного химизма.
V. Основанные на фазовых переходах и формировании оксидной пленки методы и технологии, связанные с формированием или изменением параметров двойного электрического слоя на капле.
VI. Позиционно-чувствительная радиочастотная, в том числе – стробоскопическая, с усреднением и накоплением, радиочастотная осциллополярография на чипе.
VII. Высокочастотные сверхвысокочастотные (микроволновые) энтракометрические измерения на чипе с жидкометаллической каплей.
и т.д.

Нашей геометрической моделью предусматривается и предсказывается более, чем полторы сотни возможных устройств подобного «антенного жидкометаллического» характера, обеспечивающих, благодаря комбинированию переменных, в соответствии с ТРИЗ, методы как прямого, так и обратного действия, с различным приоритетом (как морфометрическим, так и радиофизическим) и разными петлями обратной связи. Нами в базе данных “LIQ_MET_KSA” обеспечена возможность прямой комбинаторики петель обратной связи с отсылкой к редуцированным (для данных приборов) таблицам АРИЗ / ТРИЗ.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ 16-32-00914 (в 2016-2017 гг).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wang M.*, *Trlica C.*, *Khan M.R.*, *Dickey M.D.*, *Adams J.J.* A reconfigurable liquid metal antenna driven by electrochemically controlled capillarity // Journal of Applied Physics. – 2015. v. 117. №. 19. p. 194901-1-194901-5.
2. *Rashed Khan M.*, *Hayes G.J.*, *So J.H.*, *Lazzi G.*, *Dickey M.D.* A frequency shifting liquid metal antenna with pressure responsiveness // Applied Physics Letters. – 2011. v. 99. №. 1. p. 013501-1-013501-3.
3. *Kelley M.*, *Koo C.*, *McQuilken H.*, *Lawrence B.*, *Li S.*, *Han A.*, *Huff G.* Frequency reconfigurable patch antenna using liquid metal as switching mechanism // Electronics Letters. – 2013. v. 49. №. 22. p. 1370-1371.
4. *Morishita A.M.*, *Kitamura C.K.Y.*, *Ohta A.T.*, *Shiroma W.A.* Two-octave tunable liquid-metal monopole antenna // Electronics Letters. – 2014. v. 50. №. 1. p. 19-20.
5. *Dey A.*, *Guldiken R.*, *Mumcu G.* Microfluidically reconfigured wideband frequency-tunable liquid-metal monopole antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2016. v. 64. №. 6. p. 2572-2576.
6. *Sarabia K.J.*, *Yamada S.S.*, *Moorefield M.R.*, *Combs A.W.*, *Ohta A.T.*, *Shiroma W.A.* Frequency-Reconfigurable Dipole Antenna Using Liquid-Metal Pixels // International Journal of Antennas and Propagation. – 2018. (in press).