

**ЭНТРАКОМЕТРИЧЕСКИЕ ЛАБОРАТОРИИ НА ЧИПЕ.
ГИБРИДНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ**

© 2016 г. О.В. ГРАДОВ, Е.Д. АДАМОВИЧ, Д.А. ШЕВЧЕНКО*

Институт энергетических проблем химической физики РАН им. В.Л. Тальрозе, г. Москва,
*НИИ молекулярной электроники, г. Зеленоград
e-mail: gradov@chph.ras.ru, gradov@center.chph.ras.ru

Энтракометрические чипы, принцип действия которых, также как и принцип действия пленочных болометров, основан на изменении сопротивления металлической пленки под действием нагревания (СВЧ-мощностью), можно интерпретировать как пленочные, точнее гибридно-пленочные интегральные схемы. Рельеф поверхности («коллардовский меандр» – в радиотехнич. жарг.) формируется, также как и у пленочных интегральных схем, путем итеративного нанесения на подложку металлических пленок (золота, платины – в случаях воспроизведения классической конструкции электрометра-электроскопа с золотым листом и энтракометра Колларда, соответственно [1,2]). В обычных условиях энтракометрических измерений – любыми свойствами нанесенного слоя, кроме участвующих в детектировании (как поглощенной мощности, измеряемой также, как и в случае использования обычных – болометрических измерителей мощности, так и соотношения между поглощенной частью мощности и проходящей, так как энтракометр классически считается измерителем прежде всего проходящей СВЧ мощности), можно пренебречь, поскольку никаких иных операций над входящим СВЧ-сигналом энтракометр не осуществляет и, по эквивалентной схеме, не коммутирует с другими устройствами, изменяющими характер отклика. В нашем случае – при внедрении энтракометра как элемента микрофлюидной каталитической системы с собственными электрохимическими характеристиками, изменяющими характер болометра или энтракометра, с которым вещество взаимодействует как с электродом, пренебрегать этим нельзя, поскольку каждой электрохимической конфигурации с известной частотной и импедансной характеристикой соответствует своя эквивалентная схема. Для напыленных пленочных энтракометров это было продемонстрировано с использованием анализатора частотного отклика (типа FRA) с анализатором эквивалентных схем (типа DCS), хотя и не на СВЧ-частотах, в силу недоступности дорогостоящих комбинированных анализаторов – типа E5061B-3L5 (в опции 005), позволяющих производить анализ импеданса в диапазоне до 3 ГГц с анализом эквивалентных схем. Поэтому, в отличие от энтракометра как датчика в обычных мостовых схемах, энтракометр как активный элемент в контакте с системами с двойным электрическим слоем, рассматриваемым как конденсатор, и «электрохимической нагрузкой» в форме систем, демонстрирующих различные результаты EIS (спектроскопии электрохимического импеданса), необходимо требует учета эквивалентных схем данных структур, как бы включающихся в схему микросборки на этапе её функционирования.

Теоретический анализ и конструирование микросборок микроволнового диапазона, в том числе – нестандартных, в быв. СССР с 1976 года регламентируются ОСТ 4Г0.010.201 (в ред. 1-75, зам. ОСТ 4Г0.010.018) «Микросборки СВЧ-диапазона. Конструирование». По теме разработки аналоговых интегральных СВЧ и согласующих устройств гибридных СВЧ схем выпущено достаточно много литературы на английском, немецком и русском языках. Мы исходили из наиболее доступных советских изданий [3,4], одновременно принимая во внимание, что энтракометр с наслоениями электро-

химической природы рассматривается не как планарная пленочная конструкция с элементарной эквивалентной схемой, а только как объёмная интегральная схема СВЧ с неоднородностями и элементами типа «сэндвич» [5] (более подробный библиографический обзор не позволяет сделать объём тезисов – он запланирован с одной из следующих публикаций). Энтракометр как ослабитель мощности не может быть источником точных данных об измерении поглощенной части мощности, но требует учета части мощности, поглощенной слоями на его поверхности или в контурах, в случае наличия которых следует учитывать их в любых измерениях по данным затухания. При этом компенсирующим фактором является «самосогласованность» погрешностей, то есть тот факт, что погрешность измерения затухания при градуировке прибора методами, связанными с измерением затухания, становится его систематической погрешностью. При расположении микрофлюидного энтракометрического чипа в плоскости, нормальной к оси волновода, последний шунтирует волновод активным сопротивлением, приближенным к волновому сопротивлению, благодаря чему обеспечивается хорошее согласование чипа, но в анализе наблюдаемых явлений следует учитывать среду, находящуюся на чипе. Это, в частности, требует учета температурного градиента, связанного с перераспределением плотности поглощаемой мощности в соответствии с химическим составом или структурой исследуемого вещества, а также различием в амплитуде электромагнитной волны в зонах нагрева энтракометра и находящегося на нем вещества (это можно отчасти рассчитать в различных пакетах; для «голового» энтракометра – в HFSS; в частных случаях топологии, на которых нами были получены нестандартные эффекты по корреляции физико-химических эффектов и диаграмм направленности, как полосковых линий; см., напр.: ГОСТ 21702-76). О факте влияния распределения амплитуд и диаграмм направленности на энтракометр в чипе и находящуюся на нем химическую систему может говорить, в частности, различный (но коррелирующий с направленностью волн) характер структур при СВЧ-индуцированной самоорганизации (впервые наблюдавшийся, но интерпретированный слишком широко, не коррелировано с угловыми характеристиками, с некоторыми ошибками в интерпретации и привязке данных к форме мод в 2009-2012 гг. [6]), а также эффект воздействия диаграммы направленности на эффективность сверхвысокочастотного термического анализа многих анизотропно-гетерогенных структур на чипе [7]. Другими критериями СВЧ-индуцированной самоорганизации на чипе являются коэффициент стоячей волны и коэффициент бегущей волны, а также коэффициент затухания [8], которые также влияют на температуру среды, пространственно модулируя амплитуду волны, определяющую передаваемый в систему / среду нагрев (мощность в конкретных точках измерений).

Для установления соответствия теплофизической эффективности нагрева среды (за счет поглощаемой мощности) и физических параметров магнетрона, с помощью которого в первичных опытах были реализованы эффекты СВЧ-индуцированной самоорганизации, создан пульт-монитор данных параметров с выводом на многоканальный АЦП, где пульт содержит: киловольтметр (так как вторичная обмотка высоковольтного трансформатора, как и схема удвоения напряжения на высоковольтном конденсаторе, создает «киловольтные» напряжения для питания анода магнетрона; в некоторых случаях – ≈ 4 кВ), термометр (от 300°C до 900°C – для случаев СВЧ-плавки и применения BSD-подобных технологий {Black Solar Dom, LG} обработки частично-упорядоченных сред), миллиамперметр (поскольку ток анода составляет ≈ 300 мА), децибелметр (для анализа затуханий в специальных случаях [8]). Помимо стрелочных индикаторов, обладающих инерционностью, на панель выведены кнопки (в ранней версии – тумблеры), с помощью которых осуществляется подача сигнала на АЦП.

В настоящее время ведутся разработки электрохимического / СВЧ-фотохимического [9] (в силу аналогии между СВЧ-фотохимией / оптоэлектроникой с СВЧ-электрохимической индукцией в процессах самоорганизации на чипе, и фотохимией / оптоэлектроникой UV-NIR-диапазонов в реакционно-диффузионных процессах на чипах с возбуждением источниками данных диапазонов [10]) анализатора, позволяющего, помимо EIS-анализа и СВЧ-измерений, количественную характеристику са-

моорганизации в СВЧ-поле рядом комплементарных дескрипторов, взаимно-однозначно сопоставляя их пулы с результатами процессов самоорганизации на чипе; в идеальном случае – с позиционной чувствительностью, учитывая реакционно-диффузионный характер самоорганизации.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-32-00914.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Collard J.* The gold-leaf electroscope and the Enthrakometer // Journal of the Institution of Electrical Engineers {Part IIIA: Radiolocation}. – 1946, v. 93, № 1, p. 209-211.
2. *Collard J.* The Enthrakometer, an instrument for the measurement of power in rectangular wave guides // Journal of the Institution of Electrical Engineers {Part IIIA: Radiolocation}. – 1946, v. 93, № 9, p. 1399-1402.
3. *Данилин В.Н., Кушниренко А.И., Петров Г.В.* Аналоговые полупроводниковые интегральных схемы СВЧ / М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.
4. *Арофеев В.И., Привалов В.Н., Яшин А.А.* Согласующие устройств гибридных и полупроводниковых интегральных СВЧ схем / Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
5. *Гвоздев В.И., Нефёдов Е.И.* Объёмные интегральные схемы СВЧ / М.: Наука, 1985. – 256 с.
6. *Градов О.В., Градова М.А.* Автоволновые измерения при СВЧ-индуцированной самоорганизации структур // Тр. Всероссийской научно-технической конференции «Микроэлектроника СВЧ», 4-12 июня 2012, СПб. – СПб, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012, с. 371-376.
7. *Градов О.В.* Применение угловых дескрипторов и диаграмм направленности в высокочастотном и сверхвысокочастотном термическом анализе анизотропно-гетерогенных структур на чипе // Сб. Конференция по термическому анализу и калориметрии (RTAC-2016), 19-23 сентября 2016. – СПб., СПбГТУ, 2016.
8. *Gradov O.V.* In situ tunable laser diode spectroscopy of the processes and products of the microwave-induced self-organization in the soft mater active media // 2nd International Conference and Exhibition on Mesoscopic and Condensed Matter Physics, 26-28 Oct. 2016. Chicago, Illinois. – Chicago, Illinois, 2016 (in press).
9. *Čírkva V., Relich S.* Microwave photochemistry. Applications in organic synthesis // Mini-Reviews in Organic Chemistry. – 2011, v. 8, № 3, p. 282-293.
10. *Gradov O.V., Gradova M.A.* Reaction-diffusion optoelectronics based on dispersed semiconductors // Journal of Physics: Conference Series. – 2015, v. 643, p. 012072-1 – 012072-4.