

**ЭНТРАКОМЕТРИЧЕСКИЕ ЛАБОРАТОРИИ НА ЧИПЕ. ИДЕОЛОГИИ  
"MICROWAVE LAB-ON-A-TUBE" ИЛИ "LAB-ON-A-VALVE"**

© 2016 г. О.В. ГРАДОВ, 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

В [1] рассмотрены принципы построения «лабораторий на чипе» для физико-химических исследований в СВЧ-диапазоне, сочетающие в себе как стандартные методы измерений (измерения проходящей и поглощаемой СВЧ-мощности), так и возможности использования в «экзотических» направлениях: сверхвысокочастотная хематроника, магнитные измерения в СВЧ-поле, осциллополярография с использованием стробоскопических осциллографов (в диапазоне до десятков ГГц), методики селективного каталитического анализа на платиновых энтракометрах, фазовый анализ, измерения передаточных функций сложных физико-химических систем и структур в СВЧ-диапазоне в динамике (непосредственно в ходе реакций или процессов *in situ* с привязкой измерений в СВЧ-области к регистрограммам данных процессов по другим переменным) и т.д. Однако не были освещены аспекты возбуждения и подачи излучения на энтракометрический чип. Целью настоящей работы и постера является прицельное рассмотрение данных вопросов с приведением экспериментальных данных по перспективам подобной реализации, в том числе – в нестандартных модификациях, объединяющих в себе возбуждающий элемент и детектирующий элемент схемы в едином устройстве. В постере приводятся фотографии подобных устройств.

Основными источниками СВЧ-излучения в исследовательской практике быв. СССР, судя по библиографическому анализу, продолжают являться электровакуумные приборы – магнетроны, клистроны и лампы бегущей и обратной волны (последние также известны как карсинотроны или карцинотроны). Теоретически, лазеры на свободных электронах или их прототипы, к числу которых относятся убитроны, дающие возможность манипулировать частотами от 3 ГГц до 60 ГГц, также являются источниками СВЧ-излучения приемлемого в энтракометрии диапазона (в отличие от современных лазеров на свободных электронах, в которых целевым зачастую является терагерцовый диапазон; например – от 5 мкм, т.е.  $\approx 60$  ТГц, до 270 мкм, т.е.  $\approx 1$  ТГц, у лазера на свободных электронах), однако их размеры не оптимальны для тестирования с энтракометрическими чипами, равно как и размеры ряда карсинотронов специального применения (например – карсинотрона МРТИ РАН с радиопрозрачным окном вывода СВЧ излучения в атмосферу). Кроме того, доступность лазеров на свободных электронах и их аналогов, перечисленных в [2] (гиротронов, физически являющихся мазерами на циклотронном резонансе; стандартных убитронов на излучении электронов в периодических статических полях, роль системы накачки в которых выполняет периодическая магнитная система, что не только возбуждает, но и служит для радиальной фокусировки пучка; строфотронов, что позволяют реализовывать, в релятивистском случае, колебания электронного пучка как в электростатической, так и в магнитостатической потенциальной яме; скаттронов, которые можно рассматривать как комптоновские лазеры на свободных электронах, использующие рассеяние волн потоками релятивистских электронов; флимастроны, принцип реализации которых основан на эффекте Смита-Парселла, реализующемся при прохождении частицы вблизи поверхности пе-

риодической металлической структуры) ограничена, а габаритные размеры не позволяют использовать их в качестве приборов прикладного назначения для рутинных исследований в неспециализированных лабораториях. Данные обстоятельства, сужающие спектр возможных источников для прикладной энтракометрии и каталиметрии с использованием энтракометров с активной поверхностью в СВЧ-диапазоне, что очевидно, требуют разработки качественно новых подходов к реализации компактных установок для энтракометрической каталиметрии. Классический коллардовский энтракометр [3, 4], равно как и модификация Хинтона-Берри [5], являются компактными устройствами, для которых требуется столь же компактная схема возбуждения.

Предлагается подход, объединяющий источник возбуждения лаборатории на чипе и лабораторию на чипе в едином устройстве, причем калибровка энтракометра-чипа и источника осуществляются согласованно, электровакуумный или газоразрядный прибор СВЧ является одновременно элементом возбуждения и измерительной части установки, в частности – аналитической активной поверхностью с установленным энтракометром. Этот подход, основанный на расширенном толковании зарубежных технологий «lab-on-a-valve» и «lab-on-a-tube» [6, 7] и [8-12], применяющихся для биохимической и молекулярной диагностики, а также физиологических измерений. Ранее интерпретацией измерительных систем на стеклянных электродных трубках – хемотронах как лабораторий на трубке, аналогов лабораторий на чипе был придан новый импульс йодометрии на чипе, внедряемой в приборостроение для нужд зоотехнии [13]. Аналогичный системотехнически подход рассматривается в постере настоящего доклада. На основе ранних представлений о возможности визуализации тепловых полей и распределений активных форм кислорода, в том числе – возникающих в каталитических процессах [14-18], возможна визуализация в описываемой установке не только хемометрических, но и каталиметрических «паттернов» распределений на энтракометре [19] (при различных типах возбуждения). Карсинотронное (лампой обратной волны), магнетронное и клистронное возбуждение имеют специфику по эффектам, возбуждаемым в «каталиметрируемой» системе. Например, при магнетронном возбуждении СВЧ-индуцируемой самоорганизации на энтракометрическом чипе [20,21] на средах с частицами, обладающими магнитным откликом, в частности, железосодержащих [22], следует учитывать воздействие магнитного поля на формирование структур, в связи с чем становится релевантным анализ ориентационных механизмов самоорганизации тех или иных анизотропных структур в магнитных полях. Компактность лабораторий в корпусе (lab-in-a-box) [23,24], интегрируемых и комплексируемых на основе сверхвысокочастотных лабораторий на трубке и энтракометрических лабораторий на чипе [1] обеспечивает для пользователя не только возможность проведения стандартных энтракометрических и/или каталиметрических измерений в СВЧ-поле, но и интегрировать в тракт комплементарные типы сенсоров, обеспечивающие дополнительную информацию о происходящих на чипе и анализируемых на энтракометре процессах. В частности, возможна интеграция в систему возможностей лазерной спектроскопии (TDLS, в частности, TDLAS на основе вертикально-излучающих лазеров, VSCSEL, либо DFB-лазеров с распределённой обратной связью) [25]. Однако их применимость ограничена каталиметрируемыми процессами, в которых какой-либо из продуктов или реакционных агентов находится в газовой фазе (аналогично – для большинства методов внутривибрационной спектроскопии типа CRDS/CRLAS, NICE-OHMS и пр.). Концепты и технологии контроля СВЧ-индуцированной самоорганизации на чипах с использованием газовой лазерной спектроскопии в качестве комплементарного метода, с кинетических позиций, являются также новым средством анализа в СВЧ-фотохимии [26].

Работа поддержана грантом РФФИ 16-32-00914.  
Авторы выражают благодарность рязанским и петербургским коллегам за конструктивные обсуждения и консультации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Градов О.В., Шевченко Д.А. Энтракометрические лаборатории на чипе и энтрако-

- метрическая каталиметрия на чипах: осциллополярнографические и модуляционно-полярнографические исследования в СВЧ-поле. Часть 1-4: Обоснование конструкции // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2016, т. 2, № 2, с. 42–58.
2. *Bratman V.L., Ginzburg N.S., Petelin M.I.* Common properties of free electron lasers // Optics Communications. – 1979, v. 30, № 3, p. 409-412.
  3. *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.
  4. *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.
  5. *Hinton L.J.T., Burry, L.F.* An enthakometer for the band 26.0-40 Gc/s // EMI Electronics Ltd., Document CP 198, 1959.
  6. *Miró M., Hansen E.H.* Recent advances and future prospects of mesofluidic lab-on-a-valve platforms in analytical sciences--a critical review // Anal. Chim. Acta. – 2012, v. 750, p. 3-15.
  7. *Miró M., Hansen E.H.* Miniaturization of environmental chemical assays in flowing systems: the lab-on-a-valve approach vis-à-vis lab-on-a-chip microfluidic devices // Anal. Chim. Acta. – 2007, v. 600, p. 46-57.
  8. *Li C., Wu P.M., Jung W., Ahn C.H., Shutter L.A., Narayan R.K.* A novel lab-on-a-tube for multimodality neuromonitoring of patients with traumatic brain injury (TBI) // Lab Chip. – 2009, v. 9, № 14, p. 1988-1990.
  9. *Williams J.* Cutting Edge: A novel lab-on-a-tube for multimodality neuromonitoring of patients with traumatic brain injury (TBI) // Lab Chip. – 2009, v. 9, № 14, p. 1987.
  10. *Li C., Shutter L.A., Wu P.M., Ahn C.H., Narayan R.K.* Potential of a simple lab-on-a-tube for point-of-care measurements of multiple analytes // Lab Chip. – 2010, v. 10, № 11, p. 1476-1479.
  11. *Li C., Wu P.M., Hartings J.A., Wu Z., Cheyuo C., Wang P., LeDoux D., Shutter L.A., Ramaswamy B.R., Ahn C.H., Narayan R.K.* Micromachined lab-on-a-tube sensors for simultaneous brain temperature and cerebral blood flow measurements // Biomed. Microdev. – 2012, v. 14, № 4, p. 759-768.
  12. *Yang Z., Zhang Y., Itoh T., Maeda R.* A novel MEMS compatible lab-on-a-tube technology // Lab Chip. – 2014, v. 14, № 24, p. 4604-4608.
  13. *Градов О.В.* Мультифункциональные лаборатории на чипе и йодометрия (д.с.п.) // Раздаточный препринт с презентацией Круглого стола по внедрению органического йода в питание сельскохозяйственных животных (27.11.14). – М.: ИНБИОТЕХ, 2014, 32 с.
  14. *Panov G.I., Dubkov K.A., Starokon E.V.* Active oxygen in selective oxidation catalysis // Catalysis today. – 2006, v. 117, № 1, p. 148-155.
  15. *Kobayashi M., Kobayashi H.* Application of transient response method to the study of heterogeneous catalysis: I. Nature of catalytically active oxygen on manganese dioxide for the oxidation of carbon monoxide at low temperatures // Journal of Catalysis. – 1972, v. 27, № 1, p. 100-107.
  16. *Christoskova S., Stoyanova M., Vasilev D.* Active oxygen in oxide catalytic systems for environmental catalysis // Monatshefte für Chemie (Chemical Monthly). – 2006, v. 137, № 8, p. 1043-1051.
  17. *Yang G., Guan J., Zhou L., Liu X., Han X., Bao X.* First-principle studies on the exceptionally active triplet oxygen species in microporous zeolite materials: Reservation and catalysis // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. – 2009, v. 202, № 2, p. 122-127.
  18. *Takahashi E., Kamata K., Kikukawa Y., Sato S., Suzuki K., Yamaguchi K., Mizuno N.* Synthesis and oxidation catalysis of a Ti-substituted phosphotungstate, and identification of the active oxygen species // Catalysis Science & Technology. – 2015, v. 5, № 10, p. 4778-4789.
  19. *Градов О.В., Градова М.А.* Система для микроскопической диагностики и картирования цитофизиологического воздействия синглетного кислорода и других активных

- форм кислорода (АФК), вырабатываемых при сверхвысокочастотном воздействии на живые ткани // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2016, т. 2, № 2, с. 203-207.
20. 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.
  21. Градов О.В., Градова М.А. Многофакторный характер отклика частично упорядоченных сред различной дисперсности на СВЧ-облучение в процессе самоорганизации // ФИЗИКА СПб (Тез. конф.) / сер.: Приборы и материалы ТГц и СВЧ диапазона, 26-29 октября 2015 г., СПб. – СПб, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2015, с. 212-213, 394.
  22. Градов О.В., Градова М.А. СВЧ-индуцированная самоорганизация в насыщенных растворах солей Fe(III) и коллоидных суспензиях // Тез. IV Международн. Конфер. "Супрамолекулярные системы на поверхности раздела", 21 - 25 сентября 2015 г. – М., ИФХЭ РАН, 2015, с. 78.
  23. Coates J. The Lab in a Box, or the Evolving Laboratory // RTM – 2007, v. 50, № 5, p. 3.
  24. Weibel N., Rick S., Emmenegger C., Ashfaq S., Calvitti A., Agha Z. LAB-IN-A-BOX: semi-automatic tracking of activity in the medical office // PUC. – 2015, v. 19, № 2, p. 317-334.
  25. 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).
  26. Církva V., Relich S. Microwave photochemistry. Applications in organic synthesis // Mini-Reviews in Organic Chemistry. – 2011, v. 8, № 3, p. 282-293.