

01; 07; 12

© 1992

НАБЛЮДЕНИЕ НОВОГО ТИПА ТЕПЛОЙ
САМООРГАНИЗАЦИИ В ТУГОПЛАВКИХ ОКСИДАХ
ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАННОМ СВЕТОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Т.П. С а л и х о в, В.В. К а н

В системах, далеких от состояния термодинамического равновесия, могут возникать макроскопические явления самоорганизации, суть которых заключается в том, что на простое внешнее воздействие система отвечает сложным образом. Реакция Белоусова-Жаботинского, ячейки Бенара, кооперативные эффекты в оптике, морфогенез в биологии – все это далеко не полный перечень проявлений самоорганизации. На сегодняшний день все наблюдаемые явления самоорганизации делят на три формы [1]: временная, пространственная и пространственно-временная. В данной работе экспериментально обнаружена новая форма самоорганизации, принципиально отличающаяся от трех перечисленных форм.

Как отмечено в работе [2], понятие эволюции является очень общим. Вместо привычной эволюции к равновесному или к стационарному состояниям рассмотрим эволюцию как образование последовательности новых структур. В этом случае смена структур происходит благодаря изменению параметров системы, называемых управляющими. Если считать изменение управляющих параметров достаточно медленным, таким, что в каждом промежуточном состоянии достигается стационарный режим, то можно говорить об эволюции стационарных состояний в пространстве управляющих параметров. Тогда справедлива S -теорема Ю.Л. Климонтовича, суть которой заключается в том, что энтропия каждого нового состояния меньше энтропии предыдущего состояния при росте величины управляющего параметра системы. Так, согласно S -теореме, стационарное турбулентное течение является более высокоорганизованным, более упорядоченным, чем ламинарное [2].

В нашем эксперименте плоский образец, находящийся в фокусе оптической печи, подвергается одностороннему нагреву с помощью концентрированного света, другая сторона образца лежит на водоохлаждаемой подложке. Таким образом, образец находится в сильно неравновесных условиях. Величину отклонения от состояния термодинамического равновесия можно менять, изменяя мощность падающего лучистого потока и тем самым увеличивая температуру облучаемой стороны образца. При этом с помощью диффузной полихроматической подсветки нагретой поверхности образца измеряется полусферически-направленный коэффициент отражения в спектральном диапазоне 2–8 мкм. В случае диффузного освещения поверх-

ности образца, согласно свойству взаимности Гельмгольца [3] полусферически-направленный коэффициент отражения равен направленно-полусферическому. Измерение указанных коэффициентов отражения производится в стационарном режиме, в условиях сильной неравновесности, обусловленной односторонним нагревом образца мощным лучистым потоком. Изменив мощность падающего потока и тем самым увеличив степень неравновесности, при достижении стационарного состояния мы вновь проводим измерения спектральных коэффициентов отражения. Таким образом, проведя целый ряд подобных измерений, мы попадаем в пространство управляющих параметров, в качестве которых можно принять либо мощность падающего лучистого потока, либо температуру облучаемой поверхности образца. Ввиду того, что мощность падающего лучистого потока неоднозначно характеризует поглощенную телом энергию (из-за температурной зависимости оптических свойств поверхности) более удобным управляющим параметром является температура облучаемой поверхности образца.

Яркостная температура облучаемой поверхности T_r измерялась в момент кратковременного перекрытия (~ 20 мс) греющего потока. Переход к истинной температуре T осуществлялся с помощью формулы

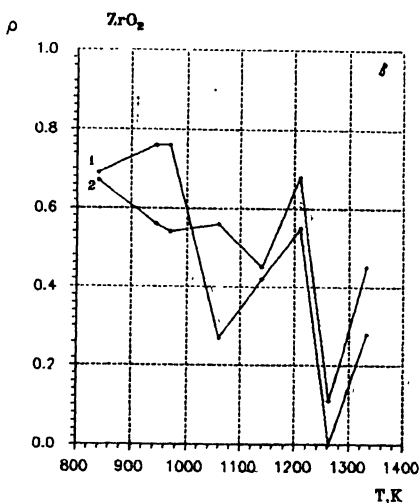
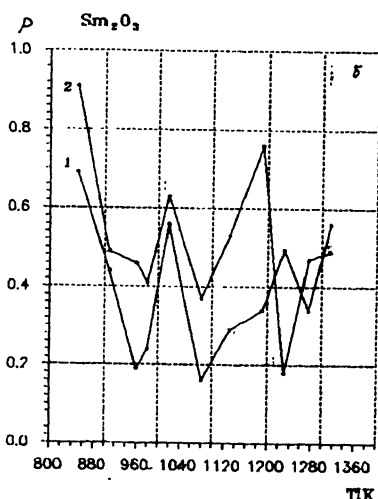
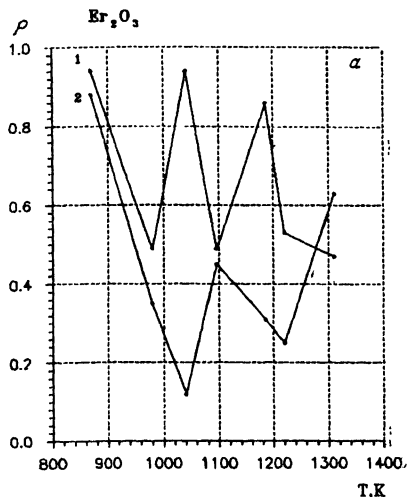
$$T^{-1} - T_r^{-1} = C_2^{-1} \cdot \lambda \cdot \ln [1 - \rho_\lambda(\theta, \psi, 2\pi, T)], \quad (1)$$

справедливой для непрозрачной поверхности. Здесь λ - длина волны; $\rho_\lambda(\theta, \psi, 2\pi, T)$ - спектральный направленно-полусферический коэффициент отражения.

На рисунке представлены результаты измерения направленно-полусферического коэффициента отражения некоторых тугоплавких оксидов в условиях сильной неравновесности. Мы получили периодическую зависимость коэффициента отражения от температуры облучаемой поверхности. Это означает, что увеличивая степень неравновесности, мы получаем сложное поведение системы, выраженное в периодической зависимости коэффициента отражения от управляющего параметра. Следовательно, в пространстве управляющих параметров в ответ на простое внешнее воздействие система проявляет периодическую реакцию, т.е. наблюдается новая форма самоорганизации. Предлагается следующее объяснение обнаруженному явлению. Пусть монохроматическое поглощение света образцом обусловлено резонансным взаимодействием между падающим потоком и двухуровневой системой. Причем считается, что заселенность верхнего уровня не может быть выше некоторого порогового значения (как в лазерной системе). Тогда можно предположить, что спектральный коэффициент отражения будет определяться соотношением

$$\rho_\lambda \sim \frac{n}{n_c}, \quad (2)$$

где n - число атомов в возбужденном состоянии; n_c - пороговое число возбужденных атомов. Отсюда видно, что в случае полного



Спектральный направленно-полусферический коэффициент отражения некоторых тугоплавких оксидов в условиях сильной неравновесности: а - оксид эрбия, $\lambda = 5 \mu\text{м}$ (1); $\lambda = 4 \mu\text{м}$ (2); б - оксид самария, $\lambda = 3.5 \mu\text{м}$ (1); $\lambda = 5 \mu\text{м}$ (2); в) диоксид циркония, $\lambda = 4 \mu\text{м}$ (1); $\lambda = 5 \mu\text{м}$ (2).

заселения возбужденного состояния коэффициент отражения равен единице.

С этой точки зрения можно понять периодическую температурную зависимость спектрального коэффициента отражения. При увеличении температуры облучаемой поверхности заполняется верхний энергетический уровень, коэффициент отражения растет, достигая

своего максимального значения при полностью заселенном верхнем уровне. Продолжая увеличивать отклонение системы от состояния термодинамического равновесия, мы наблюдаем уменьшение коэффициента отражения, что означает уменьшение населенности верхнего уровня. Далее процесс повторяется периодически.

Сравним полученные результаты с S -теоремой Климонтовича. Так, по Климонтовичу [2], состояние физического хаоса и процесс самоорганизации вводятся следующим образом: „Обозначим через $a=(a_1, \dots, a_n)$ набор параметров, принятых за управляющие. Выделим два состояния при значениях $a=a_0$, $a=a_0 + \Delta a$. По предположению процессу самоорганизации отвечают изменения $\Delta a \geq 0$. При этом условии для процесса самоорганизации

$$a = a_0 + \Delta a, \quad \Delta a_i > 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

Состояние при $a=a_0$ назовем состоянием физического хаоса. Будем принимать его за „начало отсчета“ при сравнении степени упорядоченности“.

В нашем случае „началом отсчета“ будет являться основное состояние двухуровневой системы. Заполнение возбужденного состояния будет приводить к процессу самоорганизации, опустошение верхнего уровня – к состоянию физического хаоса. Поэтому, в отличие от S -теоремы, согласно которой эволюция в пространстве управляющих параметров приводит к большей упорядоченности системы, наши результаты утверждают, что эволюция в пространстве управляющих параметров не всегда приводит к большей упорядоченности системы. В частности, было обнаружено, что при росте управляющего параметра происходит периодическая последовательность превращений физический хаос \rightarrow порядок \rightarrow физический хаос \rightarrow порядок \rightarrow и т.д. Обнаруженную эволюцию в пространстве управляющих параметров можно принять за новую форму самоорганизации.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Л о с к у т о в А.Ю., М и х а й л о в А.С. Введение в синергетику. М.: Наука, 1990. 280 с.
- [2] К л и м о н т о в и ч Ю.Л. // УФН. 1989. Т. 158. В. 1. С. 59–91.
- [3] З и г е л ь Р., Х а у э л л Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 840 с. (Siegel R., Howell J.R., Thermal Radiation Heat Transfer N. Y.: McGraw-Hill, 1972).

Физико-технический
институт АН Республики
Узбекистан, Ташкент

Поступило в Редакцию
20 октября 1992 г.